RESOLUCIÓN 4133.010.21.0.1525
26/DICIEMBRE/2019

POR LA CUAL SE ADOPTA EL DOCUMENTO TÉCNICO "MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO 2019 - 2031", DEFINIDAS EN EL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL ACUIFERO EN EL PERÍMETRO URBANO DE SANTIAGO DE CALI FORMULADO EN EL AÑO 2019.

La Directora del Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA, en uso de sus atribuciones legales, en especial las conferidas por el Decreto 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, el Acuerdo N°0373 de 2014 (POT), el Decreto extraordinario 411.0.20.0516 de 2016 y demás normas concordantes y vigentes y

CONSIDERANDO:

Que el artículo 134 del Decreto Ley 2811 de 1974, determina que le corresponde al Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano y en general para las demás actividades en que su uso sea necesario, mediante el cumplimiento de funciones relacionadas con la clasificación y destinación de las aguas para su aprovechamiento, al igual que el control de la calidad para mantenerlo apto para los fines y usos complementarios.

Que el Artículo 65 de la Ley 99 de 1993, determina las funciones de los Municipios, Distritos, y en el numeral 2 señala: "*Dictar con sujeción a las disposiciones legales reglamentarias superiores, las normas necesarias para control, la preservación y la defensa del patrimonio ecológico del municipio*".

Que el artículo 66 dispone que "*los municipios, distritos o áreas metropolitanas cuya población urbana fuere igual o superior a un millón de habitantes (1.000.000) ejercerán dentro del perímetro urbano las mismas funciones atribuidas a las Corporaciones Autónomas Regionales, en lo que fuere aplicable al medio ambiente urbano.*"

Que el artículo 2.2.3.3.1.4. del Decreto 1076 de 2015 establece que: *"La Autoridad Ambiental Competente deberá realizar el Ordenamiento del Recurso Hídrico con el fin de realizar la clasificación de las aguas superficiales, subterráneas y marinas, fijar en forma genérica su destinación a los diferentes usos de que trata el presente decreto y sus posibilidades de aprovechamiento."*

Que el artículo 2.2.3.1.11.1. Dispone en lo relacionado con el Plan de Manejo Ambiental *y* específicamente respecto de la *"Planificación y administración del agua subterránea, mediante la ejecución de proyectos actividades de conservación, protección y uso sostenible del recurso, que a la autoridad ambiental competente formulara el plan".*

RESOLUCIÓN 4133.010.21.0.1525
26/DICIEMBRE/2019

POR LA CUAL SE ADOPTA EL DOCUMENTO TÉCNICO "MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO 2019 - 2031", DEFINIDAS EN EL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL ACUIFERO EN EL PERÍMETRO URBANO DE SANTIAGO DE CALI FORMULADO EN EL AÑO 2019.

las siguientes condiciones, en relación con la oferta, demanda y calidad hídrica, riesgo y gobernabilidad:

1. *Agotamiento o contaminación del agua subterráneas de conformidad con lo establecido con el art 152 del decreto – ley 2811 de 1974 reglamentado por los artículos 121 y 166 de decreto 1541 de 178 o la norma que los modifique o sustituya.*
2. *Cuando por sus características hidrogeológicas el acuífero sea estratégico para el desarrollo socioeconómico de una región.*
3. *Existencia de conflictos por el uso del agua subterránea.*
4. *Cuando se requiera que el acuífero sea la fuente alterna por desabastecimiento de agua superficial, debido a riesgos antrópicos o naturales."*

Que con fundamento en lo dispuesto por el artículo mencionado, este despacho evidenció que las condiciones referidas en los numerales 2 y 4 aplican al acuífero del área urbana de la Ciudad de Santiago de Cali y por ende se requiere la elaboración de un Plan de Manejo Ambiental del acuífero.

Que conforme a la zonificación hidrogeológica de Colombia realizada por el IDEAM en el año 2001, el acuífero del área urbana de Santiago de Cali pertenece al acuífero de la zona hidrogeológica VALLE DEL CAUCA - PATIA.

Que, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, expidió la Guía Técnica para la Formulación de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico, en cumplimiento del parágrafo 2 del artículo 2.2.3.3.1.8 del Decreto 1076 de 2015.

Que la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC y la Fundación STICHTING DELTARES, con recursos de la sobretasa ambiental de Santiago de Cali, han celebrado el Convenio Especial de cooperación N° 218 de 2017, cuyo objeto es "AUNAR ESFUERZOS TECNICOS Y ECONOMICOS PARA LA ELABORACION DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DEL CAUCA PARA LA ZONA URBANA DE SANTIAGO DE CALI", según el cual se establecen las líneas estratégicas, programas y proyectos para el manejo ambiental del agua subterránea en el área urbana.

Que el Ministerio de Ambiente en oficio con radicado No. 8230-3-756 del 30/10/2019 da respuesta al radicado DAGMA No. 20194133010016652l del 30/09/2019 informando que "*sugiere que el DAGMA con base en los resultados obtenidos en el proceso de*

RESOLUCIÓN 4133.010.21.0.1525
26/DICIEMBRE/2019

POR LA CUAL SE ADOPTA EL DOCUMENTO TÉCNICO "MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO 2019 - 2031", DEFINIDAS EN EL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL ACUIFERO EN EL PERÍMETRO URBANO DE SANTIAGO DE CALI FORMULADO EN EL AÑO 2019.

Que la Corporación Autónoma Regional del Valle – CVC, mediante radicado No. 2019413301-017104 del 26 de Diciembre de 2019, entregó al DAGMA el octavo y último informe del PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DEL CAUCA PARA LA ZONA URBANA DE SANTIAGO DE CALI 2019, como resultado del cumplimiento del Convenio N° 218 de 2017, celebrado entre Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC y la Fundación STICHTING DELTARES.

Que el Decreto 411.0.20.0516 de 2016, por medio del cual se determina la estructura de la administración central y las funciones de sus dependencias, dispuso que el Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible integrado por Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente - DAGMA - organismo principal del sector central, con autonomía administrativa para el desarrollo de las funciones y competencias, encargado de la gestión ambiental en Santiago de Cali, máxima autoridad ambiental dentro de su perímetro urbano, con la misión de garantizar a través de la formulación de políticas, planes, programas y proyectos que la planeación, gestión, ordenamiento, control del medio ambiente de la ciudad, se desarrolle de manera armónica y sostenible.

Que para el DAGMA los resultados obtenidos en la Formulación de los procesos, proyectos y actividades registrados en el documento del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero urbano de Santiago de Cali - PMAA, son una herramienta importante para la adecuada administración del recurso Hídrico subterráneo, dado que en ellos se identifican las medidas necesarias a corto, mediano y largo plazo para su protección y uso sostenible.

Que el PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DEL CAUCA PARA LA ZONA URBANA DE SANTIAGO DE CALI 2019 define que la zona prioritaria de recarga, ubicada principalmente en el cono aluvial del río Pance representa el 82% de la recarga total del acuífero en la ciudad, y de acuerdo al sistema de flujo alimenta el acuífero y se mueve a través de él hacia el norte hasta el paleodrenaje del río Cañaveralejo, el cual tenía su desembocadura en el sector del actual paso a Juanchito. Por esto, la recarga que ocurre en esta área es importante para gran parte de la ciudad que sus aguas se dirigen a zonas donde existen pozos de agua para los diferentes usos concesionados y hacia la zona de descarga en el Este de la ciudad, donde actualmente se estudió del potencial del acuífero para el consumo humano de Santiago de Cali al existir cuerpos de agua como madreviejas y humedales que dependen de esta descarga subterránea para mantener sus niveles y por consiguiente los servicios ecosistémicos que prestan.

RESOLUCIÓN 4133.010.21.0.1525
26/DICIEMBRE/2019

POR LA CUAL SE ADOPTA EL DOCUMENTO TÉCNICO "MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO 2019 - 2031", DEFINIDAS EN EL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL ACUIFERO EN EL PERÍMETRO URBANO DE SANTIAGO DE CALI FORMULADO EN EL AÑO 2019.

AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO 2019 - 2031", con el fin de extraer del documento las líneas estratégicas, programas, proyectos y medidas para el área urbana de la ciudad de Santiago de Cali.

En mérito de lo expuesto, este despacho

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO: ADOPTAR el documento técnico "MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO 2019 – 2031" elaborado a partir de los resultados de la formulación del PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DEL CAUCA PARA LA ZONA URBANA DE SANTIAGO DE CALI 2019, el cual hará parte integral de la presente resolución.

ARTÍCULO SEGUNDO: Para el cumplimiento de lo establecido en el documento "MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO 2019 - 2031" se llevarán a cabo de manera integral con el documento Plan de Manejo Ambiental del Acuífero de Santiago de Cali formulado – PMAA 2019 - 2031, para las etapas de corto, mediano y largo plazo, que corresponden a 4 años, 8 años y 12 años, respectivamente y su revisión y/o ajuste deberá realizarse al vencimiento del período previsto para el cumplimiento de los objetivos de calidad y con base en los resultados del programa de seguimiento y monitoreo del plan formulado.

ARTÍCULO TERCERO: Informar a todas las Dependencias de la Alcaldía de Santiago de Cali, sobre las decisiones adoptadas en el presente acto administrativo, con el fin de que sean tenidas en cuenta como determinante ambiental a partir de la publicación del presente acto administrativo y se incorporen en el proceso de revisión del Plan de Ordenamiento Territorial - POT 2014 - acuerdo 0373 de 2014.

ARTÍCULO CUARTO: Contra la presente Resolución no procede recurso alguno, de conformidad con el Artículo 75 del Código de Procedimiento Administrativo y de lo

RESOLUCIÓN 4133.010.21.0.1525
26/DICIEMBRE/2019

POR LA CUAL SE ADOPTA EL DOCUMENTO TÉCNICO "MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO 2019 - 2031", DEFINIDAS EN EL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL ACUIFERO EN EL PERÍMETRO URBANO DE SANTIAGO DE CALI FORMULADO EN EL AÑO 2019.

ARTÍCULO QUINTO: Fíjese en lugar público y publíquese en la página web del organismo.

ARTÍCULO SEXTO: El presente Acto Administrativo rige a partir de la fecha de su publicación.

Dado en Santiago de Cali, a los veintiséis (26) días del mes de diciembre de 2019.

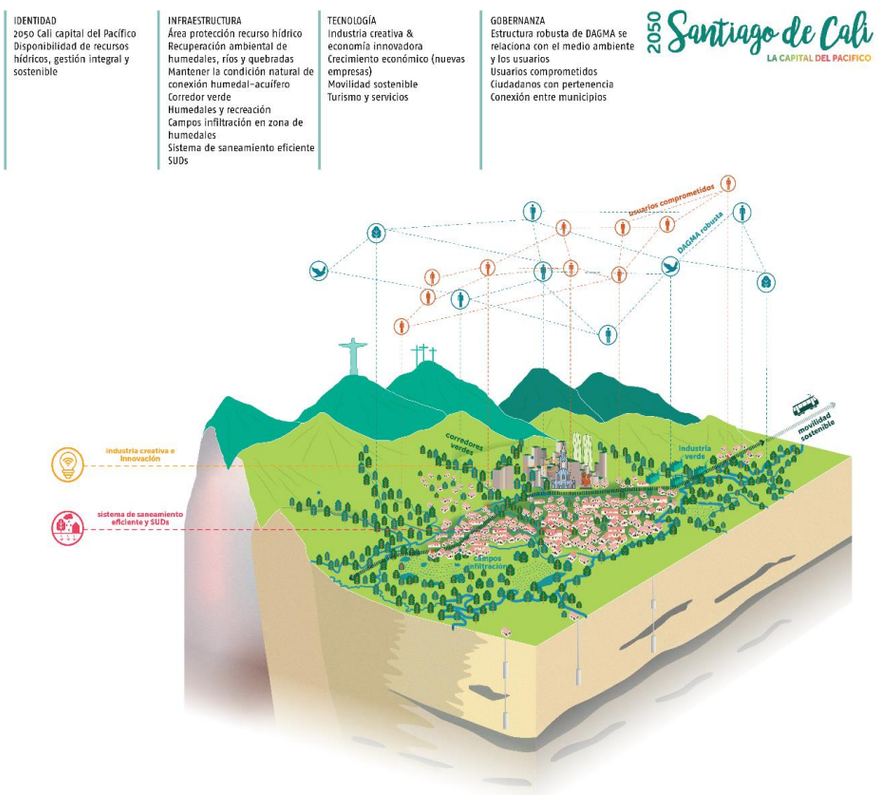
CLAUDIA MARIA BUITRAGO RESTREPO
Directora

Proyectó y elaboró: Camilo Velez Estrada – Contratista, Grupo Gestión del Recurso Hídrico.
Revisó: Héctor Alejandro Paz Gómez- Subdirector Gestión de Calidad Ambiental.
Javier Ospina Cocuy- Contratista.
Álvaro Loaiza Duque - Contratista.

ALCALDÍA DE
SANTIAGO DE CALI
DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO
DE GESTIÓN MEDIO AMBIENTE

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE GESTION DEL MEDIO AMBIENTA DAGMA

MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO 2019 – 2031



GRUPO GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO
SUBDIRECCION DE GESTIÓN DE CALIDAD AMBIENTAL
DICIEMBRE 2019

I. ANTECEDENTES

En el año 2017, el Grupo de Recurso Hídrico del DAGMA realizó la gestión para sacar adelante con recursos de la Sobretasa Ambiental del Municipio la formulación del Plan de Manejo del Acuífero urbano en la ciudad de Cali en conjunto con la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC.

Es asi como la CVC y la Fundación STICHTING DELTARES, con recursos de la sobretasa ambiental del Municipio de Santiago de Cali, realizaron el Convenio Especial de cooperación N° 218 de 2017, cuyo objeto es "AUNAR ESFUERZOS TECNICOS Y ECONOMICOS PARA LA ELABORACION DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DEL CAUCA PARA LA ZONA URBANA DE SANTIAGO DE CALI", con base en el cual se establecen las líneas estratégicas, programas y proyectos para el manejo ambiental del agua subterránea en el área urbano.

En este sentido, el Ministerio de Ambiente por medio del oficio con radicado DAGMA No. 20194133010015075-2 del 5/11/2019, "*sugiere que el DAGMA con base en los resultados obtenidos en el proceso de formulación del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero en su jurisdicción, formule las medidas de manejo ambiental, tendientes a la protección y uso sostenible de los recursos hídricos subterráneos en la zona urbana de Santiago de Cali, las cuales deberían ser adoptadas mediante acto administrativo de dicha autoridad ambiental*".

Que la Corporación Autónoma Regional del Valle – CVC, mediante radicado No. 2019413301-017104 del 26 de Diciembre de 2019, entregó al DAGMA el octavo y último informe del PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DEL CAUCA PARA LA ZONA URBANA DE SANTIAGO DE CALI 2019, como resultado del cumplimiento del Convenio N° 218 de 2017, celebrado entre Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC y la Fundación STICHTING DELTARES.

De esta manera, con la información entregada del PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DEL CAUCA PARA LA ZONA URBANA DE SANTIAGO DE CALI 2019, como resultado del cumplimiento del Convenio N° 218 de 2017, celebrado entre Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC y la Fundación STICHTING DELTARES, el DAGMA elaboro el documento "MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO 2019 - 2031", con el fin de extraer del documento las líneas estratégicas, programas, proyectos y medidas para el área urbana de la ciudad de Santiago de Cali.

II. FUNDAMENTOS NORMATIVOS

Que el artículo 134 del Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables Decreto Ley 2811 de 1974, determina que le corresponde al Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano y en general para las demás actividades en que su uso sea necesario, mediante el cumplimiento de funciones relacionadas con la clasificación y destinación de las aguas para su aprovechamiento, al igual que el control de la calidad para mantenerlo apto para los fines y usos complementarios.

Que conforme a la zonificación hidrogeológica de Colombia realizada por el IDEAM en el año 2001, el acuífero del área urbana de Santiago de Cali pertenece al acuífero de la zona hidrogeológica VALLE DEL CAUCA - PATIA.

Que el artículo 2.2.3.3.1.4. del Decreto 1076 de 2015 establece que: *"La Autoridad Ambiental Competente deberá realizar el Ordenamiento del Recurso Hídrico con el fin de realizar la clasificación de las aguas superficiales, subterráneas y marinas, fijar en forma genérica su destinación a los diferentes usos de que trata el presente decreto y sus posibilidades de aprovechamiento."*

Que el artículo 2.2.3.1.11.1. Del Decreto 1076 de 2015 establece en lo relacionado al Plan de Manejo Ambiental que: *"Del objeto y la responsabilidad: Planificación y administración del agua subterránea, mediante la ejecución de proyectos actividades de conservación, protección y uso sostenible del recurso. La autoridad ambiental competente formulara el plan"*.

Que el artículo .2.2.3.1.11.2 del Decreto 1076 de 2015, indica que *en aquellos acuíferos que no hagan parte de un plan de ordenación y Manejo de la cuenca Hidrográfica, la AA competente elabora el plan de manejo ambiental del acuífero, previa selección y priorización del mismo, cuando se presenten o se prevean como mínimo una de las siguientes condiciones, en relación con la oferta, demanda y calidad hídrica, riesgo y gobernabilidad*:

1. Agotamiento o contaminación del agua subterráneas de conformidad con lo establecido con el art 152 del decreto – ley 2811 de 1974 reglamentado por los artículos 121 y 166 de decreto 1541 de 178 o la norma que nos modifique o sustituya.
2. Cuando por sus características hidrogeológicas el acuífero sea estratégico para el desarrollo socioeconómico de una región.
3. Existencia de conflictos por el uso del agua subterránea.
4. Cuando se requiera que el acuífero sea la fuente alterna por desabastecimiento de agua superficial, debido a riesgos antrópicos o naturales.

Que con base al artículo 2.2.3.1.11.2 del Decreto 1076 de 2015, el DAGMA evidencio que las condiciones de los puntos No. 2 y 4 aplican al acuífero del área urbana de la Ciudad de Cali y por ende se requiere la elaboración de un Plan de Manejo Ambiental del acuífero en su jurisdicción.

Que, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, expidió la Guía Técnica para la Formulación de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico, en cumplimiento del parágrafo 2 del artículo 2.2.3.3.1.8 del Decreto 1076 de 2015.

Que el Ministerio de Ambiente por medio del oficio con radicado DAGMA No. 20194133010015075-2 del 5/11/2019, "*sugiere que el DAGMA con base en los resultados obtenidos en el proceso de formulación del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero en su jurisdicción, formule las medidas de manejo ambiental, tendientes a la protección y uso sostenible de los recursos hídricos subterráneos en la zona urbana de Santiago de Cali, las cuales deberían ser adoptadas mediante acto administrativo de dicha autoridad ambiental*".

III. FORMULACION MEDIDAS DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONSERVACION DEL ACUIFERO Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO.

Con base en las amenazas identificadas en conjunto con los actores sociales, las identificadas con DAGMA, las situaciones ambientales del acuífero identificadas en el diagnóstico técnico y el análisis de capacidad institucional del PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DEL CAUCA PARA LA ZONA URBANA DE SANTIAGO DE CALI 2019, se llevó a cabo la fase de formulación en la cual se definieron, las líneas estratégicas, los programas y proyectos planteados para dar respuesta a problemas actuales encontrados en el análisis, para evitar potenciales problemas relacionados con el acuífero y para avanzar en el conocimiento y la construcción de ciudad hacia la visión y objetivos planteados por el PMAA y con ello tener las medidas de conservación y administración del Acuífero.

- *Líneas Estratégicas, programas y proyectos*

Se consideró que la línea estratégica de generación de conocimiento e información para la gestión integral del recurso hídrico es transversal a las líneas estratégicas restantes, por lo que se decidió incorporarla como parte de éstas. Las líneas estratégicas definitivas para el presente PMAA son:

1. Gestión integral de la oferta y la demanda hídrica subterránea
2. Mantener y asegurar la calidad del recurso hídrico subterráneo
3. Fortalecer la capacidad institucional y de gobernanza

A continuación se presentan la descripción, los programas y proyectos para cada una de las líneas estratégicas:

1. **LINEA ESTRATEGICA 1:** GESTION DE LA OFERTA Y LA DEMANDA HÍDRICA SUBTERRÁNEA

La meta principal es fortalecer la conservación de la cantidad de agua subterránea y mantener el balance entra la oferta y demanda sobre el agua subterránea en el territorio de Santiago de Cali. Se considera que a largo plazo, si no se mantiene este balance, el uso del agua subterránea no va ser sustentable. En consecuencia, el medio-ambiente, los usuarios y los objetivos socio-económicos se verán afectados. En esta línea se pretende trabajar en 3 programas, claramente conectados:

Programa 1.1: Mejoramiento del conocimiento del recurso hídrico subterráneo y de sus servicios ecosistémicos. En el programa 1.1 se distingue los siguientes proyectos concretos:

Proyecto 1.1.1: Evaluación de efectos en el acuífero por la construcción de pozos radiales para la filtración de lecho del rio Cauca en su margen Izquierda.

Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico

Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema

Proyecto 1.1.4: Caracterización hidrogeológica de la Unidad C y evaluación de su potencial para el abastecimiento humano.

Programa 1.2: Preservación de la seguridad de la oferta hídrica subterránea
Los proyectos en el programa 1.2 son:

Proyecto 1.2.1: Definición de determinantes para la conservación, protección y recuperación de la oferta hídrica subterránea en áreas intervenidas o a intervenir urbanísticamente en zonas de recarga.

Programa 1.3: Gestión de la demanda para necesidades ambientales y usos económicos y sociales. Este programa incluye los siguientes proyectos:

Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo

Proyecto 1.3.2: Estimación de módulos de consumo de agua por sectores productivos.

LINEA ESTRATEGICA 2: PRESERVACIÓN DE LA CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO

En la segunda línea se pretende asegurar y mejorar el estado de la calidad de las aguas subterráneas, para su uso actual y futuro. Debido a las actividades contaminantes, como por ejemplo los hidrocarburos, el sistema de alcantarillado y otros fuentes de contaminación, que usan el suelo para almacenamiento y/o trasporte generando la posibilidad de infiltración hasta el acuífero, se debe propender por la prevención, control y seguimiento para evitar que se provoquen daños irreversibles a este reservorio valioso y común. Se ha formulado 1 programa en esta línea:

Programa 2.1: Gestión para la identificación y reducción de la contaminación en articulación entre las autoridades, el sector privado, científico y la sociedad civil
Este programa incluye los siguientes proyectos:

Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes

Proyecto 2.1.2: Caracterización de actuales y potenciales procesos de contaminación al acuífero y propuestas de posibles soluciones en sitios priorizados

Proyecto 2.1.3: Estudio de las interacciones entre el sistema de alcantarillado y el acuífero**.**

LINEA ESTRATEGICA 3: FORTALECIMIENTO DE LA CAPACIDAD INSTITUCIONAL Y DE GOBERNANZA

Se enfoca en el fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza para el manejo de recurso hídrico subterráneo, de acuerdo con la visión de la autoridad de ser una entidad altamente capaz, preparada y confiable y enfocada en facilitar la participación de la sociedad civil, científica, empresarial y ambiental.
Se ha formulado 2 programas en esta línea:

Programa 3.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo, incluyendo actores del sector privado, el sector público y la sociedad civil.

Proyecto 3.1.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo

Programa 3.2: Mejoramiento de la capacidad técnica e institucional sobre el manejo del agua subterránea y la implementación efectiva del PMAA, en colaboración con la comunidad científica, otras autoridades y actores principales

Proyecto 3.2.1: Mejoramiento de la capacidad interna del Grupo de Recursos Hídricos y otros grupos relevantes del DAGMA en cuanto al manejo de recursos

de agua subterránea.

Proyecto 3.2.2: Revisión y actualización de la resolución 001 de 2003, con base en el PMAA, incluyendo protocolos de operación que se identifiquen necesario para mejorar los trámites y procedimientos sobre el uso y manejo de agua entre DAGMA y el usuario.

Proyecto 3.2.3: Centro de apoyo para la toma de decisiones en torno a la gestión del agua subterránea

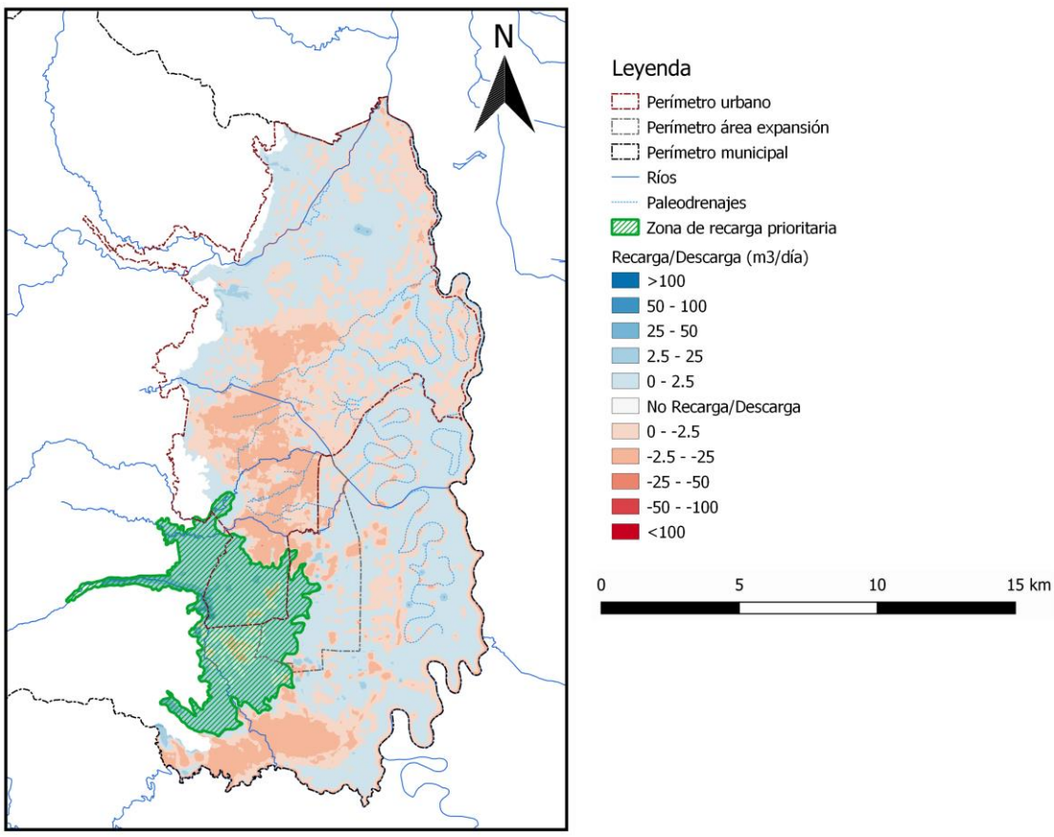
Proyecto 3.2.4: Propuesta de fortalecimiento del laboratorio ambiental para la investigación y el monitoreo de los recursos hídricos, con un enfoque al monitoreo de la contaminación

Los proyectos mencionados en los puntos I,II y III, hacen parte integral y se llevarán a cabo conforme a las justificaciones, alcances, condiciones y lineamientos del documento PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DEL CAUCA PARA LA ZONA URBANA DE SANTIAGO DE CALI 2019, para las etapas de corto, mediano y largo plazo, que corresponden a 4 años, 8 años y 12 años respectivamente. Su revisión y/o ajuste deberá realizarse al vencimiento del período previsto para el cumplimiento de los objetivos de calidad y con base en los resultados del programa de seguimiento y monitoreo del plan formulado.

- *Otras medidas de manejo para la conservación*

El PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DEL CAUCA PARA LA ZONA URBANA DE SANTIAGO DE CALI 2019, define que la zona prioritaria de recarga, ubicada principalmente en el cono aluvial del río Pance representa el 82% de la recarga total del acuífero en la ciudad, y de acuerdo al sistema de flujo alimenta el acuífero y se mueve a través de él hacia el norte hasta el paleodrenaje del río Cañaveralejo, el cual tenía su desembocadura en el sector del actual paso a Juanchito. (Ver mapa 1)

Por esto, la recarga que ocurre en esta área es importante para gran parte de la ciudad, ya que sus aguas se dirigen a zonas donde existen pozos de agua para los diferentes usos concesionados, y a la zona de descarga en el este de la ciudad donde actualmente se estudia el potencial del acuífero para el consumo humano en la ciudad de Cali, y donde existen cuerpos de agua como madreviejas y humedales que dependen de esta descarga de agua subterránea para mantener sus niveles y por consiguiente los servicios ecosistémicos que prestan.



Mapa 1. Zona de recarga prioritaria. Fuente: Plan De Manejo Ambiental del Sistema Acuífero del Valle del Cauca para La Zona Urbana de Santiago de Cali 2019 – CVC

Conforme a ello es necesario tener en cuenta lo siguiente para ser ajustado por medio del Plan de Ordenamiento Territorial - POT o cualquier herramienta jurídica que permita la implementación de lo siguiente de manera inmediata, en función de la protección y conservación del agua subterránea:

1. La zona de recarga prioritaria identificada en el mapa “Zona de recarga prioritaria”, del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero de Santiago de Cali formulado – PMAA 2019 – 2031, se considera en su totalidad como área de protección y recuperación ambiental para la conservación del recurso Hídrico subterráneo.

2. En la zona de recarga prioritaria, los desarrollos urbanísticos que no cuentan con licencia urbanística radicadas para trámite ante la curaduría antes del 1 de enero de 2020 y que realicen modificación del suelo, deberán contar con una propuesta técnica avalada por el DAGMA, con las medidas para garantizar que la tasa de infiltración del agua lluvia (mm/año) y el volumen de infiltración anual en el área total del proyecto como suelo natural, se conserven. Sin la aprobación del DAGMA no se permitirá la intervención del suelo. Esto regirá hasta que se desarrollen los proyectos planteados en el presente acto administrativo, relacionados con el programa 1.2 Preservación de la seguridad de la oferta hídrica subterránea y/o se modifique o sustituya por otro acto administrativo.

3. La violación de las determinantes establecidas en el presente documento técnico será motivo de la imposición de las medidas preventivas y/o sancionatorias establecidas en la ley 1333 de 2009, o norma que la modifique o sustituya.

Fin del documento.

PMAA

Plan de Manejo Ambiental de Acuífero

Zona urbana - Santiago de Cali

Deltares
Enabling Delta Life

CVC
Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
Comprometidos con la vida.

DAGMA
DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE

Cali progresa contigo

ALCALDÍA DE SANTIAGO DE CALI

Plan de Manejo Ambiental de Acuífero

Zona Urbana Santiago de Cali

Guillermo Céspedes
Marta Faneca
Sandra Galvis
Joost Delsman
William Oliemans
Begoña Arellano
Cristian Suarez
Katherine Sanchez
Andrea Fernández
Micha Werner
Tibor Stigter
Gloria Isabel Páez
Geoff Zimmel
Luciana Scrinzi
Betsy Romero

Camilo Vélez
Marleny García
Ruber Erney Rengifo
Sandra Teresa Escobar

© Deltares, 2020

Title
Plan de Manejo Ambiental de Acuífero – Zona urbana de Santiago de Cali

Client	Project	Pages
Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), CALI - VALLE	11201027-002	356

Keywords
Plan de Manejo Ambiental, Agua Subterránea, Cali

Version	Date	Author	Initials	Review	Initials	Approval	Initials
1.0	abril 2020	Guillermo Céspedes López Marta Faneca Sánchez				Timo Kroon	

Status
final

Contenido

Listado de Figuras **iv**

Listado de Tablas **xi**

1 Introducción **15**
1.1 Área de estudio 16
1.2 Descripción General del municipio de Santiago Cali 17
1.2.1 Aspecto político-administrativos 17
1.2.2 Aspectos sociales 18
1.2.3 Aspectos económicos 19
1.3 Antecedentes en el estudio y gestión del agua subterránea en el Municipio de Santiago de Cali 19

2 Etapa de Aprestamiento **21**
2.1 Coordinación institucional 21
2.1.1 Coordinación con grupos interdisciplinarios en el DAGMA 21
2.1.2 Coordinación con otras entidades 23
2.2 Sistema de información del PMAA 24
2.3 Recopilación y análisis de información secundaria 24
2.3.1 Informes y estudios existentes de relevancia para el PMAA 25
2.3.2 Datos recopilados sobre el sistema hidrogeológico de Cali 27
2.4 Identificación de actores y sectores claves 29
2.4.1 Revisión y análisis de la información secundaria para la identificación de actores y sectores. 30
2.4.2 Elaboración de base de datos de sectores y actores identificados 30
2.4.3 Clasificación de actores y sectores por categoría. 31
2.4.4 Caracterización de los actores por posición, poder e interés. Elaboración del mapa de actores sociales. 32
2.4.5 Definición de herramientas de diálogo. 33
2.4.6 Jornadas de socialización del proyecto con los diferentes actores identificados. 33
2.5 Construcción de la identidad visual y difusión inicial del PMAA 35

3 Diagnóstico técnico **43**
3.1 Contexto biofísico 43
3.2 Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de Santiago de Cali 45
3.2.1 Geología detallada del municipio de Santiago de Cali 45
3.2.2 Unidades hidrogeológicas del Valle del Cauca 53
3.2.3 Unidades hidrogeológicas detalladas para el municipio de Santiago de Cali 54
3.2.4 Captaciones de aguas subterráneas 78
3.2.5 Recarga 81
3.2.6 Sistemas de flujo de agua subterránea 90
3.2.7 Consumos de agua subterránea en Cali 93
3.2.8 Balance hídrico subterráneo 96
3.2.9 Características hidrogeoquímicas 98

3.2.10 Calidad del agua subterránea 105
3.3 Modelación numérica 113
3.3.1 Código iMODFLOW 113
3.3.2 Discretización del modelo 113
3.3.3 Condiciones de frontera 116
3.3.4 Propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas 117
3.3.5 Recarga 122
3.3.6 Aguas superficiales 122
3.3.7 Pozos de bombeo 126
3.3.8 Calibración del modelo 130
3.3.9 Resultados del modelo estacionario 131
3.3.10 Resultados del modelo transitorio 147
3.3.11 Incertidumbre del modelo 155
3.3.12 Escenarios de cambio climático 156
3.3.13 Escenario de cambio de uso de suelo 161
3.4 Resultados del balance hídrico, volumen almacenado, e IEAS 165
3.4.1 Balance hídrico 165
3.4.2 Volumen almacenado 167
3.4.3 Índice de Extracción de las Aguas Subterráneas 168
3.5 Análisis y recomendaciones para la red de monitoreo de la cantidad y calidad del agua subterránea 169
3.6 Zonas de recarga y descarga del acuífero 172
3.7 Vulnerabilidad intrínseca del acuífero 176

4 Diagnóstico Participativo 191
4.1 Talleres participativos con los actores 191
4.1.1 Metodología 191
4.1.2 Resultados de los talleres participativos: Amenazas identificadas por los diferentes grupos de actores sociales 193
4.1.3 Reflexiones de los actores resultado de los talleres participativos y de las salidas de campo 196
4.2 Salidas de campo 197
4.3 Talleres con profesionales del DAGMA 198
4.3.1 Taller con grupos multidisciplinarios del DAGMA 200
4.3.2 Talleres con el Grupo de Recursos Hídricos de DAGMA 203
4.3.3 Resultados de los talleres con profesionales del DAGMA 204
4.4 Análisis de gobernanza y capacidad institucional del DAGMA 209
4.5 Herramientas de comunicación durante el Diagnóstico Participativo 211

5 Descripción de las amenazas identificadas 215
5.1 Amenazas relacionadas con la oferta y la demanda 215
5.2 Amenazas relacionadas con la contaminación de las aguas subterráneas 222
5.3 Amenazas relacionadas con la gobernanza y el fortalecimiento institucional 233
5.4 Escenarios 238

6 Etapa de Formulación 243
6.1 Introducción, el porqué de un PMAA 243
6.2 El proceso participativo de la formulación 243
6.3 Metodología y resultados de la visión 244
6.3.1 Visión general 245

6.3.2 Taller participativo de espacialización de la visión con los profesionales del DAGMA 245
6.3.3 Conocimiento experto 251
6.4 Metodología y resultados de definición de líneas estratégicas, programas y proyectos 253
6.4.1 Línea estratégica 1: Gestión de la oferta y la demanda hídrica subterránea256
6.4.2 Línea estratégica 2: Preservación de la calidad del recurso hídrico subterráneo 275
6.4.3 Línea estratégica 3: Fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza 287
6.5 Articulación 298
6.5.1 Plan de Ordenamiento Territorial (POT) Cali (2014) 298
6.5.2 Plan de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático de Cali (205) 304
6.5.3 Avances en el desarrollo de la formulación del PMAA del Valle del Cauca307
6.5.4 POMCAs 309

7 Conclusiones 311
7.1 Aprestamiento 311
7.2 Diagnóstico 313
7.3 Amenazas 316
7.4 Formulación 317

8 Bibliografía 319

9 Anexos 325
9.1 Anexo 1 325
9.2 Anexo 2 327
9.2.1 Variación diaria de la precipitación 327
9.2.2 Variación diaria de temperatura y evapotranspiración potencial 329
9.2.3 Estimación del riego para las zonas de cultivo 330
9.2.4 Estimación de la infiltración y la escorrentía 331
9.3 Anexo 3 336
9.3.1 Métodos para el estudio 337
9.3.2 Hidrogeoquímica 337
9.3.3 Análisis isotópicos 338
9.3.4 Puntos de muestreo 338
9.3.5 Análisis de resultados 341
9.3.6 Conclusiones 348
9.4 Anexo 4 349

Listado de Figuras

Figura 1-1. Localización del área de estudio. 17
Figura 1-2 Población municipal de Santiago de Cali – estimación a 2016 Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Municipal 18
Figura 1-3 Número de empresas creadas en Cali, según sector económico (Enero –Mayo 2016 2017). Fuente: Cali como vamos. 2017....19
Figura 2-1 Proceso metodológico para la identificación de actores y sectores PMMA Cali....30
Figura 2-2 Mapa de actores. 32
Figura 2-3 Equipo Técnico realizando aportes en la construcción de la identidad visual 36
Figura 2-4 Logo PMAA Zona urbana Santiago de Cali 36
Figura 2-5 Ilustración PMAA Zona urbana Santiago de Cali 37
Figura 2-6 Imagen de pendón utilizada en Jornadas de Socialización PMAA 17, 18, 19 y 23 de abril de 2018 38
Figura 2-7 Plegable PMAA Zona Urbana Santiago de Cali 39
Figura 2-8 Collage de imágenes relacionadas con la primera jornada realizada en fase de aprestamiento 40
Figura 2-9 Collage de imágenes relacionadas con la difusión del PMAA en medios masivos 41
Figura 3-1 Isoyetas e isotermas medias anuales multianuales. Fuente: (CIAT et al., 2015) ..44
Figura 3-2 Estaciones hidroclimatológicas del área de estudio 45
Figura 3-3 Mapa geológico de la zona de estudio. Fuente propia: mapa generado a partir de la unificación del mapa geológico regional y el mapa geológico para la zona urbana de Cali proveniente del estudio de microzonificación sísmica para Cali 52
Figura 3-4 Límite occidental del acuífero en Santiago de Cali....54
Figura 3-5 Cortes generados para definir la geometría del acuífero en Santiago de Cali 56
Figura 3-6 Cortes del estudio de Aguas Subterráneas para Santiago de Cali, 1998 57
Figura 3-7 Comparación corte WE5 y corte B del estudio DAGMA-ACODAL....58
Figura 3-8 Forma de contactos entre formaciones volcánicas y terciarias/cuaternarias adoptados de la MZSC para el modelo 58
Figura 3-9 Geología superficial detallada empleada para la para definición del contacto superficial del basamento y la geometría de la capa B....59
Figura 3-10 Columnas litológicas utilizadas para mejorar definición de la capa B y su leyenda descriptiva 59
Figura 3-11 Corte sentido noroeste-sureste WE3. 61
Figura 3-12 Corte sentido noroeste-sureste WE4. 62
Figura 3-13 Corte sentido noroeste-sureste WE5. 63
Figura 3-14 Corte sentido noroeste-sureste WE6. 64

Figura 3-15 Corte sentido noroeste-sureste WE7. 65
Figura 3-16 Corte sentido noroeste-sureste WE8. 66
Figura 3-17 Corte sentido suroeste-noreste SN1. 67
Figura 3-18 Corte sentido suroeste-noreste SN1B. 68
Figura 3-19 Corte sentido suroeste-noreste SN2. 69
Figura 3-20 Corte sentido suroeste-noreste SN-Cauca. 70
Figura 3-21 Corte tipo de la geometría de las unidades hidrogeológicas en Santiago de Cali. 71
Figura 3-22 Líneas estimadas de espesor de la Unidad B 73
Figura 3-23 Transmisividad a partir de pruebas de bombeo en pozos que captan la Unidad A. 74
Figura 3-24 Capacidad específica de pruebas de bombeo en pozos que captan la Unidad A. 76
Figura 3-25 Conductividad hidráulica equivalente para la unidad A del acuífero 78
Figura 3-26 Puntos de agua subterránea en la zona de estudio 80
Figura 3-27 Estado de los pozos de agua subterráneas 81
Figura 3-28 Esquema del balance hídrico de la columna del suelo 82
Figura 3-29 Zonas impermeabilizadas sobre las que se reduce la recarga estimada en un 90% 85
Figura 3-30 Mapa de la recarga promedio en la zona de estudio para el período enero de 2007 a diciembre de 2017. En gris queda sombreada el área que no ha formado parte del cálculo de la recarga. 86
Figura 3-31 Balance hídrico de EMCALI. Fuente: estudio NEP ICESI 2016, citado por EMCALI 2017 87
Figura 3-32 Diagnóstico de las pérdidas técnicas 88
Figura 3-33 Pozos de monitoreo (en la leyenda: Pozo de monitoreo DAGMA y Pozo de monitoreo CVC) y de bombeo (en la leyenda: Pozos CVC) utilizados para la generación del mapa de isopiezas y el análisis del sistema de flujo de agua subterránea. 91
Figura 3-34 Líneas equipotenciales del agua subterránea en el municipio de Cali 93
Figura 3-35 Volumen Por Uso - Pozos Activos 94
Figura 3-36 Consumos de agua subterránea entre los años 2007 y 2017 por uso 95
Figura 3-37 Esquema del lado oriental del Valle del Cauca con los componentes de los balances hídricos del acuífero, del río Cauca o de los ríos tributarios;. 97
Figura 3-38 Concentración de calcio en mmol/l 100
Figura 3-39 Concentración de magnesio en mmol/l 101
Figura 3-40 Concentración de bicarbonato en mmol/l 102
Figura 3-41 Concentración de sulfato en mmol/l 103
Figura 3-42 Concentración de sodio 104

Figura 3-43 Conductividad eléctrica en el año 2013 106
Figura 3-44 Conductividad eléctrica en el año 2016 107
Figura 3-45 Conductividad eléctrica en el año 2017 107
Figura 3-46 Nitratos en el año 2013 108
Figura 3-47 Nitratos en el año 2017 109
Figura 3-48 Coliformes fecales en el año 2013....110
Figura 3-49 Coliformes fecales en el año 2016....110
Figura 3-50 Coliformes totales en el año 2013....111
Figura 3-51 Coliformes totales en el año 2016....112
Figura 3-52 Dominio del modelo numérico....114
Figura 3-53 Esquematización de las capas del modelo numérico 115
Figura 3-54 Conductividades hidráulicas horizontales interpoladas para las capas del modelo a partir de las conductividades equivalentes de las columnas litológicas. 119
Figura 3-55 Conductividades hidráulicas verticales interpoladas para las capas del modelo a partir de las conductividades equivalentes de las columnas litológicas. 120
Figura 3-56 Transmisividad Unidad A en m2/d (transmisividad total de las capas 1 a 4 del modelo) 121
Figura 3-57 Ríos del modelo....123
Figura 3-58 Detalle de la red de derivaciones de Pance y de los principales lagos/humedales del sector....125
Figura 3-59 Sistema de drenes incorporado en el modelo numérico. Sistema de drenaje 1 (verde) y sistema de drenaje 2 (naranja). 126
Figura 3-60 Pozos usados en el modelo y sus caudales de bombeo promedios para el período 2007-2017 130
Figura 3-61 Niveles freáticos calculados por el modelo (Estos valores se obtuvieron substrayendo los niveles calculados en la capa A1 del MDE suavizado) 132
Figura 3-62 Comparación entre la profundidad del nivel freático promedio observado en la red de monitoreo del DAGMA y la profundidad del nivel freático simulado por el modelo. 133
Figura 3-63 Diferencia entre el nivel freático promedio observado en la red de monitoreo del DAGMA y el nivel freático simulado por el modelo. 134
Figura 3-64 Gráfico de niveles observados vs niveles modelados (a) e histograma de diferencias entre niveles simulados y observados (b). 135
Figura 3-65 Comparación niveles calculados por el modelo y las isopiezas trazadas con datos de campo correspondientes a la Unidad A 136
Figura 3-66 Nivel de agua subterránea calculado por el modelo para la Capa 1 (izquierda) y la Capa 4 (derecha). 137
Figura 3-67 Flujos desde y hacia los ríos....138
Figura 3-68 Flujos desde y hacia el río Cali ver leyenda en Figura 3-67....139

Figura 3-69 Flujos desde y hacia los ríos Lili, Meléndez, Cañaveralejo y Pance ver leyenda en Figura 3-67 139
Figura 3-70 Flujos desde y hacia los ríos Pance y Jamundí ver leyenda en Figura 3-67 140
Figura 3-71 Zonas de recarga y de descarga (flujo entre las capas 3 y 4) 141
Figura 3-72 Balance hídrico para toda el área modelada 142
Figura 3-73 Balance hídrico de los ríos en porcentaje y en m3/d 142
Figura 3-74 Cuencas hidrográficas en el área del modelo 143
Figura 3-75 Balance hídrico para la cuenca del río Cali 144
Figura 3-76 Balance hídrico para la cuenca de los ríos Lili-Meléndez-Cañaveralejo 144
Figura 3-77 Balance hídrico para la cuenca del río Jamundí 145
Figura 3-78 Trayectoria de partículas “hacia adelante” desde el nivel de agua subterránea calculado por el modelo. Tiempo en años. En gris, el nivel superior de la capa 6 que simula la Unidad C. 146
Figura 3-79 Trayectoria de partículas “hacia adelante” desde el nivel de agua subterránea calculado por el modelo. Tiempo en años (escala hasta 30.000 años). En gris, el nivel superior de la capa 6 que simula la Unidad C. 146
Figura 3-80 Trayectoria de partículas “hacia atrás” desde el nivel de agua en el río Cauca. Tiempo en años. En gris, la topografía del modelo. 147
Figura 3-81 Variación de los niveles a lo largo del período simulado calculado como la diferencia entre el percentil 10 y el percentil 90 149
Figura 3-82 Variaciones estacionales de los niveles de agua subterránea 150
Figura 3-83 Puntos de evaluación de los niveles de agua subterránea 151
Figura 3-84 Variación de niveles modelados de agua subterránea en el tiempo en el cono de Pance 151
Figura 3-85 Variación de niveles modelados de agua subterránea en el tiempo en la llanura aluvial del río Cauca aguas arriba 152
Figura 3-86 Variación de niveles modelados de agua subterránea en el tiempo en la parte alta del cono del río Cali 152
Figura 3-87 Variación de niveles modelados de agua subterránea en el tiempo en la llanura aluvial del río Cauca en la ciudad de Cali 153
Figura 3-88 Variación de niveles modelados de agua subterránea en el tiempo en el área de expansión 153
Figura 3-89 Variación mensual promedio de niveles de agua subterránea en los 5 puntos evaluados. 155
Figura 3-90 Diferencia entre la recarga del escenario de referencia y el escenario RCP4.5. 159
Figura 3-91 Comparación de los niveles de agua subterránea simulados para cada una de las capas del modelo a lo largo del intervalo de tiempo de evaluación y para el escenario base (izquierda) y el RCP 4.5 (derecha) 161

Figura 3-92 Ubicación de los polígonos que delimitan las zonas en evaluación y factores de multiplicación para la recarga 162
Figura 3-93 Comparación entre la recarga del modelo de referencia i la del escenario de cambio de uso del suelo 163
Figura 3-94 Descenso de los niveles por el cambio de usos del suelo 164
Figura 3-95 Flujos de recarga y descarga a 25 metros de profundidad en el modelo estacionario de referencia y en el escenario de usos del suelo 164
Figura 3-96 Entradas y salidas de agua en la zona urbana y la Unidad A 166
Figura 3-97 Balance hídrico para la zona de expansión y la Unidad A 167
Figura 3-98 Localización de la red de monitoreo del DAGMA 170
Figura 3-99 Sistemas de flujo subterráneo básicos: local, intermedio y regional. Fuente: Alconada et al., 2008. 172
Figura 3-100 Recarga y descarga del acuífero a los 25 metros de profundidad 173
Figura 3-101 Zona de recarga prioritaria 175
Figura 3-102 Profundidad del agua subterránea – índices DRASTIC 181
Figura 3-103 Recarga difusa – índices DRASTIC 182
Figura 3-104 Mapa de suelos para Cali - Consociaciones 184
Figura 3-105 Suelos – índices DRASTIC 185
Figura 3-106 Topografía como pendientes en el terreno – índices DRASTIC 186
Figura 3-107 Materiales de la zona no saturada – índices DRASTIC 187
Figura 3-108 Conductividad hidráulica del acuífero – índices DRASTIC 188
Figura 3-109 Vulnerabilidad en el acuífero de Santiago de Cali 189
Figura 4-1 Proceso metodológico jornadas de diagnóstico. 192
Figura 4-2 Mapa de amenazas identificadas por los actores sociales 195
Figura 4-3 Puntos estratégicos para el recorrido. 198
Figura 4-4 Modelo de análisis FPEIR 199
Figura 4-5 Modelo de análisis Causa-Efecto-Impacto, basado en el modelo FPEIR. Elaboración propia 200
Figura 4-6 Diagrama causa-efecto-impacto para el tema Fortalecimiento Institucional y Gobernanza 201
Figura 4-7 Diagrama causa-efecto-impacto para el tema Reducción de la Contaminación .202
Figura 4-8 Diagrama causa-efecto-impacto para el tema Oferta y Demanda 202
Figura 4-9 Diagrama causa-efecto-impacto para el tema Generación de Conocimiento e Información para la Gestión Integral 203
Figura 4-10 Diagrama para el tema Oferta y Demanda 206
Figura 4-11 Diagrama para el tema Reducción de la Contaminación 207
Figura 4-12 Diagrama para el tema de Fortalecimiento Institucional y Gobernanza 208

Figura 4-13 Difusión en ADN del PMAA Zona urbana de Santiago de Cali 212
Figura 4-14 Collage de imágenes relacionadas con material publicitario entregado a los actores sociales en jornada diagnóstico 213
Figura 5-1 Profundidad de los niveles de agua subterránea en las zonas proyectadas para urbanizar 217
Figura 5-2 En verde aparecen las áreas con deforestación identificadas por los actores sociales 219
Figura 5-3 Ubicación de las estaciones de servicio sobre el mapa de recarga y descarga del acuífero 224
Figura 5-4 Ubicación de las estaciones de servicio sobre el mapa de vulnerabilidad del acuífero 225
Figura 5-5 Ubicación de las áreas de mejoramiento en el modelo. En amarillo se muestra el área de la comuna 22 que se identifica como área con letrinas y necesidad de mejoramiento. 226
Figura 5-6 Ubicación de las actividades mineras sobre el mapa de recarga y descarga a 25m de profundidad 229
Figura 5-7 Ubicación de los cementerios sobre el mapa de recarga y descarga a 25m de profundidad 230
Figura 5-8 Ubicación de los cementerios respecto a la vulnerabilidad intrínseca del acuífero 231
Figura 5-9 Ubicación del relleno clausurado de Navarro respecto a las zonas de recarga y de descarga a 25 metros de profundidad 232
Figura 6-1 Componentes de la formulación del PMAA 244
Figura 6-2 Etapas del desarrollo de la Visión 244
Figura 6-3 Grupo 1 - Desarrollo verde de Santiago de Cali. 247
Figura 6-4 Grupo 2 - Desarrollo de Santiago de Cali como un polo de servicios turísticos e innovación. 248
Figura 6-5 Grupo 2 - Enriquecimiento de Visión Desarrollo verde de Santiago de Cali. 249
Figura 6-6 Grupo 1 - Enriquecimiento de Visión Desarrollo de Santiago de Cali como un polo de servicios turísticos e innovación. 250
Figura 6-7 Imagen de la visión de la ciudad de Cali para el año 2050 252
Figura 6-8 Líneas estratégicas que forman parte del PMAA (en los vértices del triángulo), y objetivos destilados de la visión (en el centro del triángulo) 254
Figura 6-9 Líneas estratégicas y programas 255
Figura 9-1. Relación de las precipitaciones anuales con la elevación para las estaciones en la zona sur del Valle 328
Figura 9-2. Variograma de la precipitación promedio mensual en Abril 328
Figura 9-3 Ejemplo de un mapa de la precipitación diaria interpolada (mm/día). Se muestra el día 5 de septiembre de 2015. 329
Figura 9-4 Mapa de cobertura del suelo en la zona de estudio 333

Figura 9-5 Puntos de muestreo de la primera campaña.....340
Figura 9-6 Puntos de muestreo de las dos campañas.....341
Figura 9-7 Gráficos de hidrogeoquímica 345
Figura 9-8 Diagrama de Piper 346

Listado de Tablas

Tabla 3-1 Conductividades hidráulicas asignadas a cada clase litológica. Fuente: producción propia de acuerdo al conocimiento de expertos locales 77
Tabla 3-2 Puntos de agua subterránea por zonas 79
Tabla 3-3 Recarga promedio por zona 87
Tabla 3-4 Pérdidas totales y fugas de fondo para el período de modelación 89
Tabla 3-5 Recarga (mm) producto de las fugas de fondo en el sistema de acueducto 89
Tabla 3-6. Volumen anual concesionado por uso y actividad 94
Tabla 3-7. Volúmenes anuales de consumos de aguas subterráneas por uso 95
Tabla 3-8. Resolución de los insumos del modelo 115
Tabla 3-9. Conductividades hidráulicas (horizontal y vertical) asignadas a cada clase litológica para el cálculo de las conductividades para cada capa del modelo (fuente propia – tabla creada por expertos locales en hidrogeología) 117
Tabla 3-10. Coeficientes de almacenamiento 121
Tabla 3-11. Datos de volúmenes de bombeo para los diferentes períodos 127
Tabla 3-12 Número de registros por año según el uso 128
Tabla 3-13 Número de pozos por uso con registro completo durante los 12 meses de cada año 128
Tabla 3-14 Promedio de consumo de un pozo clasificado por uso 128
Tabla 3-15 Cambios realizados al modelo durante la calibración 131
Tabla 3-16 Diferencias en valores de recarga para el área del modelo entre el escenario climático y el escenario de referencia 158
Tabla 3-17 Resultados intermedios y factores finalmente calculados en el cálculo de la recarga es escenario de cambios de usos del suelo. 162
Tabla 3-18 IEAS por Cuenca utilizando la recarga por precipitación y por pérdidas de acueducto 168
Tabla 3-19 IEAS por Cuenca utilizando la recarga por precipitación 168
Tabla 3-20 IEAS para la zona urbana 169
Tabla 3-21 Volúmen máximo extraible 169
Tabla 3-22 Estadísticas de la recarga en los diferentes rangos de magnitud 174
Tabla 3-23 Estadísticas de la descarga en los diferentes rangos de magnitud 174
Tabla 3-24 Índices DRASTIC para la profundidad del agua subterránea 180
Tabla 3-25 Índices DRASTIC para la recarga difusa 181
Tabla 3-26 Índices DRASTIC para las litologías (zona saturada, zona no saturada y suelos) 183
Tabla 3-27 Índices DRASTIC para la topografía 185

Tabla 3-28 Índices DRASTIC para la conductividad hidráulica 187
Tabla 3-29 Factores de ponderación de los diferentes parámetros del método DRASTIC ..188
Tabla 4-1 Organigrama DAGMA 209
Tabla 4-2. Componentes del análisis FODA y principales estrategias 209
Tabla 4-3 Análisis Institucional FODA para DAGMA 210
Tabla 5-1 Relación entre el PMAA y el PORH y las potenciales oportunidades y conflictos 234
Tabla 5-2 Aplicación de escenarios a efectos e impactos para el tema de Oferta y Demanda 240
Tabla 5-3 Aplicación de escenarios a efectos e impactos para el tema de reducción de la contaminación 241
Tabla 5-4 Aplicación de escenarios a efectos e impactos para el tema de Fortalecimiento Institucional y Gobernanza 242
Tabla 6-1 Artículos del POT Cali 2014 relevantes para el PMAA 298
Tabla 6-2 Artículos del POT relevantes para proyectos específicos del PMAA. 300
Tabla 6-3 Relaciones temáticas entre el POT Cali y el PMAA 301
Tabla 6-4 Proyecto estratégicos del POT relacionados con proyectos del PMAA. 302
Tabla 6-5 Programas Dotacionales Estructurales desde el Sistema Ambiental del POT relacionados con Proyectos del PMAA. 302
Tabla 6-6 Proyectos Sectoriales del POT relacionados con Proyectos del PMAA. 303
Tabla 6-7 Articulación del PMACC con el PMAA 306
Tabla 6-8 Relaciones entre proyectos del PMAA Cali y PMAA Valle 307
Tabla 9-1. Estaciones con datos de temperatura.....330
Tabla 9-2 Grupo hidrológico en función de la textura del suelo y pendiente 334
Tabla 9-3 Número de curva en función de la cobertura del suelo y el grupo hidrológico.....334
Tabla 9-4 Puntos de muestreo 339
Tabla 9-5 Resultados del monitoreo y análisis – Parte 1 342
Tabla 9-6 Resultados del monitoreo y análisis – Parte 2 343

Lista de abreviaturas

DAGMA: Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente de la Alcaldía de Santiago de Cali en el Valle del Cauca
CVC: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios
INGEOMINAS: Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear
SGC: Servicio Geológico Colombiano
MAVDT: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
MADS: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

DNP: Departamento Nacional de Planeación
DAPM: Departamento Administrativo de Planeación Municipal
EMCALI: Empresas Municipales de Cali
ACODAL: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
SAF: Sistemas Agroforestales LTDA
IDESC: Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali
ENA: Estudio Nacional del Agua
PNGIRH: Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico
PNASUB: Programa Nacional de Aguas Subterránea
POMCA: Plan de Ordenamiento y Manejo de una Cuenca Hidrográfica
PORH: Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico
PMAA: Plan de Manejo Ambiental de Acuífero
POT: Plan de Ordenamiento Territorial
PD: Plan de Desarrollo Municipal
PSMV: Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
SIRH: Sistema de Información del Recurso Hídrico
FUNIAS: Formulario Único Nacional del Agua Subterránea
SZH: Subzonas Hidrográficas
MZSC: Microzonificación Sísmica para Santiago de Cali
GDB: Geodatabase – Base de datos georreferenciada

1 Introducción

La ciudad de Santiago de Cali pretende desarrollarse como ciudad verde, emprendedora, social e innovadora, como 'Capital verde del Pacifico'. La disponibilidad de recursos naturales y, específicamente, recursos hídricos, es clave para ser esa ciudad, literalmente su fuente de vida. La autoridad ambiental de la región metropolitana de Cali, el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA), es responsable de la conservación y el manejo de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en coordinación con otros departamentos de la administración de la ciudad y la autoridad ambiental del Valle de Cauca: la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

El Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA) hace parte de la Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH), definida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MAVDT, 2010). El objetivo de la PNGIRH es orientar la planificación, administración, seguimiento y monitoreo del recurso hídrico a nivel nacional. La PNGIRH se encuentra enmarcada en el concepto de gestión integrada del recurso hídrico, exigiendo que se tenga en cuenta la interacción del recurso hídrico con los demás recursos naturales renovables interdependientes. En las líneas de acción de la PNGIRH se establecen las directrices para la Formulación del Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB). Es en el PNASUB que se plantean las acciones y estrategias en los niveles (nacional y regional) para la gestión y evaluación integrada de las aguas subterráneas en Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Para el manejo y aprovechamiento de las aguas subterráneas, el PNASUB establece la formulación e implementación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAAs), que se encuadran legalmente en el Decreto 1640 de 2012 y el Decreto 1076 de 2015. Por medio de estos decretos se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hídricas y acuíferos y se definen las responsabilidades de los organismos principales.

Específicamente, para formular el PMAA, se ha seguido la metodología establecida por el Ministerio de Medio Ambiente en 2014, en la Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (MADS, 2014). En ella, se distinguen 3 fases principales para formular un PMAA (MADS, 2014):

- El aprestamiento, fase en la cual se conforma el equipo técnico necesario para realizar y acompañar la formulación e implementación del plan. Se definen en el aprestamiento: el plan de trabajo, la estrategia de socialización y participación y la logística requerida.

- El diagnóstico, fase en la cual se elabora o actualiza la línea base de oferta y demanda de agua subterránea, se identifican los conflictos y problemáticas, se realizan el análisis de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación y la identificación y análisis de riesgos de las fuentes potenciales de contaminación, entre otros aspectos.

- La formulación, fase en la cual se definen las medidas a implementar y los proyectos y actividades a ejecutar, con el fin de solucionar la problemática identificada en el diagnóstico, estableciendo el cronograma de ejecución, los costos y responsables.

Las razones más importantes para el DAGMA para formular este PMAA son:

- Promover la sostenibilidad del recurso hídrico para sostener los servicios ecosistémicos por medio de una gestión integral del recurso hídrico y del suelo, en buena articulación con otros planes de gestión territorial y de cuencas
- Fortalecer las alianzas con el sector público, la academia, el sector privado y las organizaciones ambientales para una mejor gestión
- Fortalecer la capacidad del DAGMA de actuar como autoridad competente, facilitar la cooperación entre entidades territoriales y la resolución de conflictos entre usos y usuarios
- Entender en profundidad el sistema de acuíferos para una gestión mejor de calidad y cantidad

En resumen, la meta principal es “Garantizar la sostenibilidad de las aguas subterráneas en el territorio metropolitano de Cali”.

Este documento

En este documento se detallan todas las actividades realizadas dentro de las tres fases del PMAA.

1.1 Área de estudio

El PMAA se centra en el acuífero de la zona urbana del municipio de Santiago de Cali, el cual hace parte del sistema acuífero Valle del Cauca (M3.1) localizado en la zona plana del valle geográfico del río Cauca. La extensión del acuífero del municipio de Santiago de Cali es de 212 km^2.

El acuífero en la zona urbana de Santiago de Cali está influenciado por las interacciones con los siete ríos del municipio: Cauca, Cali, Aguacatal, Lili, Meléndez, Cañaveralejo y Pance. Además, está influenciado también por los ríos Arroyohondo hacia el norte de la ciudad y el río Jamundí hacia el sur. Para el diagnóstico de las aguas subterráneas en el Municipio se definió el área de estudio teniendo en cuenta los diferentes límites hidrográficos y geológicos que influencian el acuífero (Figura 1-1): al norte el río Arroyohondo en el municipio de Yumbo; al sur el río Jamundí, que coincide con límite del municipio; al este se definió un área de influencia de 3 km hacia el este del río Cauca; y al oeste las formaciones rocosas de la cordillera occidental que bordean la cuenca sedimentaria y cuyo límite está definido por la microzonificación sísmica (INGEOMINAS, 2005).

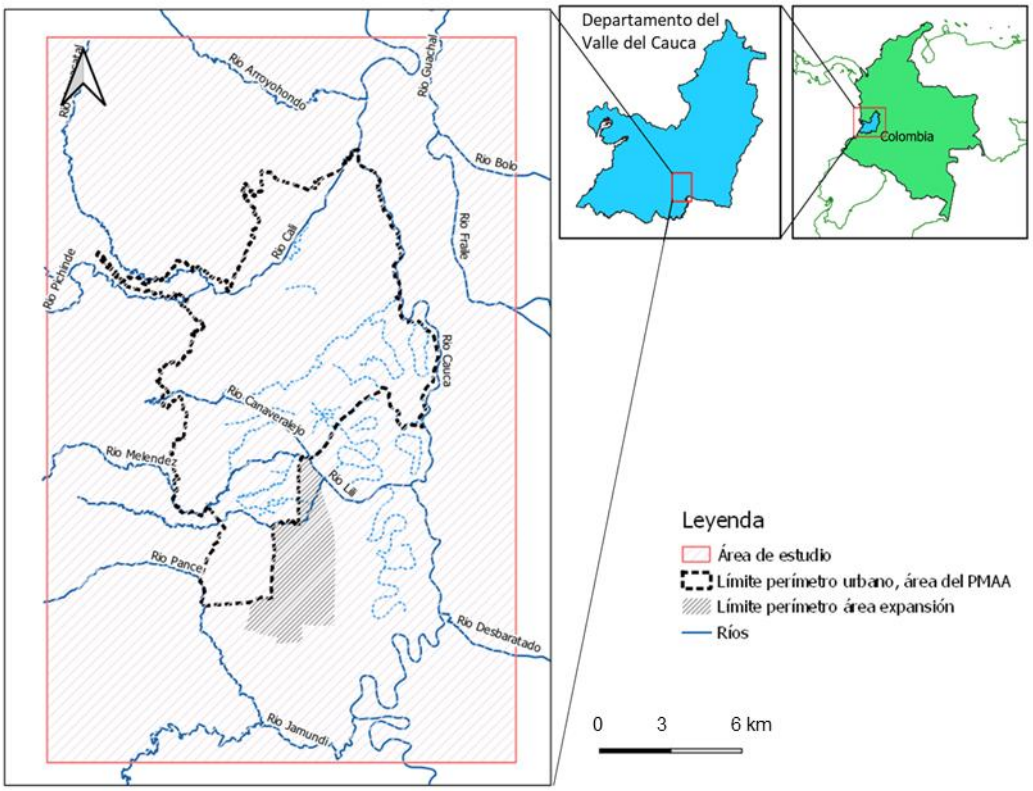


Figura 1-1. Localización del área de estudio.

1.2 Descripción General del municipio de Santiago Cali

Santiago de Cali es la capital del departamento del Valle del Cauca. Está situada entre la cordillera occidental y la cordillera central de la Región Andina. La ciudad, más conocida como Cali, fue fundada por Sebastián de Belalcázar en 1536 y aunque es una de las ciudades más antiguas de América, solamente hasta la década de 1930 se aceleró su desarrollo para convertirse en uno de los principales centros económicos e industriales del país y el principal centro urbano, cultural, económico, industrial y agrario del suroccidente colombiano; forman parte del Área Metropolitana de Cali de acuerdo a Ley 1625 de 2013 - Ley de Áreas Metropolitanas, junto con los municipios aledaños a ésta: Yumbo, Jamundí, Candelaria y Palmira. Cali tiene una población de 2.445.405 habitantes (según las proyecciones de la Alcaldía de Santiago de Cali, 2015), es una ciudad multicultural que por ser la capital del departamento del Valle del Cauca recibe pobladores de los departamentos de todo el suroccidente colombiano.

1.2.1 Aspecto político-administrativos

Cali se rige por un sistema democrático basado en los procesos de descentralización administrativa generados a partir de la Constitución Política de Colombia de 1991, donde el poder ejecutivo está en cabeza del Alcalde y el poder legislativo se rige por el Consejo Municipal. La ciudad de Santiago de Cali cuenta con 22 comunas, 249 barrios aprobados y 91 urbanizaciones. La zona rural se divide en 15 corregimientos, que a su vez se dividen en veredas. La zona rural tiene una extensión de 43.717,75 Ha donde habitan 36.621 personas,

según las proyecciones de por el Departamento Administrativo de Planeación Municipal (DAPM) (Alcaldía Santiago de Cali, 2015)

1.2.2 Aspectos sociales

La población del municipio de Santiago de Cali es el 4.9% de la población del país. El DAPM realizó la caracterización de la población al año 2016, la cual incluye cuatro (4) variables que describen la población por rango de edades: de 0 a 14 años, el 22%; de 15 a 24 años, el 16.9%; de 25 a 65, el 52.2% y de 65 años en adelante, el 8.4% (Figura 1-2) (Alcaldía de Santiago de Cali, 2018). El Departamento Nacional de Planeación (DNP) indicó que para 2017 la distribución por género en la ciudad es de 1.156.839 hombres (cifra que corresponde al 47.8 % de la población), y 1.263. 275 mujeres (cifra que corresponde al 52.2% de la población).

Figura 1-2 Población municipal de Santiago de Cali – estimación a 2016 Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Municipal

Referente al acceso de servicios públicos, los últimos datos de las Empresas Municipales de Cali (EMCALI) reportan tasas de cobertura de 99% y 94% en 2010 y 2009. La Encuesta de Cali Cómo Vamos 2014 (https://www.calicomovamos.org.co/servicios-pblicos) reportó un 100% en ambos servicios para el área urbana. Por otro lado, en el sector rural la cobertura de agua potable a 2014 es de 77% y la cobertura de remoción de aguas residuales es del 32%. La cobertura de energía eléctrica para el 2014 bajó de 97% a 96%, la cobertura residencial y la telefonía fija de EMCALI también se redujo en (de 58% a 53% en la ciudad). Aseo y recolección de residuos tienen 100% de cobertura, mientras gas domiciliario reporta el 85%. En el informe Cali como Vamos del 2014 se indica que la penetración de internet es del 15% en Cali.

En cuanto a la oferta institucional, la ciudad es uno de los principales centros económicos e industriales de Colombia, además de ser el principal centro urbano, cultural, económico, industrial y agrario del suroccidente del país y el tercero a nivel nacional. Como capital departamental, alberga las sedes de la Gobernación del Valle del Cauca, la Asamblea Departamental, el Tribunal Departamental, la Fiscalía General, instituciones y organismos del Estado, y también es la sede de empresas oficiales como EMCALI. Administrativamente, la Alcaldía de Cali se divide en dos grandes grupos: la administración central y las entidades

descentralizadas. Se entiende por Administración Central, el conjunto de entidades que dependen directamente del alcalde.

1.2.3 Aspectos económicos

No existen datos oficiales de crecimiento económico, medido a través del Producto Interno Bruto (PIB), a nivel de municipio; los datos existentes son a nivel departamental y nacional. De acuerdo con cifras preliminares del DANE, en 2016 la economía del Valle del Cauca creció 2,7% frente a 2015. Se destaca que, por tercer año consecutivo, el crecimiento de la economía del Valle del Cauca supera el registro de Colombia.

De acuerdo con la Cámara de Comercio de Cali, en 2016 (Cámara de Comercio de Cali , 2017) se registraron en Cali 7813 empresas, cifra 15,9% superior respecto al número de empresas creadas en 2015. Los sectores económicos de comercio, servicios e industria manufacturera concentraron el 83,1% de las empresas creadas en Cali en 2016. En el período enero-mayo de 2017, la dinámica empresarial en Cali se incrementó frente a 2016. Concretamente, de acuerdo con la Cámara de Comercio de Cali, en el período señalado se crearon 8557 empresas en la ciudad, cifra 9,5% superior a la registrada en el mismo período de 2016 (Figura 1-3).

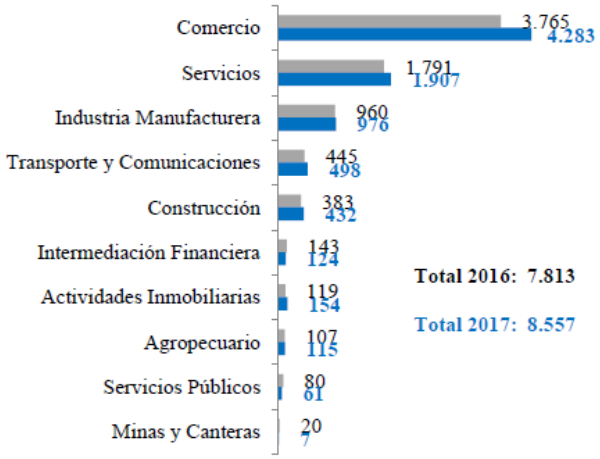


Figura 1-3 Número de empresas creadas en Cali, según sector económico (Enero –Mayo 2016 2017). Fuente: Cali como vamos. 2017

1.3 Antecedentes en el estudio y gestión del agua subterránea en el Municipio de Santiago de Cali

Desde los años cuarenta las aguas subterráneas se están aprovechando para su uso en la ciudad de Santiago de Cali. Desde el inicio, el uso más relevante en cuanto a las magnitudes de los caudales de extracción de las aguas subterráneas ha sido la industria. Los primeros pozos, construidos por EMCALI en el año 1960, quedaron inactivos una vez la Planta de Puerto Mallarino entró a funcionar. A partir del año 1991 EMCALI proyectó la perforación de 13 pozos profundos, de los cuales se construyeron 5. Desde los años noventa ha aumentado la construcción de pequeños pozos tipo aljibes para varios servicios, como por ejemplo el lavado de vehículos (ACODAL & DAGMA, 1998).

La gestión del recurso subterráneo desde el año 1968 hasta el año 1995 fue realizada por la CVC, entidad que tuvo el manejo exclusivo del recurso. Entre los años 1995 y 2002 el manejo

se hizo en convenio entre CVC y DAGMA, siendo en el año 1999 cuando se realizó desde el DAGMA el primer otorgamiento de una concesión para el uso del agua subterránea por medio de una resolución. Desde 2003, sólo el DAGMA maneja las aguas subterráneas, realiza el inventario de puntos de agua, emite conceptos técnicos para la construcción de pozos, elabora resoluciones de concesión de aprovechamiento, brinda asesoría técnica, y realiza estudios hidrogeológicos (Garcia & Molano, 2015).

En el año 2010 se inició la construcción de la Red local de Monitoreo de Aguas Subterráneas para determinar la calidad del agua en la unidad hidrogeológica A y el seguimiento a la fluctuación de los niveles (Garcia & Molano, 2015).

En cuanto a las normativas relacionadas con las aguas subterráneas en la ciudad, en el año 2003, el DAGMA elabora y publica la resolución 001 de 2003 que reglamenta el uso de las aguas subterráneas para la zona urbana del Municipio de Santiago de Cali. Se han reglamentado también el cobro de las aguas subterráneas por medio de la denominada Tasa por Uso de Agua - TUA (Resoluciones anuales), la obligatoriedad de instalación de medidores de agua subterránea (Resolución 4133.0.21.535 de diciembre de 2010), especificaciones técnicas de medidores (Resolución 4133.0.21.120 de 2013) y los términos de referencia para la formulación de programas de uso eficiente y ahorro de agua – PUEAA (Resolución 4133.0.21.1200 de 2014).

2 Etapa de Aprestamiento

2.1 Coordinación institucional

El DAGMA (Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente de la Alcaldía de Santiago de Cali), como parte de sus responsabilidades como Autoridad Ambiental Urbana de la ciudad de Santiago de Cali y dando respuesta al Decreto único reglamentario 1076 de 2015, trabajó en la elaboración del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero (PMAA) bajo la zona urbana de Cali, que forma parte del sistema acuífero Valle del Cauca (M3.1).

CVC y Deltares firmaron en el año 2017 el convenio especial de cooperación número 218 de 2017 con el objeto de “Aunar esfuerzos técnicos y económicos para la elaboración del Plan de Manejo Ambiental del sistema acuífero del Valle del Cauca para la zona urbana de Santiago de Cali”.

Por tanto, las fases del PMAA para la zona urbana de Santiago de Cali se desarrollaron en conjunto entre el DAGMA, la CVC y Deltares, aunando esfuerzos, conocimientos técnicos y del contexto del área de estudio. El DAGMA, por ser la autoridad ambiental en la zona urbana de Santiago de Cali, cuenta con el conocimiento de la ciudad, de los usuarios del agua, de las dinámicas y principales problemáticas, y posee también el conocimiento técnico referente a aguas subterráneas desarrollado en los últimos años para la ciudad. La CVC, como autoridad ambiental para el Departamento del Valle del Cauca y por su experiencia de alrededor de 50 años en el estudio y gestión de aguas subterráneas, cuenta con el conocimiento del sistema acuífero regional. El área de estudio fue administrada por la CVC hasta el año 1998, cuando se realizó el traslado de expedientes de puntos agua subterránea al DAGMA. Por su parte, Deltares cuenta con un amplio conocimiento técnico en estudios hidrológicos, particularmente en aguas subterráneas, estando a la vanguardia en el análisis de los diferentes temas que conforman el estudio hidrogeológico y con experiencias con autoridades ambientales en Holanda y otras regiones del mundo.

Una vez conformado el grupo para liderar el desarrollo del PMAA, el proceso de coordinación institucional consistió en identificar las instituciones y grupos con los cuales se coordinaron acciones para el éxito de la formulación del PMAA. A continuación, se presenta la coordinación realizada con los diferentes grupos dentro del DAGMA y también con otras entidades claves para la formulación del plan.

2.1.1 Coordinación con grupos interdisciplinarios en el DAGMA

El Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) de la ciudad de Cali cuenta con grupos enfocados en tres áreas: Gestión de Calidad Ambiental, Gestión Integrada de Ecosistemas y UMATA, y Unidad de Apoyo a la Gestión. Desde el PMAA se realizó el acercamiento con los grupos relacionados con las aguas subterráneas en su gestión o que contaran con información importante para el análisis hidrogeológico del acuífero en la zona urbana de Cali.

Gestión de Calidad Ambiental:

El Grupo de Gestión del Recurso Hídrico lidera desde el DAGMA la formulación del PMAA para la zona Urbana de Santiago de Cali, es el encargado de la administración, vigilancia y control del recurso hídrico bajo el criterio de gestión integral para propender por la calidad del agua. En el grupo existe información relacionada con los recursos hídricos superficiales y subterráneos, principal fuente de información para el diagnóstico de las aguas subterráneas en la ciudad.

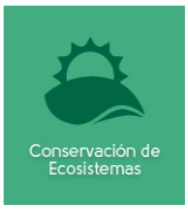
El Grupo de Gestión de Calidad del Aire tiene dentro de sus funciones monitorear, analizar y reportar permanentemente el comportamiento de contaminantes atmosféricos y meteorología a través de la administración del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de Santiago de Cali – SVCASC. El grupo cuenta con una red de 9 estaciones para el monitoreo de calidad del aire que recolectan también información de temperatura.

El Laboratorio ambiental del DAGMA tiene como propósito generar información que permita la evaluación y control oportuno de la contaminación ambiental, facilitando la ejecución de acciones, apoyando la toma de decisiones y brindando información confiable a la comunidad. En el laboratorio se llevan a cabo los análisis de aguas superficiales y aguas subterráneas de la entidad, entre ellos la caracterización de la calidad del agua en los humedales.

En el grupo de Gestión Urbanística Ambiental se implementan las estrategias de gestión, control y seguimiento a los proyectos urbanísticos y de infraestructura que se desarrollen en el perímetro urbano de Santiago de Cali, con el fin de mejorar el cumplimiento de las normas ambientales, fortaleciendo así la construcción sostenible en la ciudad. El grupo cuenta con estudios de suelos de los proyectos de infraestructura en zonas de ladera del área urbana de la ciudad, las cuales poseen poca información de suelos cuya fuente principal son los perfiles litológicos de los pozos.

El grupo de Gestión Ambiental Empresarial tiene dentro de sus objetivos, formular y ejecutar acciones que permitan prevenir, controlar y reducir los niveles de contaminación e impactos ambientales que generan las actividades económicas del sector industrial, comercial y de servicios que se desarrollan en la ciudad de Cali, con el fin de revertir los efectos del deterioro y la contaminación sobre la calidad de vida y el ambiente de la ciudad. El grupo cuenta con información y proyectos de estudio del sector empresarial con actividades potencialmente contaminantes para el medio ambiente.

Gestión Integral de Ecosistemas y UMATA



Mediante el grupo se coordinan y ejecutan acciones de restauración, protección, conservación y monitoreo de los ecosistemas del Municipio de Santiago de Cali. El grupo cuenta con información de cartografía base de la red hídrica de la ciudad, así como también con el análisis de inventario de humedales de la ciudad y los planes de manejo para algunos de ellos.

Unidad de Apoyo a la Gestión

Educación Ambiental tiene como objetivo principal fortalecer la construcción de una cultura ambiental a través de procesos de educación y formación, dirigidos a los distintos sectores poblacionales del Municipio de Santiago de Cali. Con el grupo se ha avanzado en la coordinación para la inclusión de actores relevantes para el proceso de formulación del PMAA.

2.1.2 Coordinación con otras entidades

Existen también otras entidades que por su labor, son de gran importancia para el éxito de la formulación del PMAA.

- Servicio Geológico Colombiano – SGC: Esta institución tiene dentro de sus funciones la investigación científica de conocimiento geocientífico, investigaciones del subsuelo, y caracterización de materiales geológicos. Dentro de los estudios claves para la formulación del plan se encuentra la Microzonificación Sísmica para Santiago de Cali del año 2002, estudio realizado entre el DAGMA y el SGC, entonces INGEOMINAS. Además de éstos, el SGC ha provisto información sobre otros estudios geológicos realizados en el municipio.

- Empresas Municipales de Cali – EMCALI: Teniendo en cuenta el importante rol de EMCALI EICE ESP como empresa prestadora de servicios de acueducto y alcantarillado para la zona urbana del municipio de Santiago de Cali, así como también su relación con los recursos hídricos, se adelantaron acciones para avanzar en la coordinación institucional con la entidad considerando que es un aliado estratégico para el desarrollo del plan, y contar con información que permita afinar los análisis que se estarán realizando. En conjunto con la entidad es posible mejorar el análisis técnico

de las aguas subterráneas en la ciudad al incluir información de los sistemas de acueducto y alcantarillado que tienen una alta relación con el recurso. Así mismo, los resultados del PMAA servirán como insumo para la futura planeación y gestión de los servicios en la ciudad.

- Universidad del Valle – Instituto Cinara: El instituto CINARA realiza investigaciones en torno a los recursos hídricos en la región, entre ellos se han adelantado estudios de análisis de disponibilidad de agua para Santiago de Cali mediante el sistema de lechos filtrantes. Parte de los estudios realizados en colaboración con el instituto es el manejo de aguas urbanas para la ciudad de Santiago de Cali, realizado dentro del marco del proyecto SWITCH (Sustainable Water Improves Tomorrow's Cities Health) (CINARA & UNIVALLE, 2008). También en el instituto se realizó el análisis del sector empresarial de Santiago de Cali donde uno de los enfoques son las estaciones de servicio. En conjunto con la entidad es posible incluir dichos avances en el diagnóstico del PMAA y generar un panorama, incluyendo investigaciones relevantes relacionadas con las aguas subterráneas en el municipio.

2.2 Sistema de información del PMAA

El sistema de información del PMAA se construyó a partir de la información que se recopiló en las diferentes fases del plan de manejo, e incluye información existente al momento del inicio de la formulación del PMAA y la información generada durante el desarrollo del PMAA. El sistema de información consiste en un sistema de información geográfico (un SIG) y de una base de datos organizada en carpetas con los archivos usados para el PMAA y generados durante el PMAA. El sistema de información del PMAA se encuentra organizado en el Anexo digital "Sistema de información del PMAA Cali", en el mismo Anexo se encuentra una descripción de la estructura del sistema de información geográfica.

En cuanto a la información previa existente, el sistema de información se alimentó principalmente de los Sistemas de Información Geográfico Corporativo IDESC (Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali) administrado por la Alcaldía de Cali, la información alfanumérica del recurso hídrico subterráneo generada por el DAGMA, el Sistema de Información Geográfico Corporativo GeoCVC administrado por la CVC, entre otra información producida por las entidades externas tales como Servicio Geológico Colombiano, IDEAM, etc.

La organización de la información del sistema de información geográfico se realizó de acuerdo con los lineamientos planteados en la guía de formulación del PMAA y los lineamientos de políticas y estándares definidos por la Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali.

La escala de trabajo del presente PMAA se ha basado en la escala de la información geológica disponible, ya que la geología es el determinante de la geometría y de las propiedades hidráulicas del sistema acuífero. Así, la escala de trabajo a la que se apuntó fue de 1:20.000, que es la escala del mapa geológico utilizado (ver sección 3.2.1.7).

2.3 Recopilación y análisis de información secundaria

El DAGMA ha trabajado recolectando información relacionada con las aguas subterráneas por casi 20 años. Por otro lado, la CVC cuenta con experiencia e información en el tema de aguas subterráneas en el Valle geográfico del río Cauca desde hace casi 50 años. La información usada en el desarrollo del PMAA la recopilaron ambas entidades, quienes también han

realizado estudios que están disponibles para proyectos como la formulación del PMAA. Además de la información presente en los grupos de Recursos Hídricos del DAGMA y de la CVC, se recopiló información de otros grupos y de otras entidades de interés para el proyecto. Entre la información utilizada para la formulación del PMAA, se destacan los datos hidrológicos, meteorológicos, geológicos, demográficos e hidrogeológicos que fueron necesarios para llevar a cabo el diagnóstico de la situación actual del acuífero y la formulación de proyectos.

2.3.1 Informes y estudios existentes de relevancia para el PMAA

Los informes y estudios recopilados para desarrollar el proyecto se presentan en los siguientes grupos temáticos:

Geología, geofísica y geomorfología:

- Microzonificación Sísmica para Santiago de Cali (INGEOMINAS & DAGMA, 2005)
- Mapa Geológico departamento del Valle del Cauca (INGEOMINAS, 2001)
- Análisis de deformación tectónica en el piedemonte de las cordilleras central y occidental Valle del Cauca, Colombia – Contribuciones Paleosísmicas.(López Cardona, 2006)
- Inventario de procesos morfodinámicos del sector de los cerros de Cali (INGEOMINAS, 2003)
- Estudios geológicos en la región de Jamundí entre los ríos Guachinte y Jordán (Keizer, 1954)
- Mapa contornos de isomadurez en las formaciones Guachinte y Ferreira (Marío García, 1995a)
- Mapa estructural al tope del Oligoceno y localización de prospectos de gas asociados a mantos de carbón de las formaciones Guachinte y Ferreira (Marío García, 1995b)

Hidrogeología, balance hídrico del acuífero, niveles y calidad del agua subterránea:

- Estudio de Aguas Subterráneas en el municipio de Santiago de Cali (ACODAL & DAGMA, 1998)
- Estudio cantidad y calidad de acuíferos en el área urbana de Santiago de Cali (SAF & DAGMA, 2000)
- Evaluación de los niveles potenciométricos en el acuífero de Cali (Universidad Tecnológica de Berlín & OSSO - Univalle, 2000)
- Balance Hídrico de las Aguas Subterráneas – Municipio Santiago de Cali (García, 2010)
- Informe de calidad y niveles de la red de piezómetros municipio Santiago de Cali (Garcia & Molano, 2015)
- Informe técnico del laboratorio ambiental del DAGMA - Red piezométrica (DAGMA, 2017a)

Caracterización de cuerpos de aguas superficiales:

- Caracterización del río Cauca tramo Salvajina – La Virginia (CVC & Univalle, 2000)

- Informes de caracterización de aguas e índice de calidad de los ríos Aguacatal, Cali, Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Pance (DAGMA, 2011, 2012b, 2013a, 2013b, 2015, 2016a, 2016b, 2017a, 2017b).
- Identificación de vertimientos puntuales y tomas de agua en los cauces de los ríos Meléndez, Cañaveralejo y quebradas afluentes en el perímetro urbano del municipio de Santiago de Cali (ACODAL, UNIVALLE, CVC, & DAGMA, 2004)
- Informe de caracterización de los humedales en la ciudad de Cali (DAGMA, 2010, 2011, 2012a, 2013a, 2013b)
- Informe de caracterización humedal Las Garzas (DAGMA, 2011b).
- Diagnóstico de los impactos de las escorrentías naturales y artificiales en la comuna 22 (ICESI & DAGMA, 2010)
- Diseño de la mejor alternativa de intervención para contribuir al mejoramiento ambiental del Humedal Charco Azul CONVENIO 012 DE 2016, DAGMA-UNIVALLE
- Estudios hidrológicos en la Fase I, para la reglamentación de las corrientes hídricas en la comuna 22, quebrada, derivaciones, subderivaciones 4, 5 y 6 del río Pance, área del municipio de Santiago de Cali (JAM Ingeniería y Medio Ambiente, 2017)
- Plan de Manejo Ambiental Laguna Charco Azul (Fundacion Oiko & CVC, 2010)
- Plan de manejo ambiental integral Humedal Cañasgordas (DAGMA, 2006)
- Plan de manejo ambiental Humedal Urbano Lago de Los Cisnes – Babilla (DAGMA, 2005a)
- Plan de manejo ambiental Humedal Urbano Lago de Los Cisnes – Garzas (DAGMA, 2005b)
- Plan de manejo ambiental para el humedal urbano Lago Panamericano ubicado en la ciudad de Santiago de Cali (Carmona & Muñoz, 2004)
- Plan de manejo ambiental Relicto Boscoso Zanjón del Burro (DAGMA & Fundación Río Cauca, 2006)
- Plan de manejo ambiental humedal Navarro, Municipio de Santiago de Cali (CVC & Ambiental, 2006)
- Plan de manejo ambiental Río Meléndez (DAGMA & Fundación Río Cauca, 2007)
- Plan de recuperación el humedal "Antiguo cauce del río Meléndez" ubicado en el municipio de Santiago de Cali (CVC & Muñoz, 2007)
- Plan de manejo ambiental humedal Marañón, El Hormiguero, Cali (Contreras, 2006)

Perdidas de acueducto y alcantarillado – recarga "urbana" al acuífero:

- Evaluación de la amenaza asociada a las condiciones geotécnicas que causan daños a la red de acueducto de EMCALI, Santiago de Cali (Erazo, 2017)
- Informes de gestión EMCALI (EMCALI, 2013, 2014, 2015, 2016a)
- Programa de uso eficiente y ahorro del agua PUEAA (EMCALI, 2017)
- Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos – PSMV 2016-2030. (EMCALI, 2016b)

Otros estudios: geotécnicos, estabilidad de diques, modelación hidráulica del Río Cauca:

- Diagnóstico del estado actual de los diques en el distrito de Aguablanca (Fundación Pacífico Verde, 2010)

- Estudio de amenaza por inundación del área con régimen diferido de Navarro y su entorno, de vulnerabilidad y de estado de las obras de mitigación existentes (Hidro-Occidente, 2005)
- Estudio de Susceptibilidad y Mitigación del Fenómeno de Corrimiento Lateral en la margen izquierda del río Cauca (Consorcio jarillones y dragados 2011, 2012)
- Exploración geotécnica para reforzamiento Jarillón río Cauca Santiago de Cali (Amezquita Naranjo Ingeniería & CIA S.C.A, 2008)
- Complemento estudios de licuación para Santiago de Cali y áreas de influencia (CI Ambiental, 2011)
- Informe de análisis del sector empresarial de Cali (CINARA, CVC, & DAGMA, 2018)
- Mapas de la modelación de amenaza por inundaciones en la ciudad de Cali por el río Cauca y sus tributarios (Hidro-Occidente, 2012)

2.3.2 Datos recopilados sobre el sistema hidrogeológico de Cali

Los informes de diferentes temáticas presentados anteriormente fueron un insumo clave para alimentar el diagnóstico del sistema hidrogeológico en Cali. Además de estos, se recopilaron datos relacionados con el sistema acuífero en la ciudad que permitieron posteriormente alimentar el análisis. Estos datos fueron recopilados principalmente de las bases de datos del DAGMA en primera instancia, y se complementaron con los datos que hacen parte de la jurisdicción de la CVC en el área de estudio.

Cabe resaltar que una de las principales actividades realizadas fue la digitalización de la información técnica y de concesiones relevante contenida en los expedientes de puntos de agua subterráneas presentes en el archivo del Grupo Gestión del Recurso Hídrico del DAGMA. A partir de 699 expedientes de puntos de aguas subterráneas se digitalizó: información relacionada con la concesión otorgada al usuario, tanto técnica como administrativa; análisis de calidad de aguas subterráneas; columnas litológicas y perfiles de diseño de los pozos.

La organización de la información se realizó en las plantillas del Sistema de Información del Recurso Hídrico – SIRH de acuerdo a las indicaciones de la guía metodológica para formulación de PMAAs. El SIRH es el sistema nacional para la organización de información del recurso hídrico de acuerdo al decreto 303 del 2002. La información se digitalizó en las siguientes plantillas del SIRH, que están relacionadas con la gestión de la información de las aguas subterráneas:

- Formulario Único Nacional de Aguas Subterráneas – FUNIAS: Registro de información de los puntos de agua subterránea
- Registro de Concesiones – Vertimientos: Registro de información de usuarios y concesiones
- Registro de Unidades - Puntos Monitoreo – Mediciones: Registro de información de puntos de monitoreo y de análisis hidroquímicos al agua subterránea

A continuación, se presentan los datos e información recopilados agrupados por temáticas:

Cartografía base:

- Modelos digitales de elevación
- Red hídrica y de humedales
- Inventario de humedales
- Usos del suelo
- Censo arbóreo en Santiago de Cali

Hidrología e hidrometeorología:

- Datos hidrometeorológicos de estaciones climatológicas, pluviométricas y pluviográficas
- Datos de precipitación y de temperatura de la red de monitoreo de la calidad del aire del DAGMA

Litología:

- Columnas litológicas de pozos
- Columnas litológicas de estudios de suelos de obras de infraestructura
- Estudio de suelo preliminar macroproyecto Eco-ciudad Navarro

Captaciones de aguas subterráneas:

- Inventario de puntos de agua subterránea
- Consumos de aguas subterráneas
- Perfiles de diseño de los pozos

Niveles de aguas subterráneas:

- Concesiones de agua subterránea DAGMA
- Red de monitoreo DAGMA
- Concesiones de agua subterránea CVC
- Informes previos de hidrogeología en Cali (ACODAL & DAGMA, 1998), (SAF & DAGMA, 2000)

El detalle de la información recopilada, los procesos llevados a cabo para la digitalización y organización de la información, los resultados de la información organizada en las plantillas del SIRH y de los diferentes productos generados en el marco del PMAA como escaneo y digitalización de información de expedientes de agua subterránea se puede encontrar en el Anexo 1.

Cabe destacar que este proceso fue complejo, ya que la información no se encontraba unificada en cuanto a temáticas, formatos y ubicación.

Se recomienda seguir con el mismo sistema de digitalización y de organización de la información iniciado en el PMAA, actualizando las fichas entregadas, unificando formatos y sistematizando la información para así ir alimentando y tener actualizado el SIRH.

Durante la recopilación de información, se identificó la necesidad de recolectar información primaria que permitiera analizar la dinámica de las aguas subterráneas a lo largo del año, con una escala temporal más detallada a la existente actualmente, además de información que permitiera estimar el flujo de recarga proveniente de las formaciones rocosas:

- Con el fin de analizar la dinámica de las aguas subterráneas en las diferentes unidades hidrogeológicas en la ciudad, se recomienda la instalación de sensores de medición de niveles con frecuencia diaria. Estas mediciones deben representar las principales zonas hidrogeológicas en la ciudad y de interés para los proyectos del PMAA: zona de recarga, zona de descarga, evaluación de la interacción aguas subterráneas-aguas superficiales y área que reciba recarga proveniente del flujo de las formaciones rocosas, con principal interés en la formación Guachinte por su dimensión y ubicación.

- Con el fin de estimar la recarga proveniente de las rocas se recomienda realizar estudios hidroquímicos e isotópicos. En la formulación del PMAA se realizó un estudio inicial, y se proponen algunas recomendaciones (Anexo 3).

2.4 Identificación de actores y sectores claves

La guía metodológica para la formulación de los PMAA, plantea que los procesos de investigación participativa parten de la identificación de actores y sectores claves con su respectiva clasificación y categorización, con el propósito de definir las estrategias de participación y comunicación que serán implementadas durante el desarrollo de las fases siguientes del proceso. Por lo anterior, la formulación del PMAA zona urbana de Santiago de Cali se fundamentó en el proceso de investigación participativa, la cual es una herramienta de recolección de información que permite acercarse a la comprensión de la realidad, potenciar espacios de acción y transformar el contexto ambiental a favor de los ecosistemas y de las poblaciones que los habitan.

Todos la documentación relacionada con el componente social del PMAA, se encuentra en el Anexo digital “Documentación parte social PMAA Cali”.

Con el desarrollo del ejercicio de identificación de actores y sectores, se da uno de los primeros pasos para la formulación del PMAA Cali. Entre los actores y sectores relacionados con las aguas subterráneas en la Ciudad de Cali, se identificaron: empresas de transporte público, estaciones de servicio, lavaderos de carros, lavanderías y tintorerías, hoteles y moteles, servicios de salud, comunitarios, centros religiosos y cementerios, sector comercial, construcción, institucional, académico y la comunidad en general.

En las secciones siguientes se describe el proceso metodológico implementado, sintetizado en la Figura 2-1.

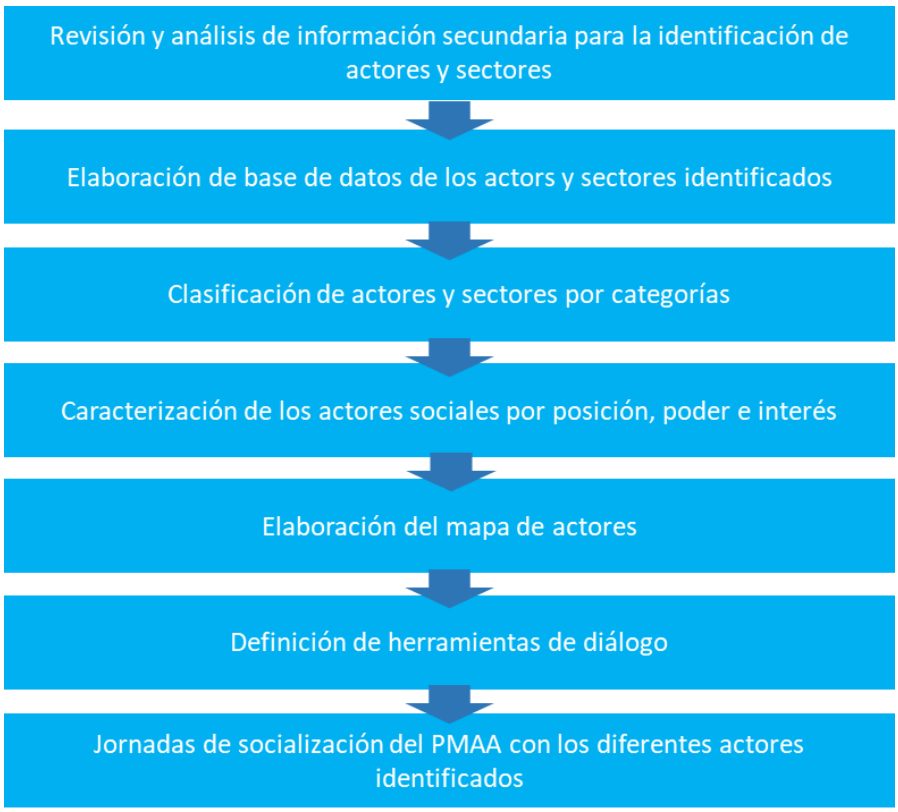


Figura 2-1 Proceso metodológico para la identificación de actores y sectores PMMA Cali.

2.4.1 Revisión y análisis de la información secundaria para la identificación de actores y sectores.

La elaboración del primer listado de actores y sectores se inició con la revisión de documentos que permitieron dar cuenta de los actores relacionados con las aguas subterráneas en la ciudad de Cali, entre ellos los siguientes:

- Guía metodológica para la formulación de los Planes de Manejo de acuíferos (MADS, 2014)
- Plan de Manejo para la Protección de las Aguas Subterráneas en el Departamento del Valle (CVC, 2000)
- La estrategia educativa para la prevención de la contaminación y el aprovechamiento sustentable de las aguas subterráneas en el Valle del Cauca (Convenio CVC-UNIVALLE. 053-2014)
- Base de datos registros de los diferentes usuarios de las aguas subterráneas del DAGMA
- Información obtenida de las páginas Web de las instituciones y sectores identificados.

2.4.2 Elaboración de base de datos de sectores y actores identificados

A partir de la información secundaria revisada y analizada se construyó la base de datos de los 655 actores sociales identificados.

2.4.3 Clasificación de actores y sectores por categoría.

Después de elaborada la base de datos de los actores y sectores, se procedió a clasificarlos teniendo en cuenta categorías y subcategorías de acuerdo con el rol que cada actor tiene en relación con el uso y manejo de las aguas subterráneas. Los sectores definidos para este análisis fueron:

- *Institucional:* Se refiere a los actores cuya función está dada por la Constitución y la Ley, cumpliendo un rol administrativo, normativo, asistencia técnica, ambiental o de control social en relación con la protección y manejo de las aguas subterráneas.

- *Industrial*: Se identificaron a los actores sociales que realizan actividades en la cuales se transforman productos, generalmente del sector primario o del mismo sector secundario.

- *Productivo:* Se refiere a los actores que realizan actividades económicas de producción relacionadas con la explotación de los recursos naturales.

- *Construcción:* Incluye todos los actores relacionados con la construcción de obras físicas e infraestructura de utilidad pública.

- *Servicios:* Lo constituyen todas aquellos actores dedicados a dar servicios de apoyo al proceso productivo, al cuidado de las personas, de los hogares y todo lo que tiene que ver con la cultura de la población. También incluye lo relacionado con transporte, comunicaciones, finanzas, turismo, hotelería, ocio, cultura, espectáculos y los denominados servicios públicos, independientemente que sean proporcionados por el Estado o la iniciativa privada.

- *Comercial:* se refiere a los actores sociales que hacen parte del sector terciario de la economía, e incluye comercio al por mayor, minorista, centros comerciales, plazas de mercado y en general a todos aquellos que se relacionan con la actividad de comercio de diversos productos a nivel nacional o internacional.

- *Académico:* se refiere a los actores sociales que tienen el rol de investigación y conocimiento de las aguas subterráneas o que utilizan el recurso hídrico.

- *Comunitario*: son aquellos actores que definen procesos organizativos de base comunitaria definidos por la ley o por intereses comunes de organización, los cuales además tienen una representación de la comunidad en el territorio. Aquí se relacionan las Juntas de acción comunal, las Juntas administradoras locales y organizaciones ambientales de carácter comunitario.

2.4.4 Caracterización de los actores por posición, poder e interés. Elaboración del mapa de actores sociales.

El mapeo de actores es el resultado del análisis y valoración de los mismos, a través del cual se obtuvo una visión gráfica de los resultados obtenidos en la matriz, identificando la influencia o posiciones de poder, la afinidad entre actores, la importancia en la formulación del PMAA y su relación con el agua subterránea, cualificando estas características en alta o media y realizando combinaciones entre ellas.

El mapa de actores se esquematiza mediante un plano cartesiano, teniendo en cuenta el poder y el interés que cada actor representa frente al desarrollo del proyecto, tal como se presenta en la Figura 2-2. En este contexto, el poder se refiere a la influencia que tiene el actor sobre el desarrollo del PMAA o de actividades del PMAA.

Figura 2-2 Mapa de actores.

De acuerdo a los resultados de la priorización, el mapa de actores nos muestra la siguiente ubicación de los actores sociales priorizados:

- En el cuadrante A, se identificaron a 99 actores que representan un poder y un interés altos, lo cual significa que estos actores son aliados durante el proceso de formulación e implementación del PMMA Cali, siendo fundamentales para el desarrollo de este proceso. Por esta razón se definieron estrategias que permitieron mantenerlos

interesados y vinculados en el desarrollo del PMAA y se les invitó a formar parte de las actividades desarrolladas en las diferentes fases del PMAA.

- En el cuadrante B, se encuentran los actores que tienen un poder medio e interés alto, por lo cual requieren algún tipo de apoyo para movilizarse; es decir, para convertirse en actores con poder para incidir en el proceso de formulación e implementación del PMAA. Por tal razón las estrategias que se definieron garantizaron su participación y estuvieron orientadas a mantenerlos informados de los esfuerzos que se realizaron en el desarrollo del PMAA.

- En el cuadrante C, identificaron actores con un poder e interés medios, siendo aquellos actores que están atentos al proceso pero que no participan directamente en el mismo. Sin embargo, fue importante su consideración ya que, con las estrategias adecuadas de comunicación, se consiguió que se interesaran en el PMAA y se convirtieran en facilitadores del mismo.

- En el cuadrante D se localizan los actores con un poder alto y un interés medio. A estos actores se los mantuvo informados del desarrollo del PMAA, ya que ellos podían contribuir y contribuyeron a la movilización de otros actores interesados.

Se puede observar que en los cuadrantes C y D se localizaron los Gestores ambientales comunitarios, que son líderes ambientales que el DAGMA coordina y lidera y quienes representan un potencial alto para generar procesos informativos y de difusión del proyecto en cada una de sus comunas. Por tal razón, a través del DAGMA se les mantuvo informados a lo largo de todo el desarrollo del PMAA y se les involucró directamente en las actividades de diagnóstico y formulación.

2.4.5 Definición de herramientas de diálogo.

Las herramientas de diálogo para el PMAA zona urbana de Santiago de Cali están estructuradas desde los medios y canales utilizados por los actores internos DAGMA y CVC, tales como: Correos electrónicos, páginas web, televisión y radio. Estas herramientas brindaron, además, apoyo en la difusión de boletines informativos relacionados con el reforzamiento en la convocatoria a las jornadas de socialización y a su vez en el avance y desarrollo de las mismas.

2.4.6 Jornadas de socialización del proyecto con los diferentes actores identificados.

Finalmente, el objetivo propuesto para el desarrollo de cada jornada de socialización fue presentar a los diferentes actores sociales relacionados con el uso y manejo del acuífero en la zona urbana del municipio de Santiago de Cali, los objetivos, alcances y metodología propuestos para la participación y la comunicación, además de los aspectos técnicos en el desarrollo de las diferentes fases del proceso de formulación del Plan de Manejo Ambiental de Acuífero (PMAA): aprestamiento, diagnóstico y formulación.

Los objetivos específicos propuestos fueron:

- Presentar a los participantes la situación actual de las aguas subterráneas en la zona urbana del municipio de Santiago de Cali

- Mostrar, a los diferentes actores sociales, los principales aspectos técnicos y sociales para el desarrollo del proceso de formulación del PMAA (Marcos normativo, institucional, conceptual, metodológico y las diferentes fases del plan, con énfasis en la fase de aprestamiento)
- Caracterizar conjuntamente a los diferentes actores sociales presentes, con el fin de orientar la definición de la estrategia de participación y comunicación en cada una de las fases del proyecto
- Concertar acuerdos para la participación y difusión del proyecto en las siguientes fases.

En total se realizaron cuatro jornadas de socialización en la fase de apresatmiento a las que asistieron 237 actores de los diferentes sectores, quienes continuaron acompañando el proceso participativo para la formulación del PMAA.

Como parte de este proceso, se recogieron las expectativas e interrogantes en torno a la formulación del PMAA:

Interrogantes:

De manera general, los interrogantes que se plantearon en las mesas de trabajo se relacionaron con el proceso metodológico durante formulación del PMAA, resaltando el interés en participar del proceso. Entre estos se incluye el financiamiento para los proyectos a desarrollar, los mecanismos de participación, el plan de trabajo y los aspectos metodológicos del proceso. Algunos interrogantes son en torno al proceso puntual del diagnóstico, por ejemplo: si para los análisis se incluye la información técnica de todos los pozos existentes en la ciudad o si se va a hacer un proceso de capacitación a los actores sociales.

Otros interrogantes giran en torno a los productos del PMAA: ¿se generará un mapa del acuífero?, ¿cómo será la publicación de documentos técnicos? Otros interrogantes recurrentes, están también relacionados directamente con los aspectos legales y de funcionamiento del DAGMA y su relación con los usuarios: tramites y procedimientos para la concesión de aguas subterráneas, cobros por el uso, incentivos económicos, entre otros.

Expectativas:

- Fortalecimiento institucional
- Sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo
- Gobernanza para la gestión integrada de los recursos hídricos
- Educación ambiental

Las expectativas expresadas por los integrantes de las mesas de trabajo se relacionan con los procesos de fortalecimiento institucional y educación ambiental. Se planteó la necesidad de que la Autoridad Ambiental realice un proceso previo de educación ambiental a los usuarios, antes de generar alguna sanción. También se resalta la educación ambiental a la comunidad en general, a escuelas y a colegios debido a que posibilitaría la creación de conciencia para el cuidado del acuífero, posibilitando un mayor conocimiento del recurso por parte de los actores sociales. Los actores sociales también consideran importante que desde el DAGMA se realice más acercamiento a los usuarios cuando se van a realizar mediciones o análisis de pozos, explicar por qué y para que se realiza cada actividad, y de esta manera brindar un mayor conocimiento a los usuarios sobre la actividad y el tema.

Otras de las expectativas que se resaltan por parte de los actores sociales, se orientan a temas relacionados con el fortalecimiento institucional y la gobernanza del recurso hídrico. Ambos temas están muy relacionados, dado que la gobernanza está planteada como el trabajo conjunto entre los diferentes actores sociales y los institucionales. Se resalta también la expectativa de que el plan se construya teniendo en cuenta la importancia de la articulación del PMAA con otros planes ambientales y territoriales del municipio.

2.5 Construcción de la identidad visual y difusión inicial del PMAA

Dentro del componente social para la formulación del plan de manejo se encuentra incluido como eje transversal la comunicación, visualizada como una herramienta que fortalece el proceso participativo con los diferentes actores sociales. La estrategia de comunicación pretende dar a conocer, a los diferentes actores sociales relacionados con el proceso de formulación, las acciones adelantadas en el marco del desarrollo del proyecto. La estrategia busca, además, motivar cambios de comportamiento de los actores frente al manejo y protección de los recursos hídricos subterráneos.

En esta primera fase de preparación se estableció el alcance para la estrategia de comunicación durante las diferentes fases aprestamiento, diagnóstico y formulación. Es por ello que en esta fase de aprestamiento se realizó el primer contacto institucional con las respectivas áreas de comunicación tanto de DAGMA como de CVC. Es necesario tener en cuenta que estas entidades hacen parte del grupo de actores y que el liderazgo del plan recae en ellas. Se identificaron los medios de comunicación institucional con los que se apoyaría la difusión y se establecieron las directrices para la misma, las cuales enmarcan las responsabilidades a nivel comunicacional del plan.

Las directrices establecidas fueron las siguientes:

- La información es construida desde el componente social del plan con el aval del equipo técnico.
- DAGMA como entidad líder del plan a través del área de comunicaciones revisa toda información a difundir.
- La información es difundida por DAGMA a través de los diferentes canales institucionales tanto internos como externos.
- CVC pondrá a disposición del proyecto los diferentes medios de comunicación tanto internos como externos.
- Las entidades líderes del plan suministran logos institucionales para apoyar el material P.O.P.

Los aspectos a resaltar dentro de la construcción de la identidad visual en la de fase de aprestamiento fueron: construcción de la imagen del PMAA (logo, ilustración, slogan); herramientas comunicacionales; difusión y acercamiento con medios masivos locales (entrevistas). Se desarrolla cada uno de estos aspectos a continuación.

Construcción de la imagen del PMAA: logo, Ilustración y eslogan.

El plan contempló la elaboración de un logo que se utilizó en los documentos formales (oficios, informes, formatos entre otros) y una ilustración que representó al acuífero y al entorno del mismo. Para ello, se trabajó con el equipo técnico un primer acercamiento con el objetivo de conocer lo que la institucionalidad conceptúa del plan, y así trasmitirlo a través de una imagen (Figura 2-3).

Figura 2-3 Equipo Técnico realizando aportes en la construcción de la identidad visual

Como resultado de los aportes y la construcción del equipo técnico se consolidó el logo (Figura 2-4) y la ilustración (Figura 2-5).

Figura 2-4 Logo PMAA Zona urbana Santiago de Cali

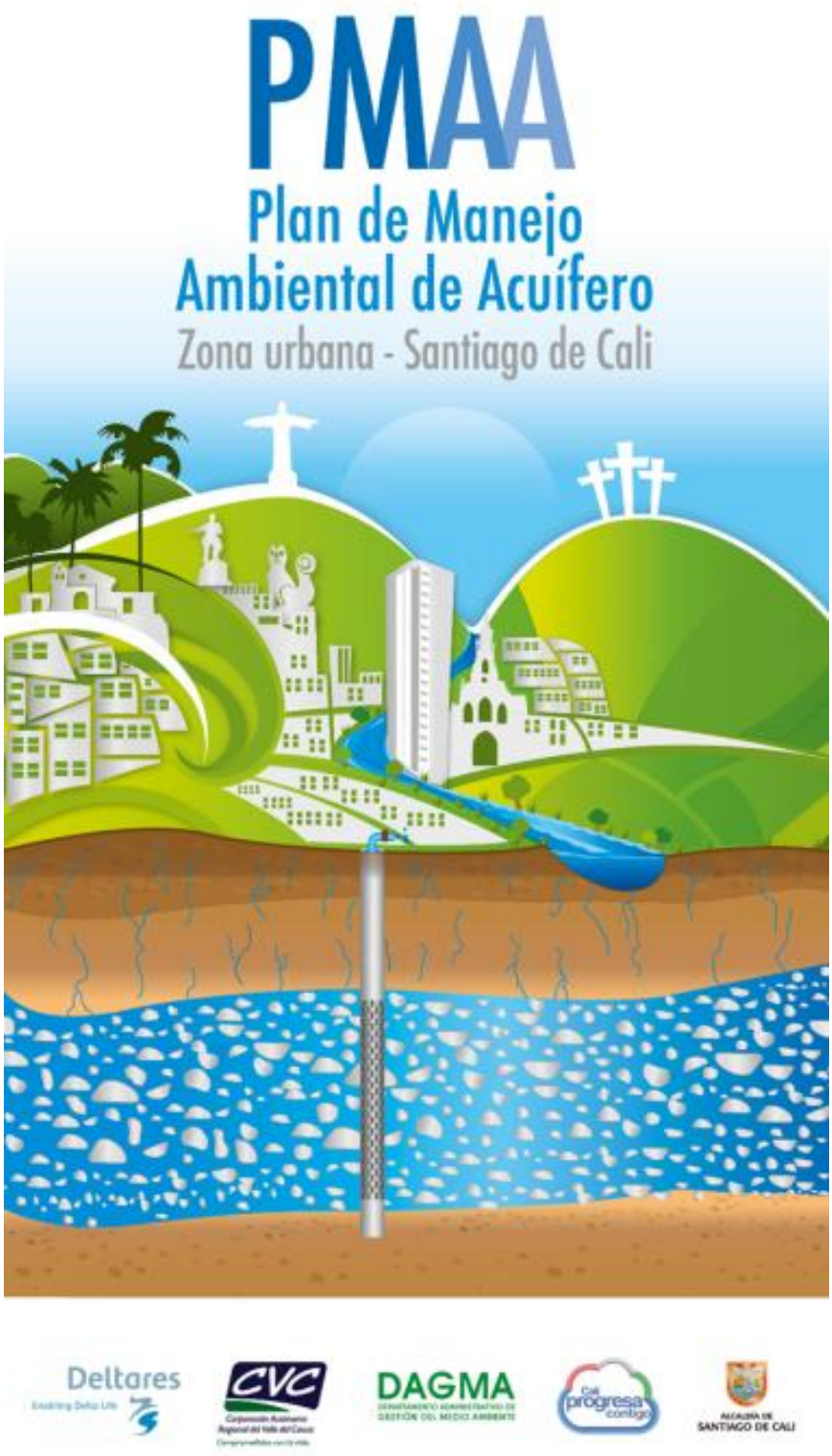


Figura 2-5 Ilustración PMAA Zona urbana Santiago de Cali

Herramientas comunicacionales

Una vez culminado el proceso de construcción del logo y la ilustración, se elaboró el material publicitario, el pendón y el plegable que se presentaron y difundieron en la primera jornada. El pendón (Figura 2-6) mostró a los diferentes actores la ilustración y los acercó al acuífero, sus características y su relación con el entorno. De igual manera, se resaltaron los iconos de mayor representatividad de la ciudad.

Figura 2-6 Imagen de pendón utilizada en Jornadas de Socialización PMAA 17, 18, 19 y 23 de abril de 2018

El plegable (Figura 2-7) como material impreso proporcionó más información del plan, como el significado, las características, las fases, los actores que intervienen y tiempo en el que se desarrolla el plan y la importancia de una participación.

¿Qué es el PMAA?

El Plan de Manejo Ambiental de Acuífero - PMAA, es el instrumento de planificación por medio del cual la autoridad ambiental administra y protege las aguas subterráneas. A partir del diagnóstico se permite identificar el comportamiento de las aguas subterráneas y las problemáticas asociadas a este recurso, con lo cual se definen las acciones a seguir en el presente y futuro.

El PMAA hace parte de la Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH) definida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en cuyas líneas de acción se establecen las directrices para la Formulación del Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB).

La política plantea líneas de acción estratégicas que consideran: profundizar en el conocimiento de la oferta (recursos y reservas), priorizar acuíferos para formular e implementar los planes de manejo, realizar inventarios y registros de usuarios del recurso hídrico a nivel de cuenca priorizada en el Plan Hídrico Nacional, implementar programas de ahorro y uso eficiente del agua, reducir los aportes de contaminación puntual y difusa, formular e implementar el programa nacional de monitoreo, incorporar la gestión de los riesgos asociados a la oferta y a la disponibilidad del recurso hídrico en los instrumentos de planificación, generar condiciones para el fortalecimiento institucional, integrar, armonizar y optimizar la normativa asociada al recurso hídrico subterráneo, e incrementar la participación de todos los sectores involucrados en su gestión integral.

¿Quiénes intervienen en la formulación del PMAA?

En la realización del PMAA deben intervenir los principales actores sociales relacionados de alguna manera con las aguas subterráneas incluyendo: entidades nacionales, regionales, y locales encargadas de la gestión de los recursos naturales, institutos y universidades con investigación en torno al tema, usuarios directos de las aguas subterráneas, empresas con actividades potencialmente contaminantes para este recurso, institutos y universidades encargados de formación a niveles técnico, tecnológico y profesional en torno al tema. En conclusión, este es un plan que debe formularse de manera participativa y debe ser conocido por la ciudadanía.

La autoridad ambiental que direcciona el PMAA para la zona urbana en el municipio de Santiago de Cali es el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA, en colaboración con la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, que a su vez es la autoridad ambiental en el resto del departamento del Valle del Cauca.

¿Qué es un actor social?

Se consideran actores sociales involucrados en el manejo del agua subterránea: la población y los sectores productivos usuarios del recurso, las instituciones que tienen funciones de administración y control, aquellos actores no usuarios del agua subterránea que con sus actividades afectan el recurso; quienes sin ser usuarios, se ven afectados por las medidas generadas en el plan de manejo, la población estratégica como el sector educativo, o los medios de comunicación quienes pueden contribuir de manera positiva al logro de objetivos definidos en el plan de manejo y las organizaciones de carácter comunitario que apoyan la gestión en el territorio.

¿Qué tengo que ver en esto?

Usted tiene mucho que ver en el PMAA, puesto que como actor social usted está relacionado con el tema de alguna de las formas anteriormente mencionadas y es necesario que todo lo que se relacione con este tema sea conocido tanto por usted como por las personas que hacen parte de la entidad que representa. Su participación en todas las fases del plan es fundamental, resaltando la importancia de su participación en la generación de estrategias para avanzar en el desarrollo sostenible de la ciudad.

¿En cuánto tiempo se formulará el PMAA y cuantas fases tiene?

Este proyecto se llevará a cabo durante los años 2018 y 2019, y está conformado por las siguientes fases:

1. **Aprestamiento**: Es la fase en la cual se conforma el equipo técnico necesario para realizar y acompañar la formulación del plan, se definen: el plan de trabajo, la estrategia de socialización y participación y la logística requerida.
2. **Diagnóstico**: Es la fase en la cual se elabora o actualiza la línea base de oferta y demanda de agua subterránea, se identifican los conflictos y problemáticas, se realizan el análisis de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación y la identificación y análisis de riesgos de las fuentes potenciales de contaminación, entre otros aspectos.
3. **Formulación**: En esta fase se definen las medidas a implementar, los proyectos y actividades a ejecutar, con el fin de solucionar las problemáticas identificadas en el diagnóstico, estableciendo el cronograma de ejecución, los costos y responsables.

Una vez el PMAA sea formulado, el DAGMA debe llevar a cabo la adopción y ejecución del plan en sus dos últimas fases: Implementación y Seguimiento.

Figura 2-7 Plegable PMAA Zona Urbana Santiago de Cali

Difusión y acercamiento con medios masivos locales (entrevistas).

Las instituciones DAGMA y CVC iniciaron la difusión de la información, incluyendo imágenes de actividades realizadas previamente a la jornada, y durante la convocatoria de la jornada. La jornada de trabajo se dividió en varios grupos y, al ser esta la actividad de apertura con los actores, se dio mayor énfasis en el exitoso inicio y la participación de los actores. De esta manera no sólo los actores y las instituciones líderes del plan se reflejaron en las noticias, también la ciudadanía empezó a conocer detalles y la importancia de velar por la preservación del recurso hídrico subterráneo.

CALI

Protección para el agua subterránea

La próxima semana se socializará el nuevo proyecto del uso sostenible del agua subterránea en la CVC. En Cali hay más de 800 usuarios entre hoteles, lavaderos de carros, estaciones de servicio, industrias y cementerios que se sirven de ella.

Del 17 al 23 de abril se llevará a cabo la socialización, a la que podrá asistir la ciudadanía en general. Quienes deseen mayor información pueden llamar a la Trabajadora Social Olga Patricia Quintero, al teléfono 323 4074550, o escribir al correo pmaa-cali@cvc.gov.co

Dagma socializará el Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos en la zona urbana de Santiago de Cali

TITULARES

Informativo CVC programa 378 24 de abril 2018

Diario Occidente

Dagma socializó Plan de Manejo Ambiental

DAGMA Y CVC BUSCAN QUE SE HAGA USO SOSTENIBLE DEL RECURSO

CULMINA CON ÉXITO SOCIALIZACIÓN DE PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL ACUÍFERO DE CALI

En las siete jornadas llevadas a cabo, participaron actores relacionados con el uso, gestión y protección de las aguas subterráneas como estaciones de servicio, lavaderos de carros y motos, empresas de transporte público y representantes de los sectores industrial, productivo, comunitario, comercial y académico en general.

B-138, Cali 7 de mayo de 2018

El Dagma, la CVC y la Fundación Deltares, culminaron con éxito las jornadas de socialización de la fase de aprestamiento del Plan de Manejo Ambiental de Acuífero, Pmaa, para la zona urbana del municipio de Santiago de Cali.

Figura 2-8 Collage de imágenes relacionadas con la primera jornada realizada en fase de aprestamiento

En el proceso de difusión (Figura 2-9) se realizaron entrevistas en medios masivos locales, incluyendo emisoras universitarias, con el objetivo de abordar el PMAA como un tema de ciudad. Con estas entrevistas se logró abrir un espacio más amplio de difusión en los medios de comunicación de Cali. Para esta actividad se contó con el apoyo de los diferentes profesionales DAGMA, CVC y Fundación Deltares, quienes como expertos en el tema explicaron detalladamente lo que implica formular el PMAA.

Figura 2-9 Collage de imágenes relacionadas con la difusión del PMAA en medios masivos

3 Diagnóstico técnico

3.1 Contexto biofísico

El municipio de Cali se encuentra ubicado en el departamento del Valle del Cauca al suroccidente colombiano sobre la margen oriental de la cordillera occidental. Tiene un área aproximada de 561.6 km^2 que comprende altitudes que van desde los 916 msnm en el valle geográfico del río Cauca, hasta los 4.035 msnm, aproximadamente en el Parque Nacional Natural (PNN) Farallones de Cali. La zona urbana comprende 119.7 km^2 (21.3%), y la zona rural 441.9km^2 (78.6%) (CIAT, DAGMA, & CVC, 2015).

De acuerdo con la zonificación climática de la región Andina realizada por Narváez y León (2001), el municipio de Cali está dentro de la clasificación “Valles cálidos semihúmedos y vertientes húmedas de alta montaña”, en una zona que se caracteriza por la presencia de brisas o lluvias leves en el valle y montaña.

La precipitación en el municipio de Santiago de Cali varía aproximadamente desde los 1.200 mm/año en la zona plana, que corresponde al área urbana en el sector nororiente, hasta los 3.000 mm/año en el Parque Nacional Natural Farallones de Cali (Figura 3-1, izquierda). La temperatura media anual varía entre los 24°C en la zona urbana, hasta los 15°C en la zona de mayor altitud (Figura 3-1, derecha). En general, la precipitación en el municipio presenta una gran variabilidad, influenciada por la orografía y las corrientes provenientes del Pacífico.

La precipitación media mensual en el municipio presenta un régimen bimodal, con dos períodos lluviosos: el primero entre marzo y mayo, y el segundo entre octubre y noviembre; y dos períodos de menos precipitaciones: entre diciembre y febrero, y entre junio y septiembre. Las precipitaciones máximas promedio se registran en el mes de abril (232 mm) y las mínimas en agosto (69 mm).

Las temperaturas varían entre mínimas promedio de 16.5°C, medias de 21.8°C y máximas de 27.3°C. Las temperaturas máximas se registran en el mes de agosto, cercanas a los 28°C, aproximadamente; para las temperaturas mínimas y medias no se observa mayor diferencia a lo largo del año.

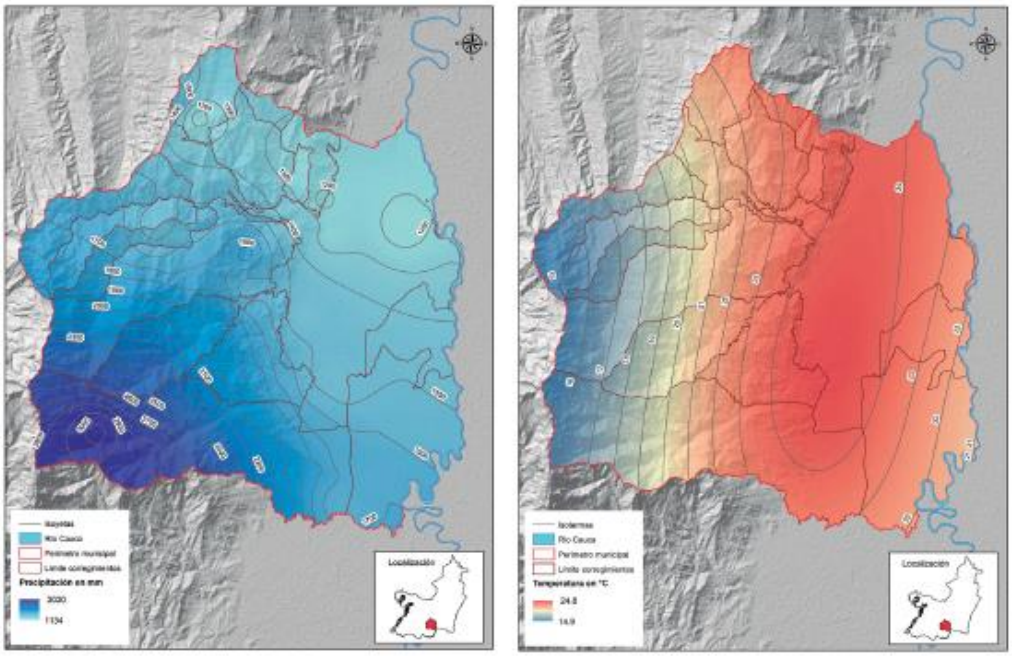


Figura 3-1 Isoyetas e isotermas medias anuales multianuales. Fuente: (CIAT et al., 2015)

El municipio de Santiago de Cali cuenta con 7 ríos principales, por lo que es conocida como la ciudad de los 7 ríos; seis de estos ríos pasan por el perímetro urbano de la ciudad. La red hídrica del municipio tiene tres puntos que desembocan en el río Cauca: el río Cali, que recibe las aguas del río Aguacatal; el Canal Sur, que recoge las aguas de los ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo; y el río Pance, que vierte sus aguas a través del río Jamundí, en el límite sur del municipio.

El río Aguacatal es un tributario del río Cali y tiene un caudal promedio de 0.477 m^3/s en su desembocadura. El río Cali tiene un caudal promedio de 0.606 m^3/s a la entrada del perímetro urbano del municipio y 1.952 m^3/s de caudal en promedio en la desembocadura al río Cauca (DAGMA, 2012b). El río Pance es el río más visitado por los caleños para la recreación, y cuenta con un caudal promedio de 2.127 m^3/s en su desembocadura al río Jamundí (DAGMA, 2012b).

Los ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo se unen en una red artificial conocida como el Canal Sur que recoge las aguas de los tres ríos y los entrega al río Cauca. El río Cañaveralejo tiene un caudal promedio de 0.554 m^3/s en su desembocadura, el río Meléndez tiene un caudal de 0.831 m^3/s en promedio, mientras que el caudal medio en el río Lili es de 0.851 m^3/s. El caudal promedio de la descarga del Canal Sur al río Cauca es de 2.3 m^3/s (CVC & UNIVALLE, 2007). El río Cauca constituye a su vez el límite oriental del municipio; es el mayor de los 7 ríos en dimensión y en caudal, y es también el segundo río principal de Colombia. El caudal promedio en la estación Juanchito, que representa el caudal a la salida del municipio de Cali, es de 265 m^3/s (CVC & UNIVALLE, 2007).

Para el diagnóstico de las aguas subterráneas, se requieren mediciones de diferentes parámetros hidrometeorológicos (precipitación, evaporación potencial y los caudales/niveles de los ríos), que son un insumo básico para establecer el balance hídrico de la zona urbana de Santiago de Cali. Parte de las estaciones en la zona urbana de Santiago de Cali son operadas por el DAGMA, mientras que otras son operadas por la CVC, incluyendo estaciones

limnimétricas/limnigráficas, pluviométricas/pluviográficas, y climatológicas. La red hidrometeorológica cuenta con diferentes tipos de estaciones, algunas que transmiten datos en tiempo real con una alta frecuencia de medición, mientras otras estaciones son de tipo convencional, con mediciones dos veces al día y/o diarias, dependiendo del parámetro.

Para este estudio se consideran todas las estaciones en el área de estudio con datos en el período 2007-2017. En la Figura 3-2 se presentan las estaciones de acuerdo a su categoría: climatológicas (CO), limnigráficas (LG), limnimétricas (LM), pluviográficas (PG), pluviométricas (PM), y las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire del DAGMA.

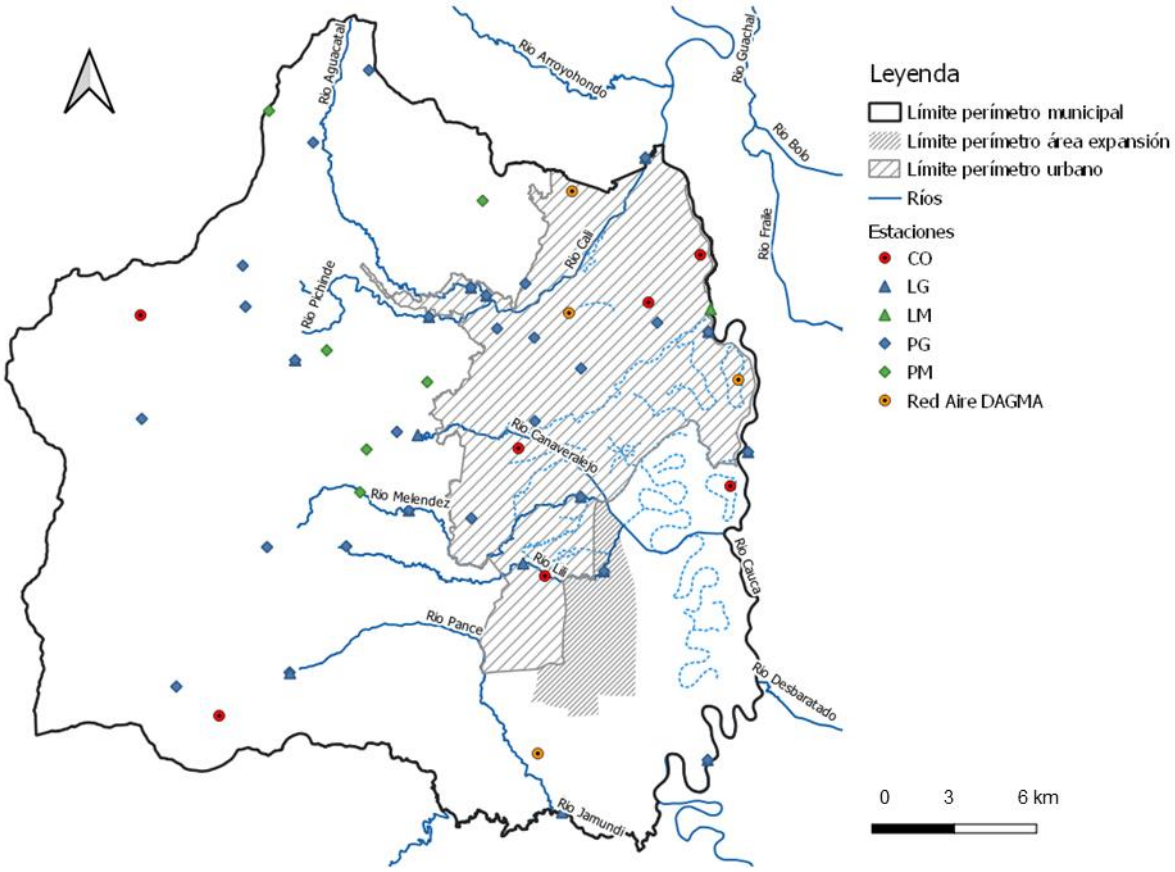


Figura 3-2 Estaciones hidroclimatológicas del área de estudio

3.2 Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de Santiago de Cali

3.2.1 Geología detallada del municipio de Santiago de Cali

Dentro del marco geológico, se realiza una descripción detallada de la geología haciendo énfasis en su composición petrográfica y mineralógica, con el propósito de correlacionarla con información adicional (hidroquímica, dirección de flujo, zonas de recarga y descarga) del acuífero de Cali para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual.

El Valle del Cauca está constituido por tres tipos de rocas principales: 1) un conjunto rocas ultramáficas y máficas conformadas por dunitas serpentinizadas, piroxenitas y gabros; 2) rocas volcánicas e hipoabisales constituidas por flujos basálticos, silos y diques doleríticos; y 3) una

secuencia de rocas sedimentarias conformadas por areniscas, lodolitas, wacas líticas y chert (Nivia, 1996). Las rocas ígneas (rocas ultramáficas, máficas y basaltos), están relacionadas cogenéticamente. Sobre los basaltos (o interdigitados con ellos) se depositaron las secuencias sedimentarias. Los procesos tectónicos de acreción del Plateau Oceánico, produjeron un apilamiento tectónico con intensa deformación que generó el metamorfismo dinámico, que varía de intensidad según las propiedades mecánicas de las diferentes unidades de rocas.

A continuación se hace una descripción detallada de los tipos de rocas y sedimentos que se encuentran en el área de estudio.

3.2.1.1 *Rocas plutónicas, ultramáficas y máficas*

A todo lo largo de la Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental (PLOCO) se presentan escamas de rocas plutónicas ultramáficas y máficas en íntima asociación con otras de vulcanitas básicas. En el Departamento del Valle se han cartografiado dos cuerpos principales de rocas ultramáficas: el Complejo Ultramáfico de Bolívar y el Macizo Ofiolítico de Ginebra; y varios cuerpos de rocas plutónicas máficas al que pertenece el Stock de Villa Carmelo. Los cuerpos de rocas máficas están constituidos por gabros, troctolitas y gabronoritas (Nivia, 2001).

Stock de Villa Carmelo (Kgc): Un pequeño stock localizado inmediatamente al este de Villa Carmelo (Municipio de Cali). Petrográficamente aún no ha sido definido, pero parece que la intrusión consiste en gabro clinopiroxénico con parches de material cuarzodiorítico.

3.2.1.2 *Rocas volcánicas básicas*

Asociadas a las plutonitas descritas previamente afloran escamas de basaltos y doleritas que se agrupan en las formaciones Volcánica y Amaime. Sus afloramientos consisten esencialmente en lavas basálticas afaníticas y afirícas; y silos y diques doleríticos. Asociados a estas rocas se presentan también cantidades menores de brechas volcánicas y delgados horizontes sedimentarios (Nivia, 2001).

Formación Volcánica (Kv): Constituye una secuencia de rocas volcánicas básicas localizadas a todo lo largo de la Cordillera Occidental, al occidente de la Falla Cali - Patía. Esta formación está compuesta por diabasas, lavas almohadilladas, basaltos y gabros incluyendo diques de dolerita. La formación contiene numerosos horizontes y lentes sedimentarios compuestos por pizarras, filitas, shales carbonosos, limolitas, areniscas, cherts y localmente calizas. El espesor de la Formación Volcánica se estima en 5.000 m. El contacto inferior de esta formación no se conoce; la relación con las formaciones Cisneros y Espinal es inter-digitada y el contacto superior infrayace en discordancia angular las areniscas basales del Grupo Cauca.

Los basaltos son masivos de color gris verdoso a verde oliva; contienen un buen desarrollo de horizontes de lavas almohadilladas de hasta 50 m de espesor. La parte superior de estas secuencias pueden consistir en pillow brechas, hialoclástitas y localmente pueden tener niveles de chert y tobas. Los basaltos están formados por agujas finas de plagioclasa, pequeños cristales de augita; rellenando los espacios vacíos, a veces se presenta vidrío volcánico devitrificado. Las diabasas son rocas de grano fino compuestas por cristales prismáticos o listones de plagioclasa variedad andesina en cuyos intersticios se desarrolló la augita. Como minerales accesorios se encuentran la magnetita o ilmenita (Nivia, 2001).

3.2.1.3 *Complejo estructural Dagua*

En los trabajos de cartografía geológica regional del Departamento del Valle, las rocas sedimentarias de la PLOCO se clasifican utilizando varios esquemas de nomenclatura estratigráfica tales como Grupo Dagua (formaciones Cisneros y Espinal), formaciones Nogales, Ampudia, Río Piedras, etc. Sin embargo, dado que la alta deformación presente en estas rocas impide la definición de unidades litoestratigráficas formales en la PLOCO, se consideran todas las rocas sedimentarias como una unidad litodémica, a la que asignan el nombre de Complejo Estructural Dagua. Bajo esta denominación se agrupan las rocas acumuladas por procesos sedimentarios tales como lodolitas, wacas, arenitas, cherts, tobas, aglomerados y calizas (Nivia, 2001).

Formación Ampudia (Kam): La unidad es dominantemente sedimentaria, limitada por bloques corticales de la Formación Volcánica. Está constituida por una secuencia de chert, lodolitas silíceas, limolitas, areniscas y localmente lodolitas arcillosas con horizontes de brechas sedimentarias. Se presentan igualmente unas intercalaciones menores de basaltos y doleritas (Nivia, 1999). Los chert son usualmente de color gris oscuro, ocurren en capas hasta de 12 centímetros de espesor y están compuestos por cuarzo criptocristalino y material arcilloso. Se observan estructuras circulares que probablemente representan restos de radiolarios y/o foraminíferos.

3.2.1.4 *El Graben Interandino Cauca-Patía (GICP)*

Formación Chimborazo (TPc): La Formación Chimborazo suprayace discordantemente las formaciones Volcánica y/o Ampudia e infrayace en discordancia la Formación Guachinte. Es subdividida en dos miembros: el inferior, denominado Miembro Confites; y el superior como Miembro Loma Larga. El espesor de la Formación supera los 3.000 m en su sección tipo y decrece hacia el norte. En el Valle, la formación alcanza los 400 m en el sur y se acuña un poco más al norte, cerca de la población de Villa Carmelo.

El Miembro Confites, consiste de brechas a conglomerados polimícticos, interestratificados con wacas líticas y limolitas. Los líticos constan principalmente de chert y basaltos que alcanzan hasta un metro de diámetro hacia la base. El Miembro Loma Larga, consta de material de grano más fino de wacas líticas, limolitas, lodolitas y shales. Se presentan estratos con costras ferruginosas y shales carbonosos sin alcanzar la categoría de carbones.

La Formación Chimborazo es de origen marino, relacionada con un ambiente turbidítico. De acuerdo con el contenido de polen, se le asigna una edad del Eoceno a Eoceno superior.

Formación Guachinte (TOg): El nombre de Formación Guachinte que hace parte del Grupo Cauca es una secuencia de rocas sedimentarias de origen parálico, con importantes mantos de carbón, que afloran a lo largo del Río Guachinte. Al norte del Río Pance, esta formación descansa directamente sobre la Formación Volcánica. La Formación ha sido dividida en varios miembros: El Miembro La Cima presenta un espesor de 105 metros en el río Guachinte, está constituido por bancos gruesos de areniscas cuarzosas de colores blanco grisáceas, de grano fino a conglomeráticas e intercaladas con capas de espesor medio a gruesas de limolitas grises oscuras y lentes de conglomerados.

El miembro Los Chorros está constituido por una secuencia repetitiva de hasta 4 metros de espesor de areniscas de grano grueso y medio a la base a limolitas, lodolitas y shales al techo. El contenido de carbón generalmente se incrementa hacia el techo. Los carbones son duros,

bituminosos pero con alto contenido en volátiles y varían en espesor desde los 0,5 metros hasta los 2 metros con espesores locales mayores.

El miembro La Rampla, se inicia a los 10 – 20 metros arriba del último manto de carbón del miembro Los Chorros y está marcado por el nivel marino de la Leona, caracterizado por la presencia de gasterópodos y pectínidos. Entre Cali y Yumbo, los miembros La Cima y Los Chorros no se presentan y en consecuencia el miembro La Rampla descansa directamente sobre los basaltos de la Formación Volcánica.

Formación Ferreira (TOf): Nombre asignado por Orrego (1975), para referirse a una secuencia de rocas sedimentarias que afloran a lo largo de la Quebrada Ferreira.

La Formación Ferreira también pertenece al Grupo Cauca, descansa en concordancia sobre la Formación Guachinte y es suprayacida concordantemente por la Formación La Esmita, pero esta no se presenta en el Departamento del Valle, y en su lugar se presentan en discordancia depósitos plio-pleistocenos más jóvenes (Nivia, 1996). La formación ha sido dividida en dos miembros: el inferior llamado miembro Suárez, de carácter continental y el superior, miembro Cabrera de carácter marino. En el departamento del Valle, la formación se acuña y desaparece inmediatamente al sur del río Pance. El espesor en su sección tipo es de 500 metros, en la Quebrada Seguinguito (Cauca) la formación alcanza los 1300 metros de espesor.

El Miembro Suárez, está compuesto litológicamente hacia su base por una secuencia de conglomerados lenticulares consistentes en guijarros de cuarzo lechoso y chert soportados en una matriz de arena cuarzosa, en niveles que alcanzan los 50 metros de espesor; se encuentran niveles de shales carbonáceos, lodolitas y areniscas. Hacia el techo el miembro Suárez es menos conglomerático y se interestratifica con una secuencia de shales, limolitas, shales carbonáceos y carbones.

El miembro Cabrera hacia la base se caracteriza por la presencia de dos estratos marinos que contienen restos de gasterópodos y pelecípodos, conocidos localmente como el Horizonte de San Francisco (Keizer, 1954); este se puede ver en los ríos Guachinte, Claro y Lilí. Suprayaciendo lo anterior se presenta una secuencia de limolitas y areniscas en parte, calcáreas.

Formación Jamundí (TQj): Correspondiente a depósitos no consolidados denominados inicialmente por Keizer (1954) como “Abanico de Jamundí”, esta formación fue definida formalmente en 1984 por Verdugo y Nivia con el nombre actual, para referirse a depósitos de abanicos aluviales no consolidados que afloran al suroccidente de Cali, y que suprayacen discordantemente al Grupo Cauca.

La formación consiste en depósitos de gravas y cantos no consolidados, pobremente seleccionados, compuesta por materiales de derivación local como basaltos, chert, gabros, limolitas, conglomerados y areniscas que varían en tamaño desde unos pocos centímetros hasta 3 metros. La matriz que envuelve estos clastos es de tipo predominantemente arcillosa y de colores rojizos. Hacia la parte superior de la formación se presentan horizontes arcillosos y arenosos bien estratificados. Se aprecian además niveles de arcillas grises, muy compactas, pero frágiles y con tendencia a la partición (INGEOMINAS & DAGMA, 2005).

3.2.1.5 *Intrusivos terciarios*

Los eventos magmáticos de la Cordillera Occidental están representados por los cuerpos intrusivos del Batolito de Anchicayá y el Stock de Pance. El Batolito de Anchicayá no se presenta en esta área de estudio.

Stock de Pance (Tgp, Tdip, Ttp, Tpp): Es una intrusión compuesta tonalita – gabro que aflora en los alrededores del Río Pance. Esta unidad intruye en las rocas cretácicas de las formaciones Volcánicas y Ampudia, así como las formaciones de Chimborazo, Guachinte y Ferreira.

El Stock de Pance está compuesto por gabros, dioritas hornbléndicas, tonalitas y dioritas. Los gabros (Tgp), son melanocráticos, gruesos granulares a pegmatíticos y consisten esencialmente en plagioclasa (labradorita – bitownita) clinopiroxenos (Augita) y hornblenda y como minerales accesorios incluyen apatito, esfena, cuarzo y opaco. Las dioritas hornbléndicas (Tdip), varían de grueso granulares a porfiríticas y consisten de plagioclasa (andesina) y hornblenda y cantidades menores de esfena, opacos, piroxenos, apatito, cuarzo y biotita. Las Tonalitas (Ttp), son leucocráticas de grano medio a grueso, compuestas de plagioclasa (oligoclasa – andesina), cuarzo, hornblenda y biotita y como accesorios incluyen apatito, opacos, esfena y menormente circón (Nivia, 1999). Las dioritas porfiríticas (Tpp), están compuestas de fenocristales de hornblenda, plagioclasa, cuarzo y biotita, embebidos en una matriz fina de composición similar (Nivia, 1999).

3.2.1.6 *Depósitos cuaternarios*

Los principales depósitos Cuaternarios están asociados al curso de los principales ríos. Dentro de éstos se incluyen las terrazas aluviales, los conos aluviales, depósitos lacustres. Los depósitos de derrubios y coluviales, se encuentran asociados a las zonas de altas pendientes, profunda meteorización de la roca parental y al grado de afectación tectónico de fallas y fracturas en las rocas formacionales.

Depósitos Aluviales (Qal): Los depósitos aluviales consisten en materiales clásticos gruesos a muy gruesos, de gravas estratificadas de bien a regularmente seleccionadas, con niveles de gravas arenosas, arenas y lentes de limos. Los principales depósitos aluviales se localizan a todo lo largo del río Cauca, y de los ríos mayores que drenan sus aguas a éste (río Cali, río Cañaveralejo a lo largo del cauce antiguo y río Jamundí). Los depósitos están conformados por gravas y arenas bien seleccionadas hacia el piedemonte de la cordillera, decreciendo a arenas y lodos hacia la desembocadura.

A partir de su génesis los depósitos aluviales del río Cauca, según el estudio hidrogeológico del valle del río Cauca, se pueden subdividir en:

- Albardones semilunares - Qal3: Banco que se desarrolla en el lado interno de un meandro y crece por la adición lenta de sedimentos causantes de la migración del mismo.

- Zonas resecadas y rellenos de cauce - Qal7: Son zonas de antiguos pantanos, resecadas e inundadas en varios períodos y depósitos de cauces secos abandonados.

- Albardones naturales - Qal2: Son crestas bajas paralelas al curso del río; se deben a la acumulación de sedimentos por pérdidas repentinas del poder de transporte cuando el río desborda sus márgenes.

- Cauces y meandros antiguos abandonados y tapones arcillosos - Qal5, Qal4: Son antiguos lechos de ríos y arroyos, el tapón arcilloso se forma en un cauce abandonado y aísla una laguna semilunar.

- Depósitos de pantanos aluviales - Qal(p): Son el producto de acumulación en las llanuras de inundación, caracterizadas por un relieve suave de extensas capas de limo y arcilla.

- Depósitos aluviales de la llanura aluvial - Qal(ab): Es la llanura formada al unirse conos aluviales adyacentes al pie de las montañas. Tienen varios kilómetros de extensión y presentan condiciones geológicas favorables para obtener bastante agua subterránea en los sedimentos permeables.

Depósitos de Conos Aluviales (Qca): Son las formas resultantes de la acumulación de los sedimentos transportados por corrientes fluviales al encontrar una disminución marcada en la pendiente en las partes bajas de las montañas. La textura de los sedimentos varía desde bloques gruesos y gravas mal calibradas en el ápice del cono, a material fino y mejor seleccionado en la parte distal, aumentando así, su capacidad de almacenar y transmitir agua subterránea (INGEOMINAS & CVC, 1971).

En la zona más sur de la zona de piedemonte, se presentan conos aluviales constituidos por gravas y gravas arenosas con capas relativamente delgadas de arena y esporádicamente lentes de limos. Se presenta gradación de tamaños a medida que se aleja del ápice, desde clastos que varían de los pocos centímetros a los 2-3 metros de diámetro; igualmente se observa una ligera estratificación y decrecimiento en tamaño del clasto hacia el techo del depósito. Se pueden ver abanicos de dos o más abanicos unidos lateralmente. Los depósitos de conos aluviales probablemente están asociados con los períodos de desglaciación en la era cuaternaria. En el siguiente capítulo se presenta la descripción de los conos aluviales de los diferentes ríos del municipio de Santiago de Cali.

Depósitos de Derrubios y Coluviones (Qd, Qc): Estos cuerpos se presentan generalmente localizados en las zonas de altas pendientes cercanas a las fallas geológicas y los valles profundos de los ríos. Los cuerpos están constituidos por fragmentos de rocas de tamaño grueso, angulares mezclados con material fino de limo y arcilla en una disposición desordenada, compuesto principalmente por pequeños fragmentos frescos de las rocas infrayacentes y de productos de meteorización de estas rocas. A lo largo de toda la zona donde la alteración de la roca volcánica alcanza espesores considerables, se forman numerosos deslizamientos rotacionales o hundimientos de suelo de dimensiones diferentes que determinan un relieve de pequeñas mesas colgadas.

Depósitos Lateríticos (Ql/Kv): Se trata de cuerpos limosos y arcillo - limosos, formados a partir de la meteorización in situ de las rocas de la Formación Volcánica. Estos suelos presentan una coloración marrón, rojizos a ocre. Los espesores varían de 1 a 30 metros. y en algunos casos llegan hasta los 50 metros. Se localizan en la parte media y alta de la Cordillera Occidental, especialmente donde la topografía es de pendientes suaves a onduladas.

Flujos de terrón colorado (TQfv): A pesar de que esta secuencia aún no ha sido formalmente definida por los estratígrafos, se incluye dentro de las rocas sedimentarias por su grado de compactación y meteorización. Consiste de una secuencia de materiales depositados en un ambiente fluvio-torrencial, con episodios volcánicos, donde se presentan intercalaciones horizontales de niveles tobáceos y flujos clastosoportados, formados por fragmentos de rocas ígneas básicas (predominantemente diabasas y gabros) que varía en tamaño desde pocos centímetros hasta los 80 centímetros, embebidos en una matiz areno-limosa parda (INGEOMINAS & DAGMA, 2005).

3.2.1.7 Mapa geológico para diagnostico hidrogeológico

En la Figura 3-3 se presenta el mapa geológico de la zona de estudio. Este mapa ha sido elaborado a partir de la geología escala 1:50.000 del departamento del Valle del Cauca (Nivia, 1996) y la geología escala 1:20.000 producto del estudio de microzonificación sísmica para Santiago de Cali (INGEOMINAS, 2005). Por un lado, una de las necesidades para elaborar este mapa es que la geología detallada de la Microzonificación Sísmica para Santiago de Cali - MZSC no cubre toda el área de estudio del PMAA, por lo que es necesario complementar con la geología disponible para el Valle. Por otro lado, este mapa se elaboró teniendo en cuenta el interés hidrogeológico del estudio, tomando diferentes elementos de los estudios geológicos mencionados anteriormente, para complementarlos de manera que permitan enriquecer el análisis y contrastar información relacionada con el comportamiento de las aguas subterráneas.

Un ejemplo de lo mencionado anteriormente en la zona urbana, es la presencia de los conos aluviales definidos para cada uno de los ríos de la ciudad tomados de la MZSC, al mismo tiempo que se superponen sobre ellos los depósitos aluviales (Qal) del río Cali y del antiguo Cauce del río Cañaveralejo que coincide con el paleodrenaje del mismo, elementos tomados de la geología regional para el Valle del Cauca. También en la zona urbana, sobre los depósitos aluviales del río Cauca (Qalc) tomados de la microzonificación sísmica de Cali se superponen otros tipos de depósitos aluviales como los Qal4, que corresponden a depósitos de meandros abandonados tomados de la geología regional, que también coinciden con los paleodrenajes mapeados en el marco del PMAA.

Este mapa es la base geológica para el diagnóstico en el PMAA, y a partir de él se definió el límite occidental del acuífero (línea roja en la Figura 3-3), que se define a partir de los conos aluviales de los diferentes ríos (Qca), y la parte baja de los flujos de terrón (TQfv) que está conectada directamente con los conos aluviales, mientras que la parte alta tiene una desconexión del flujo producida por la formación volcánica (Kv). Cabe resaltar que hacia el norte, sur y occidente del área del área de estudio, no existe un límite del acuífero por estar conectado con el sistema regional del acuífero del Valle del Cauca.

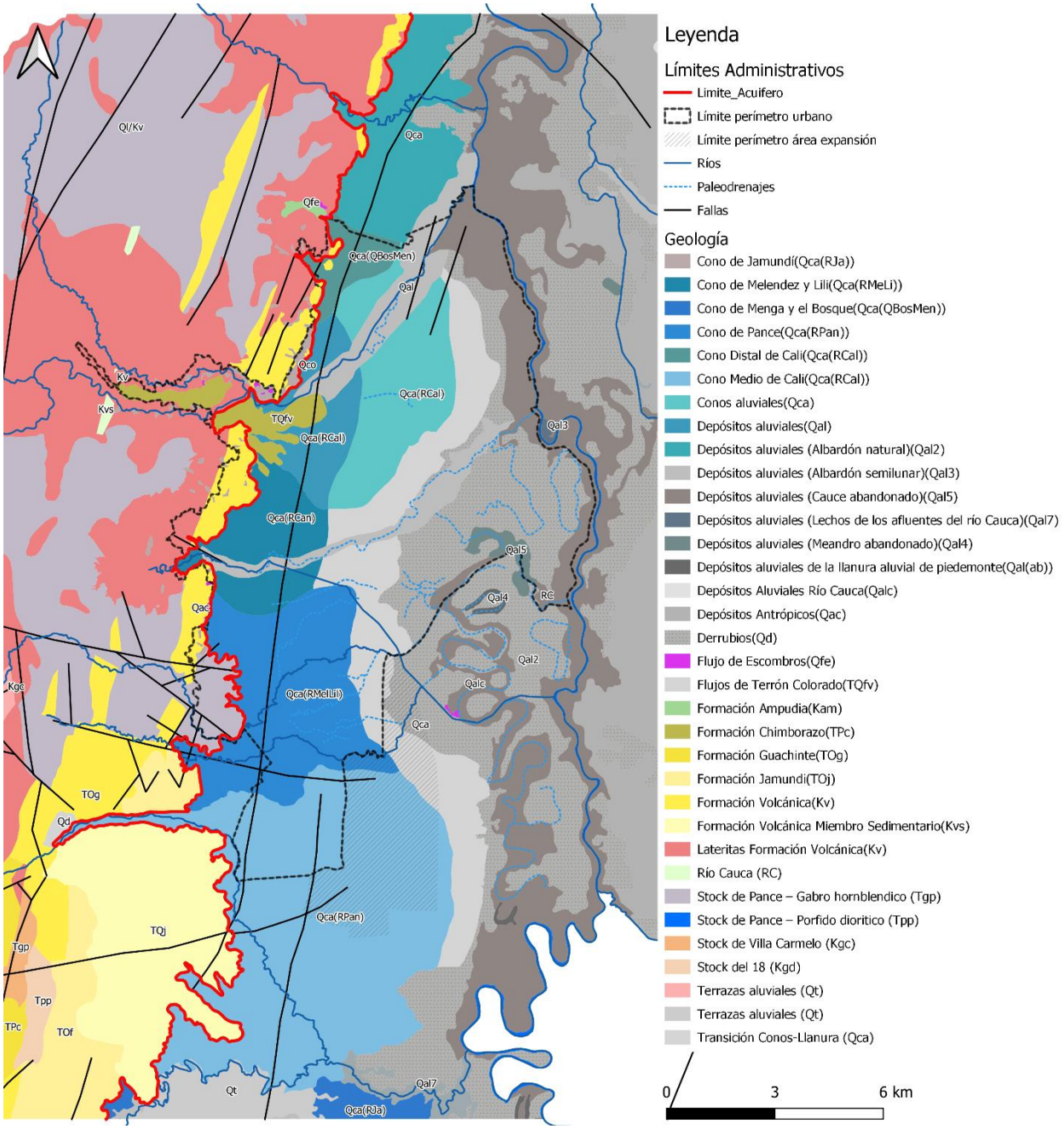


Figura 3-3 Mapa geológico de la zona de estudio. Fuente propia: mapa generado a partir de la unificación del mapa geológico regional y el mapa geológico para la zona urbana de Cali proveniente del estudio de microzonificación sísmica para Cali

3.2.2 Unidades hidrogeológicas del Valle del Cauca

El acuífero en el municipio de Santiago de Cali hace parte del sistema acuífero del Valle del Cauca, un importante relleno aluvial de un área aproximada de 3470 km^2. Al sur del departamento, a la altura del municipio de Santiago de Cali, el depósito tiene 40 km de ancho y una profundidad mayor a 1000 m.

La CVC ha desarrollado varios estudios en los que se ha caracterizado el sistema acuífero del Valle del Cauca. En términos generales, los sedimentos permeables del relleno cuaternario de la fosa tectónica del Valle, forman dos niveles acuíferos claramente localizados y de características bien definidas (CVC, 2000). El nivel superior localizado generalmente en los primeros 120 metros de profundidad del depósito aluvial (denominado Unidad A), es un acuífero libre o semiconfinado y está constituido por capas de gravas, cantos rodados y arenas con intercalaciones de arcillas y limos. Existe una gradación de sedimentos en esta unidad, ya que las partes altas de los conos aluviales de los ríos tributarios del río Cauca presentan sedimentos más gruesos, que se convierten en sedimentos mucho más finos hacia la llanura aluvial del río Cauca. Esta unidad tiene rendimientos de unos pocos litros por segundo en las partes altas de los conos aluviales hasta más de 100 l/s sobre la llanura aluvial del río Cauca.

El nivel inferior del depósito (denominado Unidad C) se encuentra por debajo de los 180 metros de profundidad, y está constituido por capas de arenas, gravas, y algunas veces cantos rodados. Se trata de un acuífero confinado que en algunos puntos tiene un nivel piezométrico superior a la cota del nivel del terreno, zonas en donde se presentan pozos saltantes. La geometría y localización exacta de la unidad C aún no está bien definida, solo se conoce bien la localización del techo de la unidad C que coincide con el límite inferior de la unidad B.

Entre las Unidades A y C se encuentran sedimentos arcillosos que funcionan como un acuitardo (denominado Unidad B). Esta unidad se encuentra en general entre los 120 y 200 metros de profundidad, es típicamente arcillosa pero eventualmente presenta lentes de arenas y gravas finas de poco interés hidrogeológico. Está constituida principalmente por arcillas orgánicas, limos y con frecuencia se encuentran horizontes de madera y materia orgánica en descomposición. Su espesor promedio es de 60 metros y en algunos sitios alcanza más de 80 metros. Actúa como techo confinante de la unidad C y no tiene un potencial de interés para el aprovechamiento del agua subterránea, pero si una gran importancia para la protección de los acuíferos confinados (CVC, 2000).

El modelo del acuífero del Valle del Cauca contempla principalmente una recarga que se produce por infiltración de la lluvia e infiltración de los ríos tributarios, principalmente en la zona de los abanicos aluviales. El flujo de agua subterránea ocurre desde la parte alta de los conos aluviales hacia la zona central, descargando en las cercanías del río Cauca y en el mismo río. El modelo conceptual del Valle asume que las fronteras con las cordilleras, al oriente y occidente de la cuenca sedimentaria, son impermeables. La hipótesis es que no hay flujo a través de estas fronteras y que el agua que se infiltra en las cordilleras aflora nuevamente pocos metros después en los cauces y drenajes naturales que descienden de las cordilleras hacia la zona plana.

3.2.3 Unidades hidrogeológicas detalladas para el municipio de Santiago de Cali

Las unidades hidrogeológicas para el municipio de Santiago de Cali se definen para el área acuífera en la ciudad, donde el límite del acuífero hacia el occidente (Figura 3-4) se definió con base en la geología como se explica en el capítulo 3.2.1.

En concordancia con la geología y las formaciones cuaternarias, el acuífero en el área urbana de la ciudad de Cali tiene una longitud mayor entre la cordillera y el río Cauca al sur del municipio, alcanzando unos 10 km aproximadamente. Hacia la zona norte las formaciones sedimentarias se estrechan entre el río Cauca y la cordillera, y así mismo la longitud oeste-este del acuífero se reduce hasta unos 4 km aproximadamente, y continúa disminuyendo su ancho hacia el norte del departamento. Cabe resaltar que el acuífero en Cali está conectado naturalmente al sistema acuífero del Valle del Cauca en sus límites norte, este y sur.

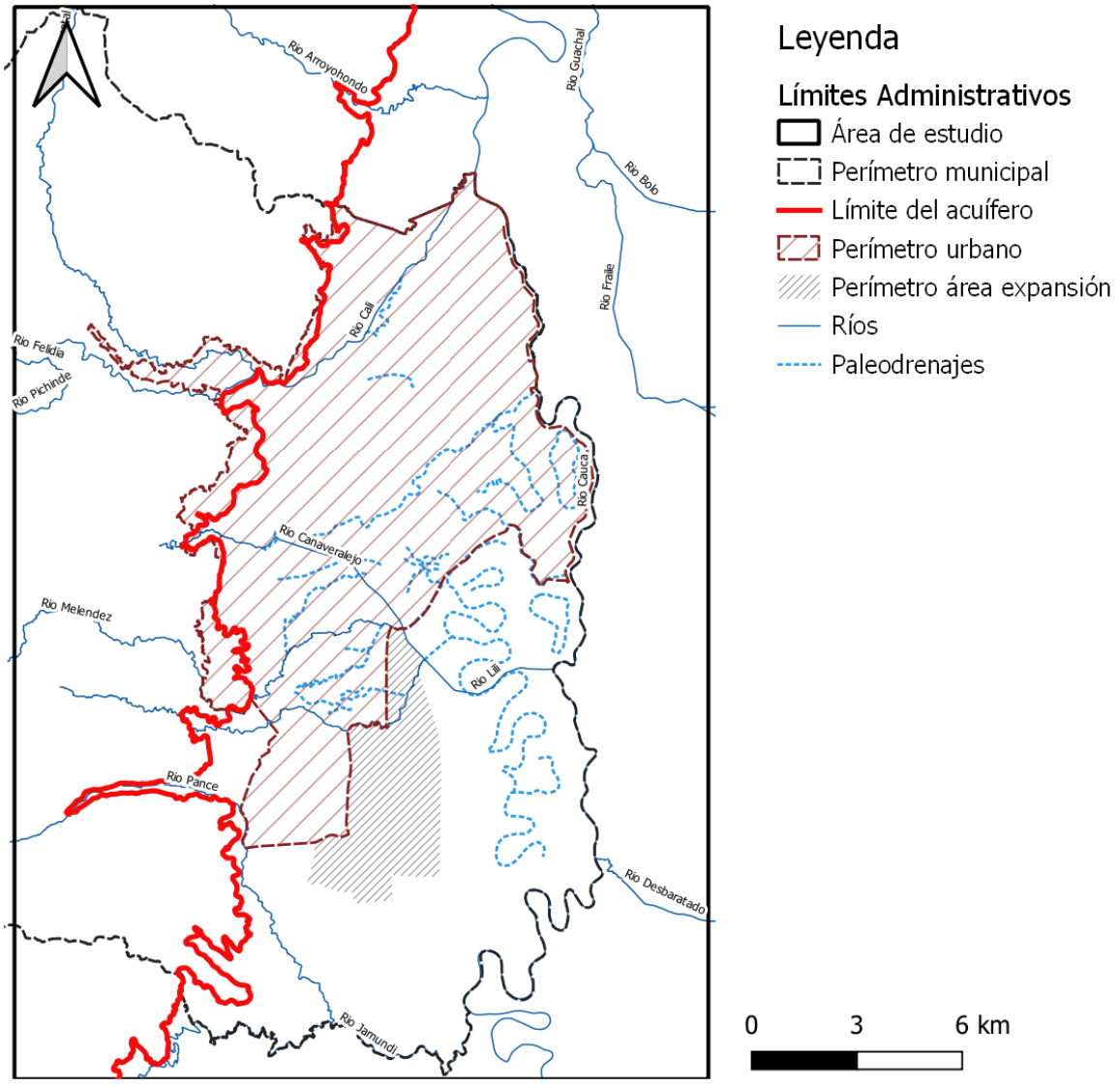


Figura 3-4 Límite occidental del acuífero en Santiago de Cali

3.2.3.1 *Geometría del acuífero*

La caracterización detallada de las unidades hidrogeológicas para la ciudad de Cali se desarrolló a partir del análisis de información de diferentes fuentes, mediante la generación de cortes longitudinales y transversales del acuífero, y un corte a lo largo del río Cauca (Figura 3-5).

Para generar los diferentes cortes en el acuífero para la zona urbana de Santiago de Cali se partió del modelo regional del acuífero del Valle del Cauca (CVC, 2016) para construir el modelo local, e incluyendo la información nueva recopilada en el desarrollo del PMAA, se ajustó el modelo a escala local. Entre la información incluida para la definición de la geometría del acuífero se encuentran los cortes, geología, correlaciones litológicas y descripciones del subsuelo de estudios anteriores (ACODAL & DAGMA, 1998; INGEOMINAS & DAGMA, 2005; SAF & DAGMA, 2000), los mapas recientes de geología disponibles a partir de la Microzonificación Sísmica para Santiago de Cali (MZSC), las nuevas columnas litológicas digitalizadas en el marco del proyecto y los registros eléctricos disponibles. En total se utilizaron 612 columnas litológicas entre las columnas de los pozos perforados, y columnas provenientes de los estudios de suelos de obras de infraestructura (en Anexo digital “Guía técnica del modelo” con los detalles técnicos del modelo numérico).

Se seleccionaron los cortes del acuífero regional en el área de estudio del PMAA, y se detallaron con la información nueva disponible para llegar a la escala de estudio del PMAA. Los cortes fueron realizados en sentido Noroeste-Sureste y Suroeste-Noreste, en direcciones perpendiculares y paralelas a las formaciones y estructuras geológicas. Se seleccionaron 9 cortes a partir del modelo regional, para definir los cortes a escala urbana, y se creó además uno nuevo a lo largo del río Cauca para definir de manera más detallada la estructura de la unidad B para Cali a lo largo del río (Figura 3-5).

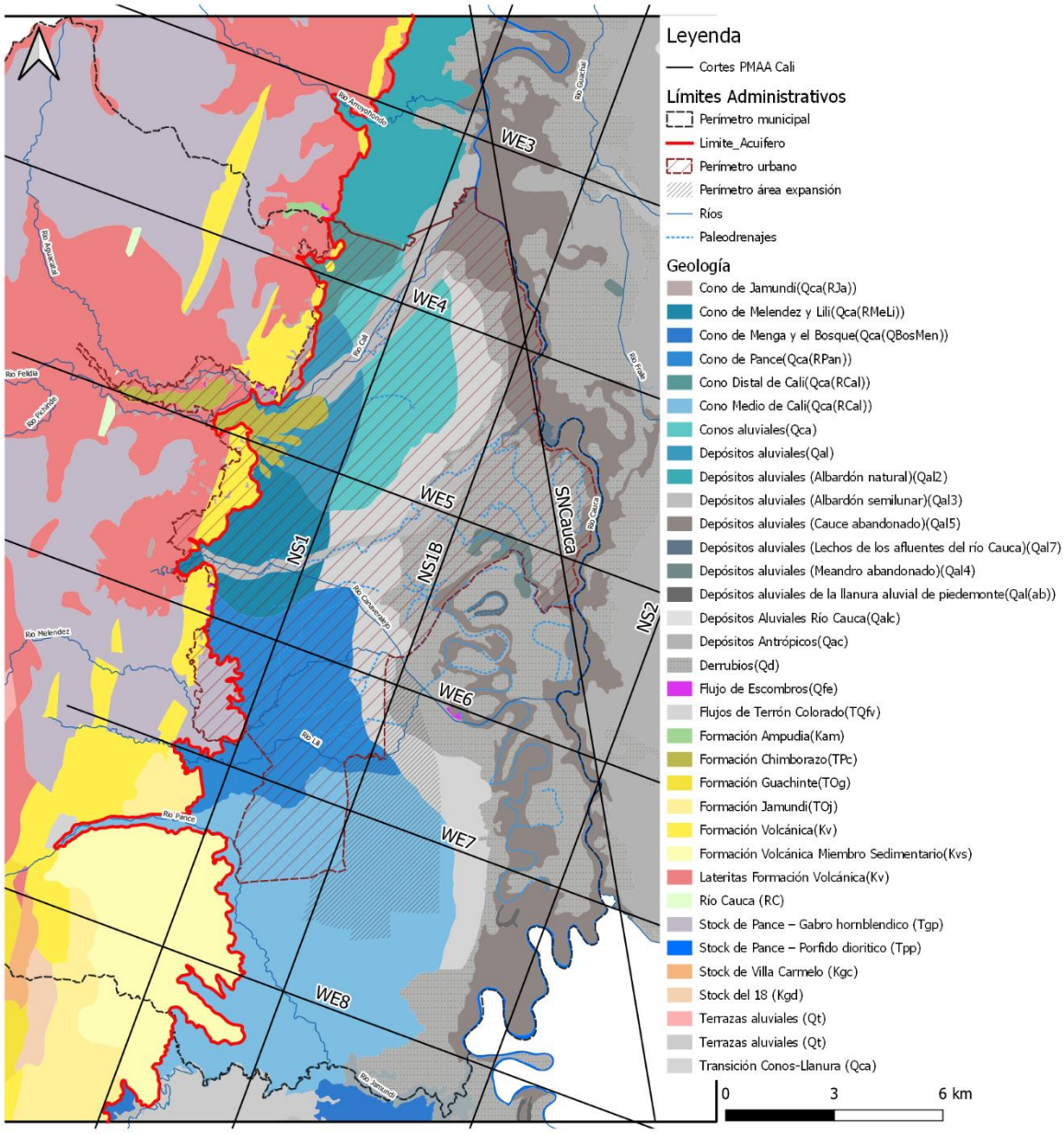


Figura 3-5 Cortes generados para definir la geometría del acuífero en Santiago de Cali

Entre los insumos utilizados para detallar los cortes que definen la geometría del acuífero se encuentran:

Correlaciones existentes:
En el Estudio de Aguas Subterráneas para Santiago de Cali (ACODAL & DAGMA, 1998), se desarrollaron algunos cortes geológicos a partir de las columnas litológicas disponibles en ese entonces. Esta información fue utilizada para revisar los nuevos cortes hidrogeológicos para el PMAA.

Para la definición de la morfología de la Unidad B, el corte A se usó para revisar el nuevo corte WE4; el corte B para el WE5, el C para el WE7 y el D para el corte NS1B (Figura 3-6). Utilizando información de nuevas columnas litológicas, se determinó la geometría de la capa B a lo largo del corte. Las columnas que se usaron fueron aquellas localizadas hasta una distancia máxima

de 500 metros del corte, o de 1000 metros para los cortes en los que había escasas columnas disponibles.

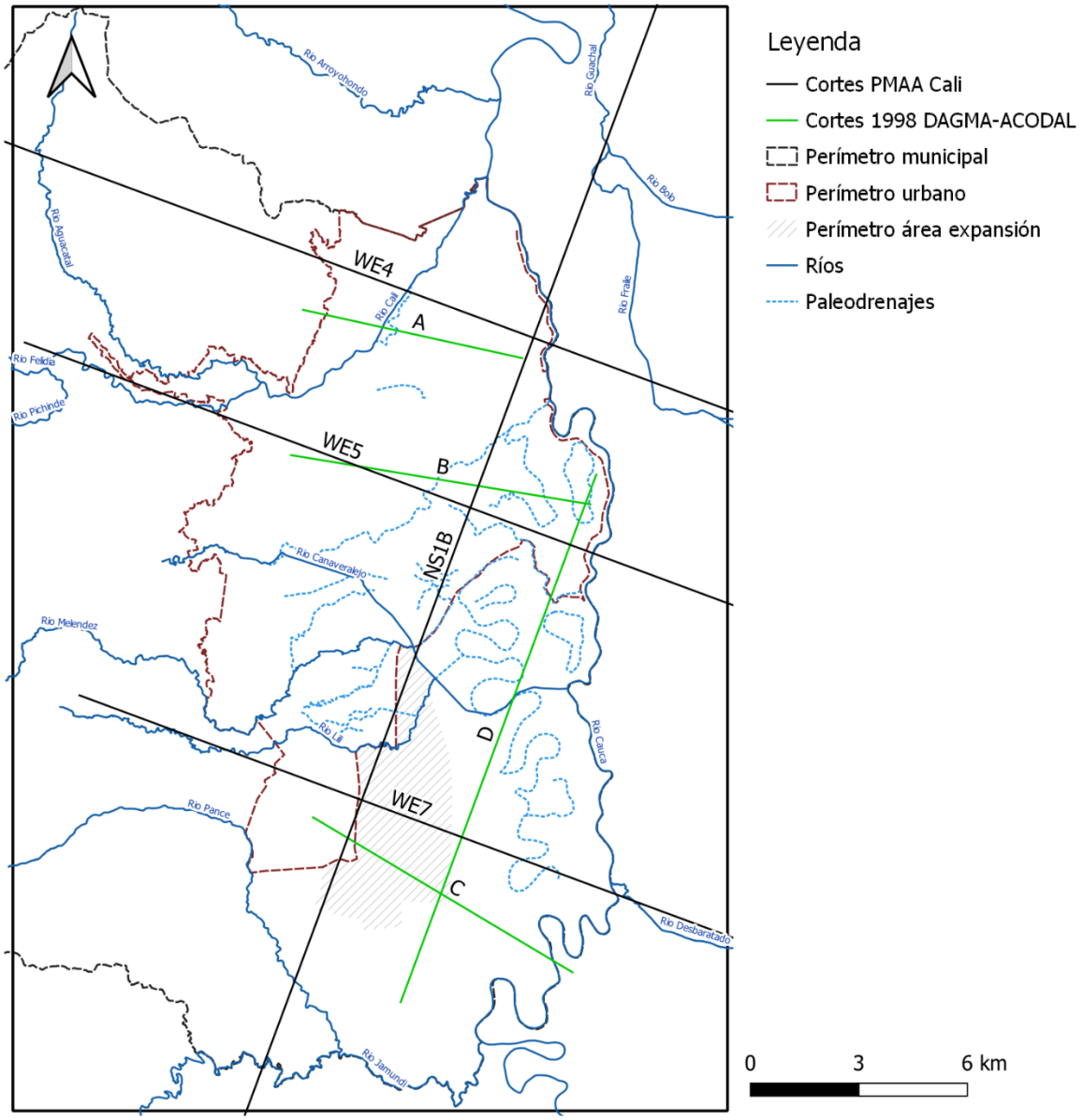


Figura 3-6 Cortes del estudio de Aguas Subterráneas para Santiago de Cali, 1998

En la Figura 3-7 se presenta un ejemplo del corte regional WE5 en el que la geometría de la capa B fue detallada utilizando la información de las columnas nuevas disponibles.

Después de consolidar toda la información, se concluyó que la capa B, en las cercanías al río Cauca en las inmediaciones de la ciudad de Cali, se localiza a una profundidad aproximada de entre 40 y 50 metros y tiene un espesor aproximado de entre 60 y 80 metros.

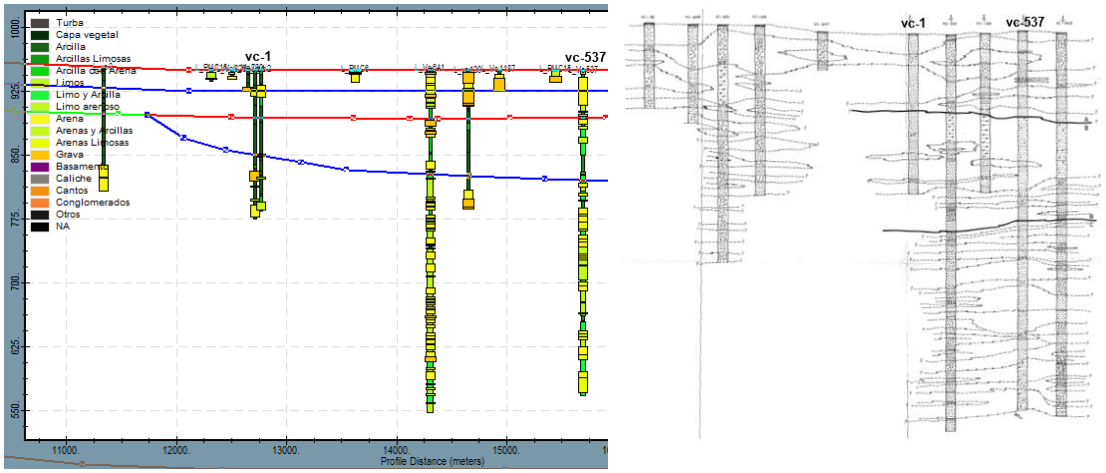


Figura 3-7 Comparación corte WE5 y corte B del estudio DAGMA-ACODAL

Como una guía para detallar el contacto del basamento con la cuenca sedimentaria, que para este caso corresponden a las formaciones volcánicas, se utilizaron los cortes generados en el componente de geofísica del estudio de la MZSC (Figura 3-8). Esta forma del basamento fue utilizada para los cortes en sentido Noroeste-Suroeste. Se debe tener en cuenta que existe incertidumbre sobre el contacto del basamento con la cuenca sedimentaria, que se traduce en incertidumbre sobre los espesores de los conos aluviales.

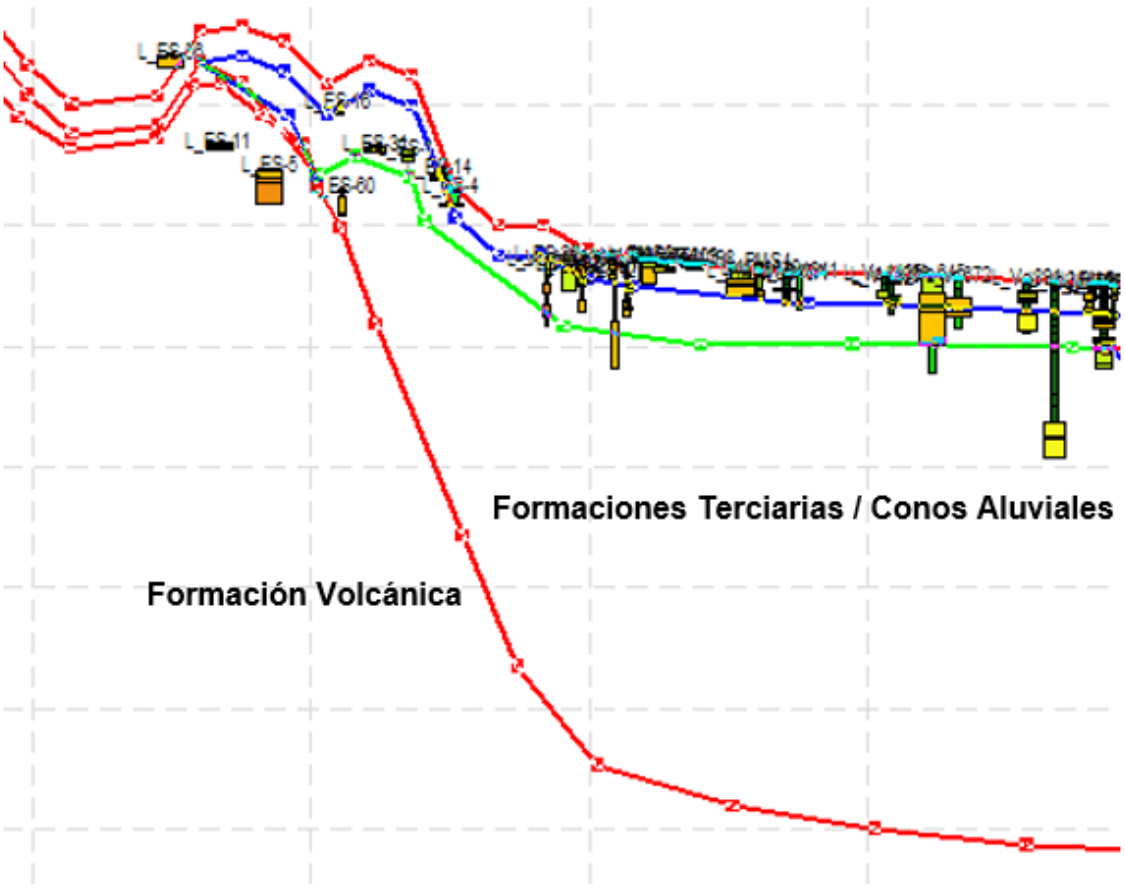


Figura 3-8 Forma de contactos entre formaciones volcánicas y terciarias/cuaternarias adoptados de la MZSC para el modelo

Contactos geológicos entre formaciones volcánicas y terciarias/cuaternarias en planta:
Para una mejor definición del basamento del modelo y de la capa B, se tomaron los contactos geológicos entre las formaciones volcánicas y las formaciones terciarias/cuaternaria.

La capa B se encuentra bien definida en las llanuras aluviales, nace de oeste a este en las formaciones de transición entre los conos aluviales y las llanuras, desapareciendo hacia los conos aluviales. La Figura 3-9 presenta como ejemplo la transición en la geología detallada para el corte WE4, con el fin de definir mejor la Unidad B.

Figura 3-9 Geología superficial detallada empleada para la para definición del contacto superficial del basamento y la geometría de la capa B

Nuevas columnas litológicas:
Durante la fase de aprestamiento se recopilaron las columnas litológicas disponibles en la zona urbana de la ciudad. Un total de 361 columnas litológicas correspondientes a pozos (223), pozos de monitoreo (48), estudios de suelos para obras urbanísticas (70) y estudios de suelos realizados en el área de Navarro (20). Esta información se tuvo en cuenta para detallar la definición de la capa B en el área de estudio.

La Figura 3-10 presenta un ejemplo del uso de las nuevas columnas para detallar la definición de la capa B, específicamente en el corte SN-Cauca, a lo largo del río Cauca. Los colores naranjas y amarillos con mayores espesores representan los materiales más gruesos, como gravas y arenas, mientras que los colores verdes, representados con menores grosores, representan materiales más finos, como arcillas o limos, que al encontrarse de manera general en diferentes columnas representan la presencia de la capa confinante B.

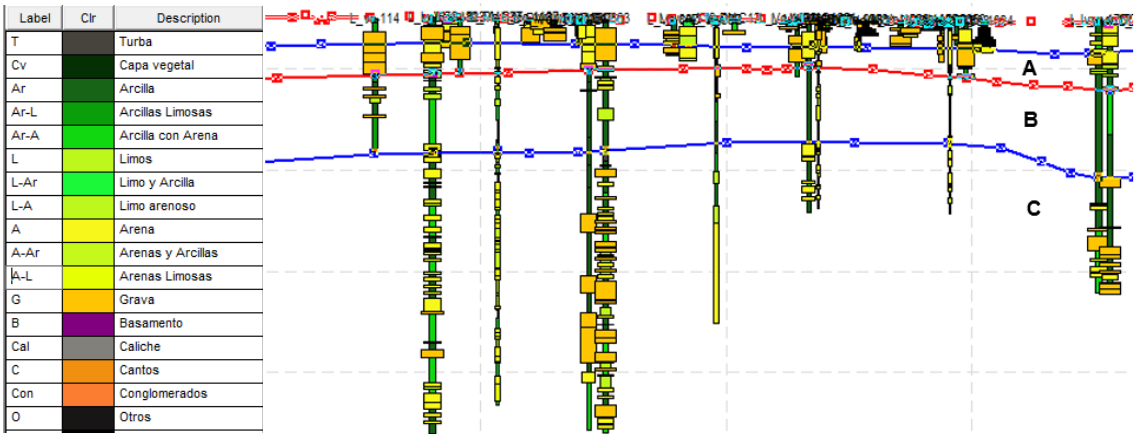


Figura 3-10 Columnas litológicas utilizadas para mejorar definición de la capa B y su leyenda descriptiva

Registros Eléctricos:
Con los registros eléctricos disponibles se validaron los cortes principalmente en los conos aluviales, donde posiblemente existe una mezcla de material grueso embebido en arcilla y menor proporción de materiales impermeables como arcillas y limos.

De la Figura 3-11 a la Figura 3-20 se presentan los 10 cortes que describen la geometría detallada del acuífero en el municipio de Cali, 1) con las columnas litológicas utilizadas para cada corte, 2) los límites del área del modelo, 3) los límites administrativos, y 4) los ríos.

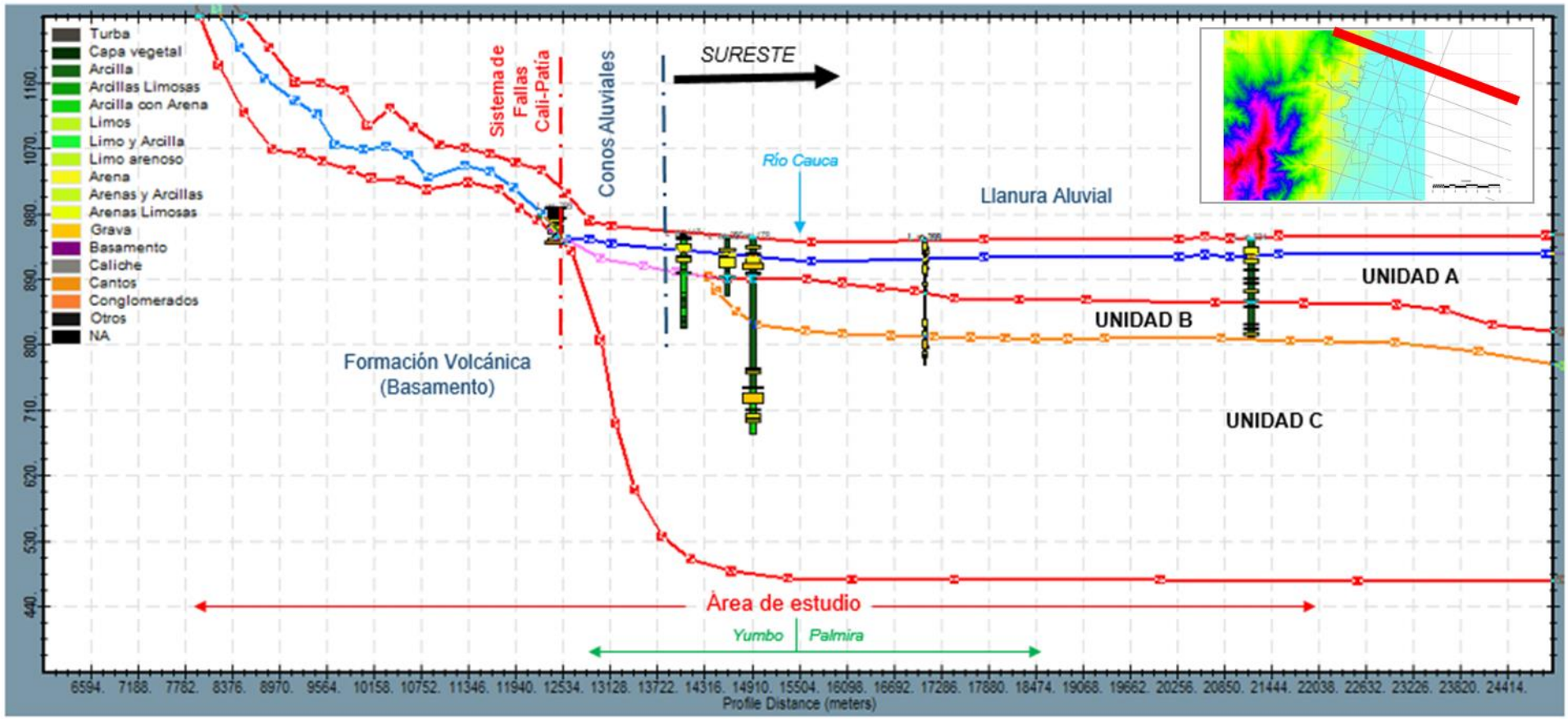


Figura 3-11 Corte sentido noroeste-sureste WE3.

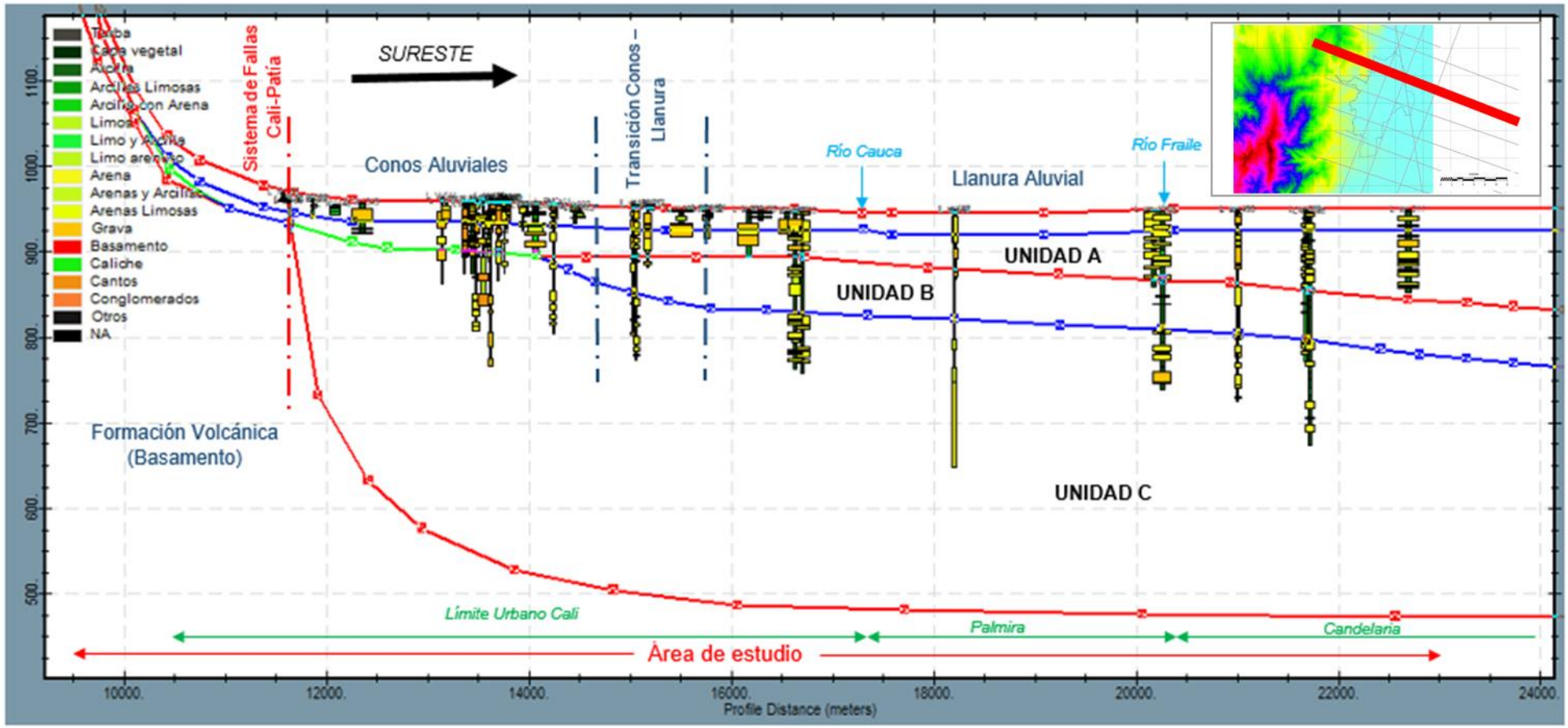


Figura 3-12 Corte sentido noroeste-sureste WE4.

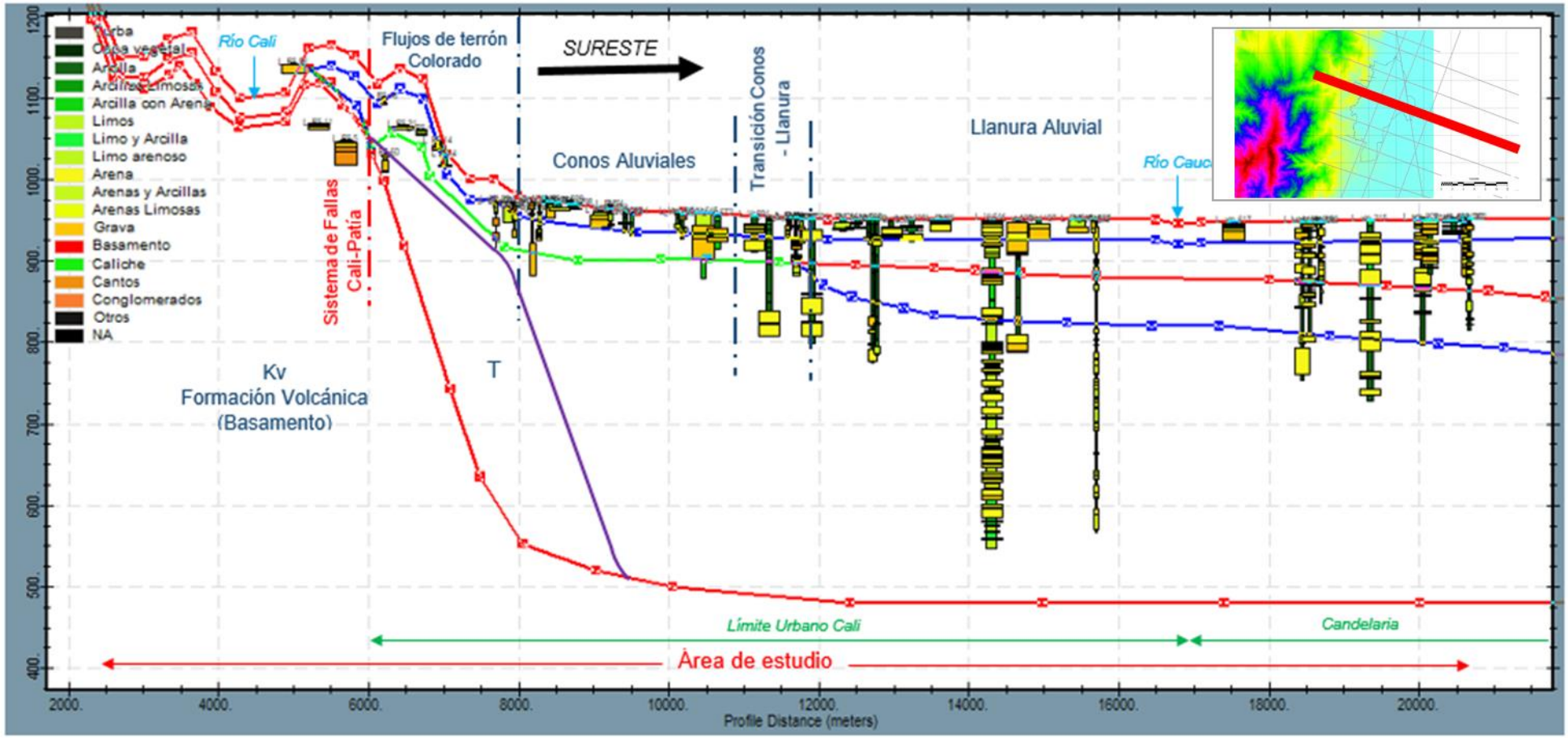


Figura 3-13 Corte sentido noroeste-sureste WE5.

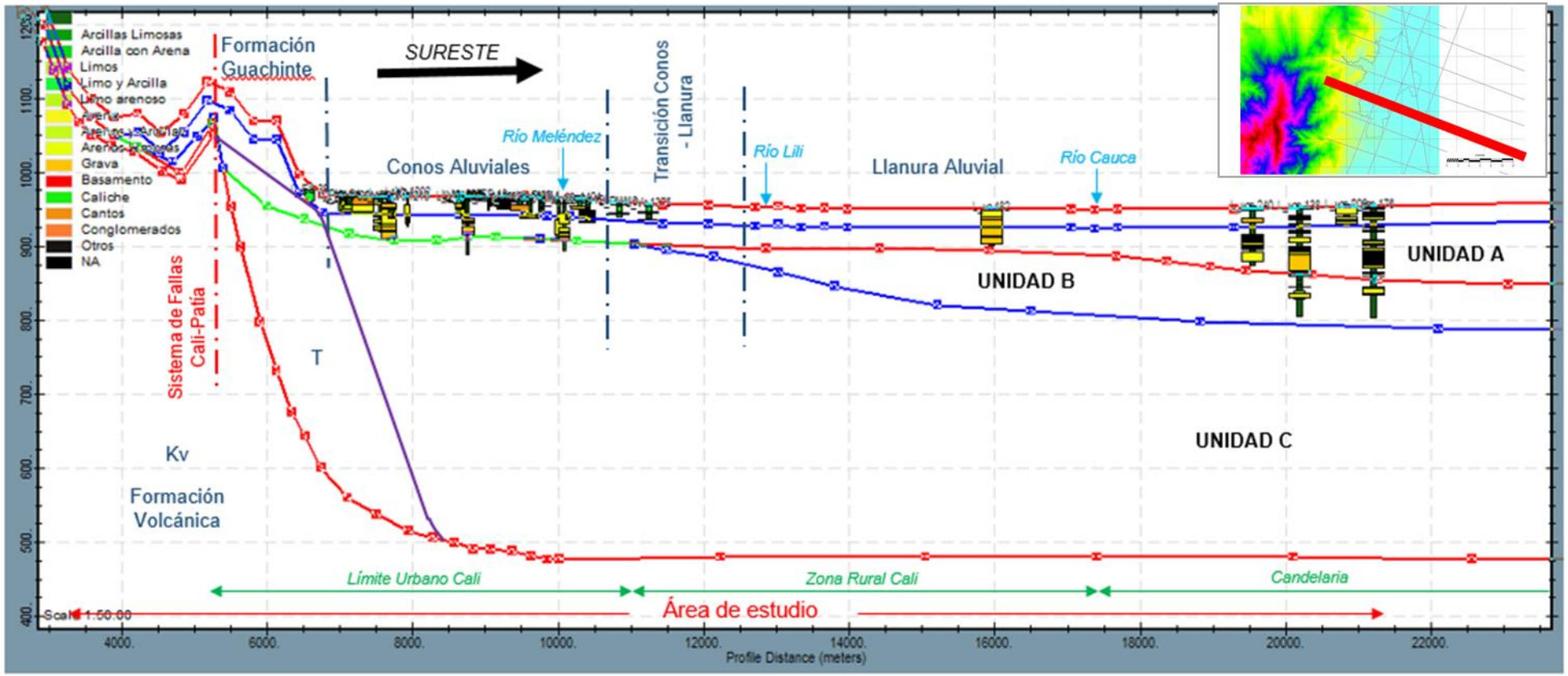


Figura 3-14 Corte sentido noroeste-sureste WE6.

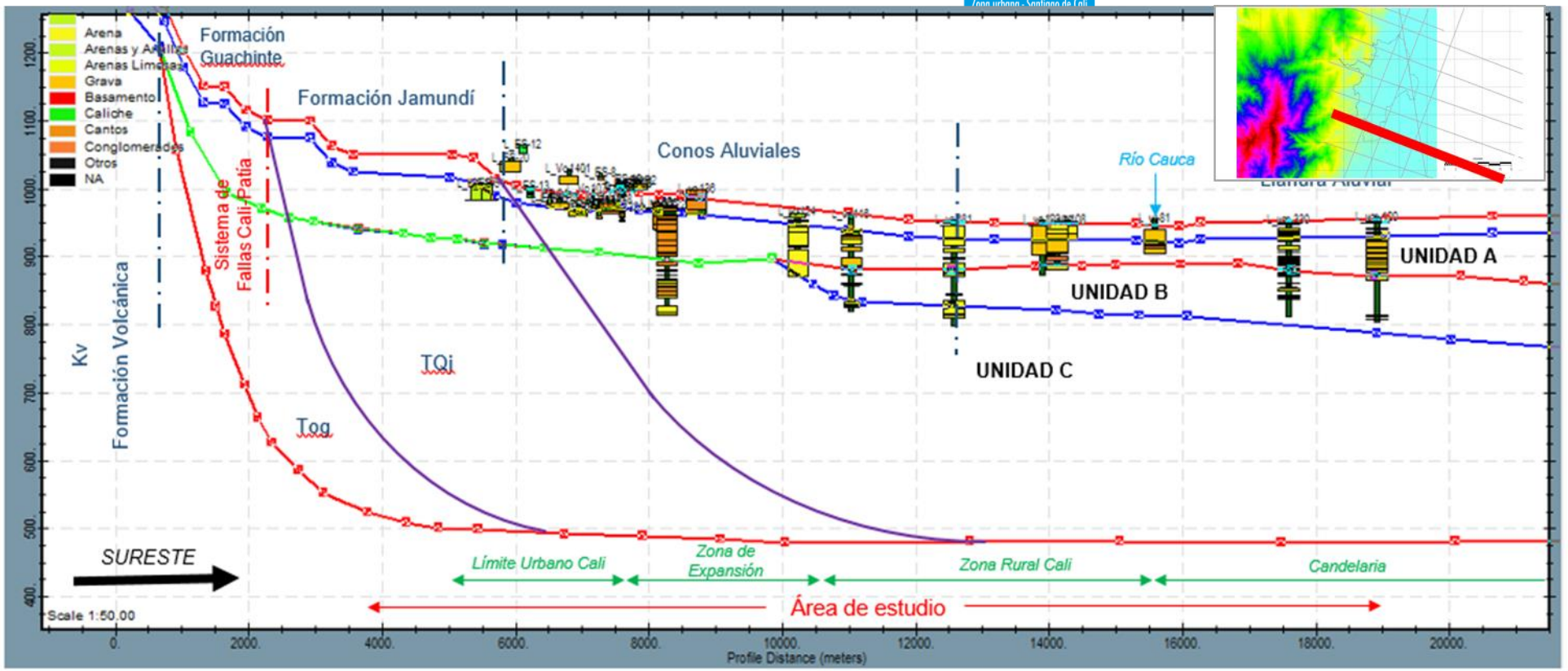


Figura 3-15 Corte sentido noroeste-sureste WE7.

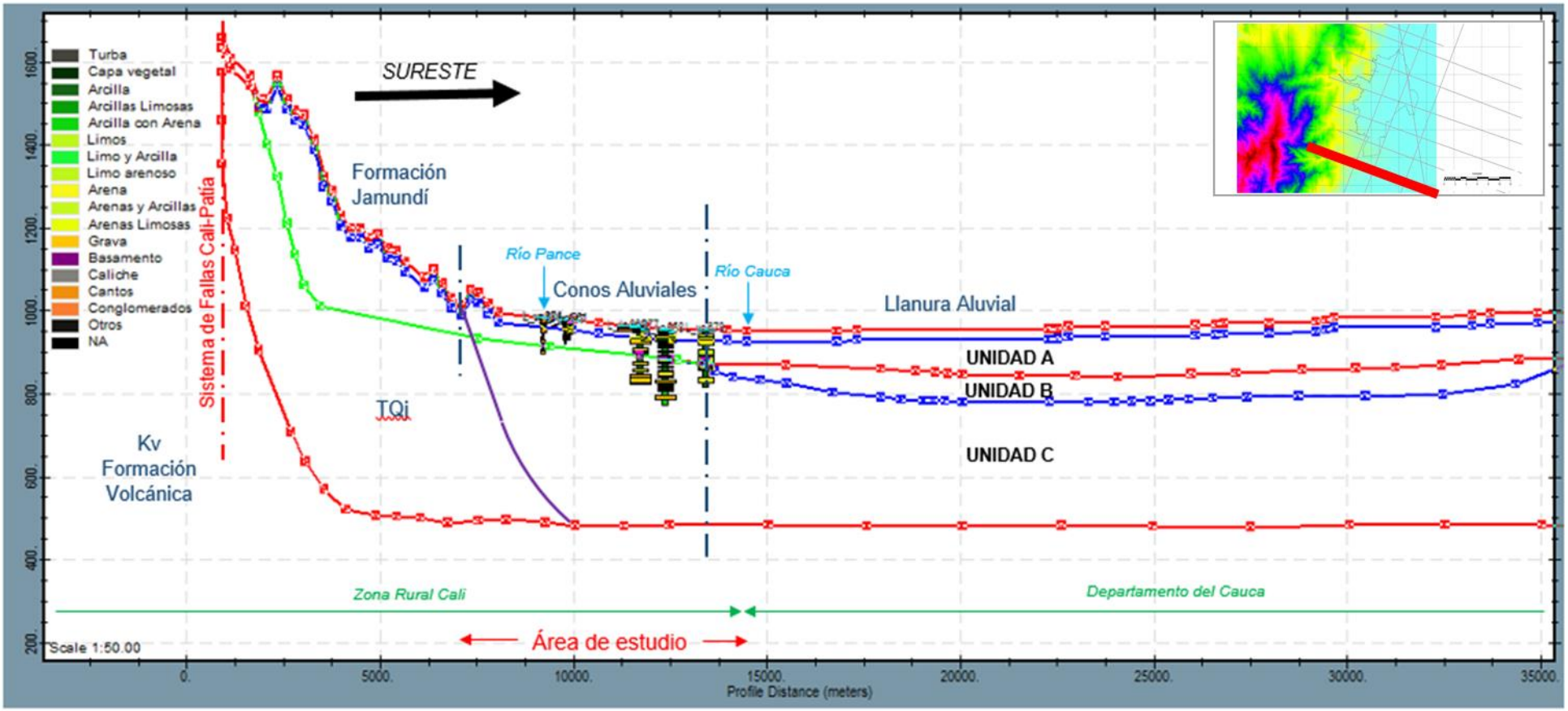


Figura 3-16 Corte sentido noroeste-sureste WE8.

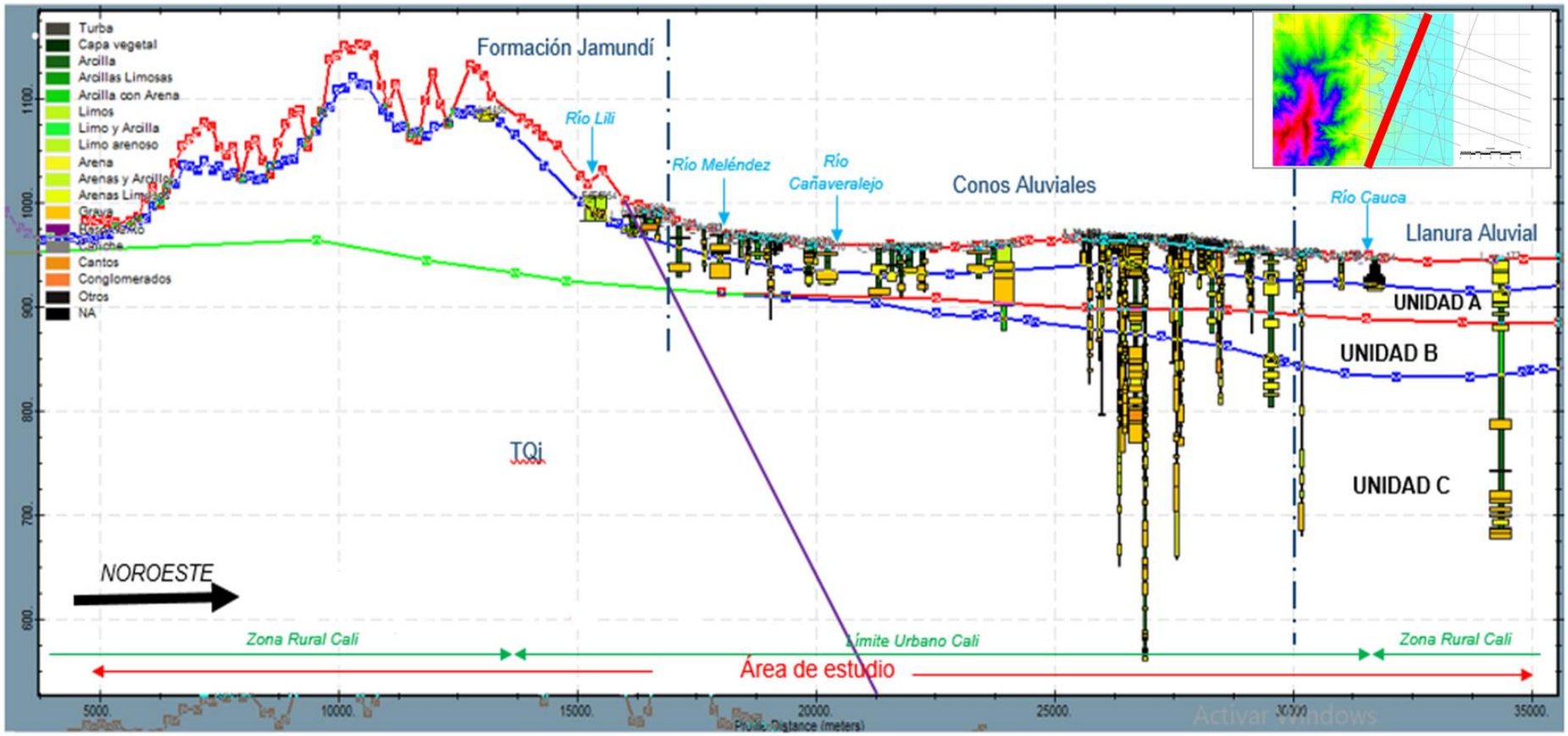


Figura 3-17 Corte sentido suroeste-noreste SN1.

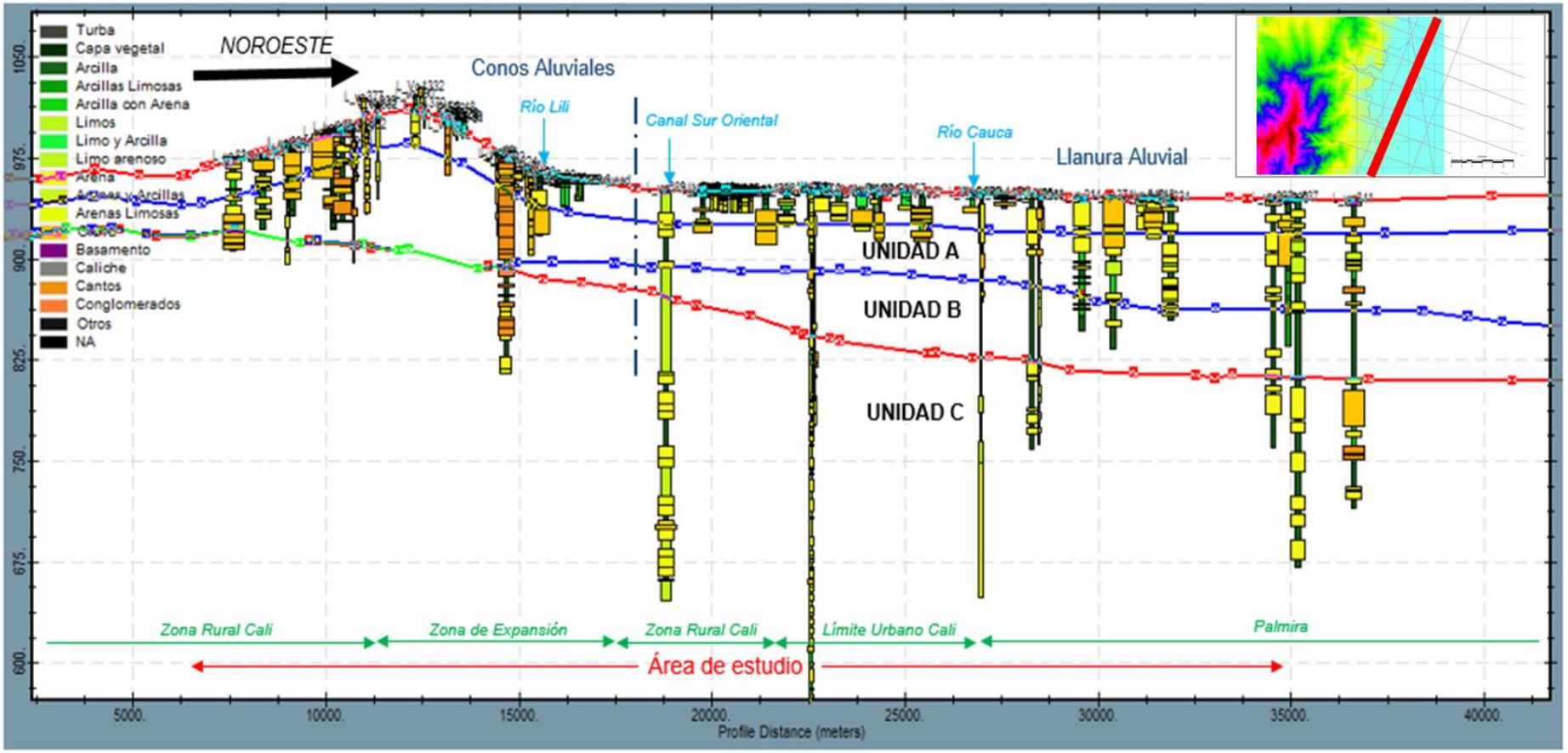


Figura 3-18 Corte sentido suroeste-noreste SN1B.

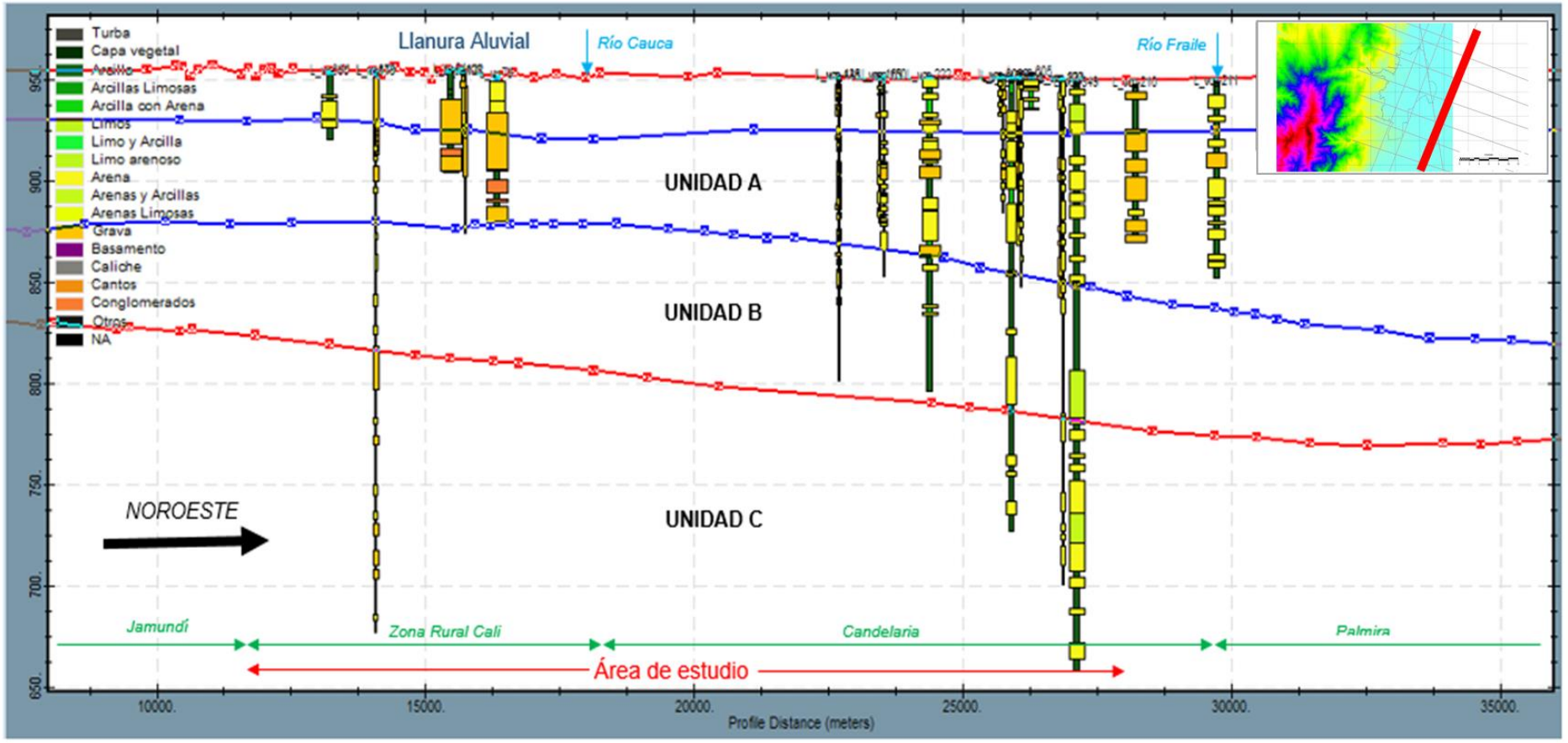


Figura 3-19 Corte sentido suroeste-noreste SN2.

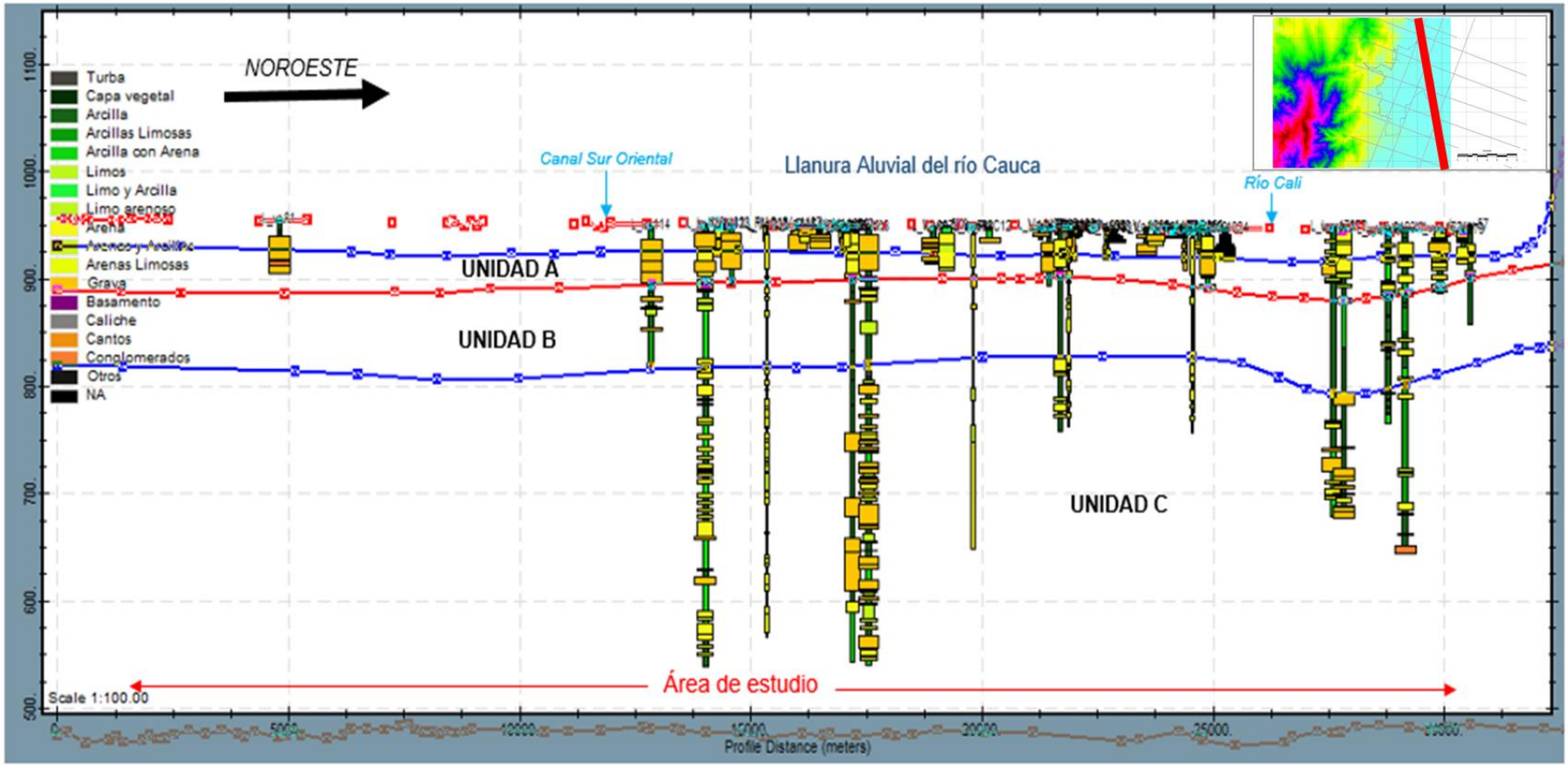


Figura 3-20 Corte sentido suroeste-noreste SN-Cauca.

A continuación, se presenta una descripción tipo de las unidades hidrogeológicas del acuífero en el municipio de Cali, a partir de la geometría definida por medio de los cortes generados y del análisis de la geología.

La Unidad A se encuentra conformada, al occidente, por los abanicos aluviales (Qab) de los ríos Cali, Cañaveralejo, Meléndez-Lili y Pance. En el límite oriental se encuentran los depósitos de llanura aluvial del río Cauca (Qalc), con una zona de transición entre los abanicos y la llanura aluvial (Qab-alc) (Figura 3-21). Las características de los materiales que conforman los conos aluviales están relacionadas con los flujos torrenciales de los ríos asociados a cada abanico y por el tipo de rocas que conforman las cuencas tributarias. En general la parte más distal de estos abanicos está conformada por materiales finos, mientras que hacia el ápice los materiales son más gruesos y mal gradados (INGEOMINAS, 2005).

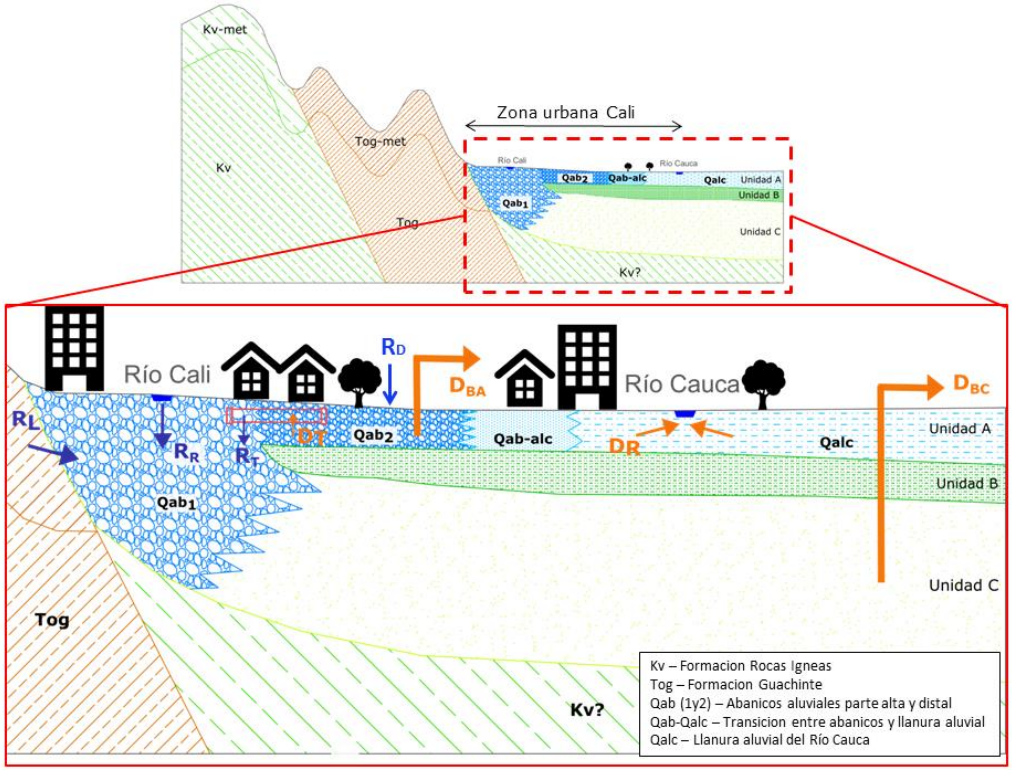


Figura 3-21 Corte tipo de la geometría de las unidades hidrogeológicas en Santiago de Cali.

A continuación, se presenta una descripción de cada abanico aluvial de acuerdo con la microzonificación sísmica de Cali (INGEOMINAS, 2005b) y al análisis de las columnas litológicas analizadas.

- Abanico de Cali - Qca(RCal): este abanico es de gran extensión. La parte alta se caracteriza por la presencia de una capa superficial de arcillas limosas, que en cercanía del río Cali no es mayor a 5 metros y alcanza espesores de hasta 15 metros en la parte distal del abanico. Este estrato suprayace una serie de intercalaciones de materiales gravosos de varios metros de espesor compuesto por grandes cantos y bloques, en su mayoría subredondeados.
- Abanico de Cañaveralejo - Qca(RCan): Presenta materiales finos de origen volcánico. Esto se debe a que la cuenca tiene una energía de arrastre relativamente baja en comparación con las otras cuencas. En general esta unidad se caracteriza por la presencia de materiales arcillosos y limosos de varios metros de espesor, con

intercalaciones de capas de material orgánico y esporádicamente se encuentran lentes de arena fina y algunas gravas.

- Abanico Meléndez Lili - Qca(RMelLil): Se caracteriza por la presencia de una capa superficial de materiales limosos de hasta 10 metros de espesor, suprayaciendo a estratos granulares con cantos, gravas y bloques de rocas diabásicas de formas angulares a subredondeadas, en matriz areno-arcillosa con intercalaciones de materiales finos predominantemente arcillas duras.
- Abanico de Pance - Qca(RPan): Este abanico se caracteriza por la presencia de una pequeña capa de materiales limosos no mayor a 4 metros de espesor suprayaciendo a un estrato muy duro compuestos de gravas y cantos en matriz arcillosa.

Las Unidades A y C están claramente diferenciadas bajo la zona de llanura aluvial del río Cauca, tal como se puede inferir a partir de los cortes, donde la Unidad B alcanza espesores de hasta 70 metros. En este sector, La Unidad A también alcanza sus espesores máximos, entre 70 y 80 metros. En los abanicos aluviales la Unidad B se pincha, y las Unidad A y C aparecen conectadas formando un solo acuífero. La Figura 3-22 presenta las isópacas del espesor de la Unidad B, donde se observa que la Unidad B aparece a partir de la parte distal de los conos aluviales de los ríos Cali y Pance, y sobre la zona de transición en las cuencas de los ríos Cañaveralejo, Meléndez y Lili.

Las formaciones rocosas localizadas sobre la cordillera occidental de la zona de estudio corresponden a la Unidad de Roca Ígnea (Kv) y La Formación Guachinte (Tog) (Figura 3-21). Aunque estas formaciones han sido consideradas como impermeables en el modelo conceptual del acuífero del Valle del Cauca, es incierta la importancia o magnitud del flujo lateral que pueda llegar al acuífero a través de las fallas o las diaclasas en las rocas ígneas y de las intercalaciones de areniscas de grano fino a grueso de la Formación Guachinte.

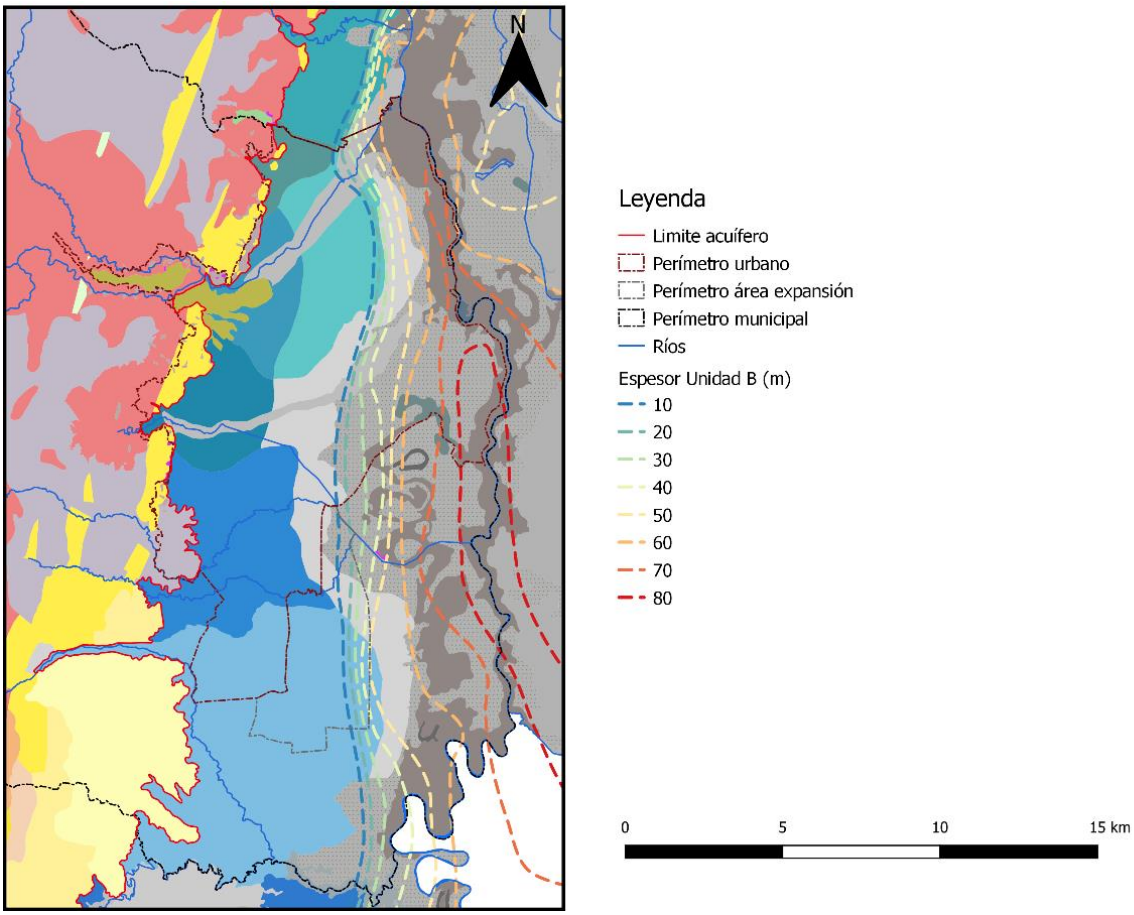


Figura 3-22 Líneas estimadas de espesor de la Unidad B

3.2.3.2 *Propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas*

Para establecer las condiciones hidráulicas de un acuífero es indispensable la estimación de sus parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica, la transmisividad y la capacidad específica. Estos parámetros pueden estimarse mediante análisis de la litología presente en cada unidad hidrogeológica y/o pruebas de bombeo. Estas últimas se utilizan también para estimación de recursos, para inferir el comportamiento de un acuífero ante regímenes de extracción de agua y, para determinar los caudales de explotación, entre otros (MADS, 2014).

A continuación, se presentan los parámetros hidráulicos principales estimados a partir de las pruebas de bombeo existentes y recopiladas en la fase de aprestamiento, así como también estimaciones de conductividades hidráulicas a partir de las columnas litológicas.

3.2.3.2.1 Propiedades estimadas a partir de pruebas de bombeo

Transmisividad (T)

Se define como el volumen de agua por unidad de tiempo (o caudal) que pasa a través de una sección vertical de ancho unitario y de altura b, siendo b la altura de la zona saturada. De acuerdo a la caracterización del acuífero superior para la zona urbana del municipio de Santiago de Cali (SAF & DAGMA, 2000), las transmisividades en la zona presentan valores en

un rango entre 5 y 400 m^2/día y representan el grado de capacidad física de los diferentes estratos permeables de dejar fluir el agua.

Con la distribución espacial de las transmisividades, se puede definir la zonificación de los valores de este parámetro de acuerdo a las zonas principales del acuífero de la siguiente manera (Figura 3-23):

- Hacia el piedemonte y la parte media alta de los conos aluviales se encuentran valores de entre 5 y 30 m^2/ día, delimitando acuíferos relativamente pobres o de poco espacio.

- En la parte distal de los conos aluviales, la transmisividad aumenta, con valores entre 30 y 100 m^2/día.

- Los valores máximos de entre 100 y más de 500 m^2/día se localizan hacia el este de la zona de estudio en las cercanías al río Cauca, en la zona de descarga del acuífero. Esta zona está representada en una franja que tiene alrededor de 1 km de ancho (sentido este-oeste) al oeste del río Cauca en el norte del área urbana, se ensancha a alrededor de 3 km hacia el centro y se cierra un poco de nuevo al sur, en las intermediaciones del área de expansión con unos 2 km.

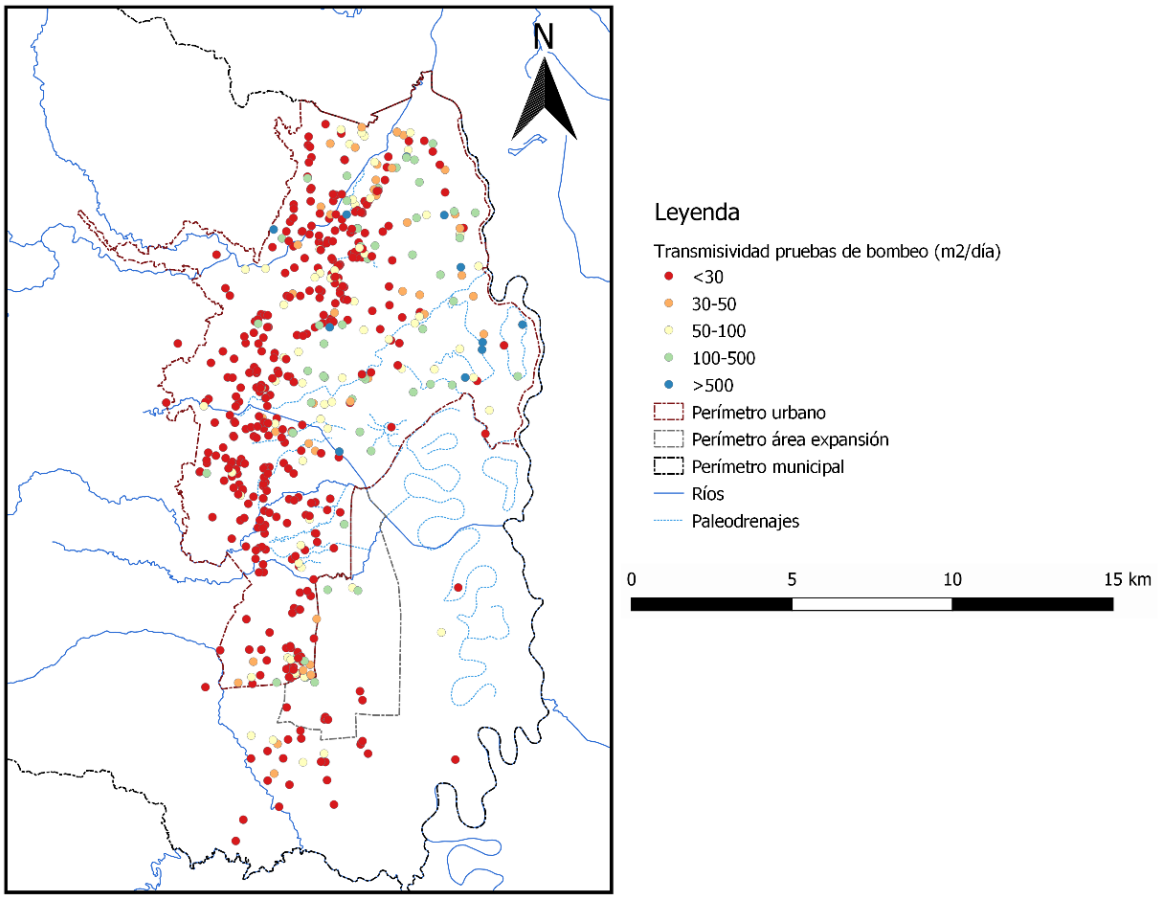


Figura 3-23 Transmisividad a partir de pruebas de bombeo en pozos que captan la Unidad A.

Capacidad específica (Q/s)

Se define como la relación entre el caudal bombeado (Q) y el abatimiento o descenso de nivel en el pozo (s). El objeto fundamental de este valor es establecer la productividad relativa de una captación, y en la medida en que se disponga de información representativa, clasificar las unidades hidrogeológicas. Las capacidades específicas estimadas a partir de las pruebas de bombeo (Figura 3-24) pueden clasificarse espacialmente en seis zonas (SAF & DAGMA, 2000):

- Hacia el occidente, bordeando el piedemonte de la cordillera occidental, en la parte alta de los conos aluviales, se encuentran valores de entre 0.1 y 0.3 l/s/m. Esta se considera la zona de producción más baja con los menores rendimientos.

- En una franja hacia la parte baja de la zona anterior se encuentran valores de entre 0.3 y 0.5 l/s/m, estos rendimientos se extienden en la cuenca del río Cali abarcando cerca del 80% de esta cuenca.

- Hacia la parte media y distal de los conos del acuífero, y siguiendo la sinuosidad que rige el comportamiento hidráulico y que coincide con la geología, se hallan valores de entre 0.5 y 1 l/s/m.

- Hacia las zonas de transición entre los conos aluviales y la llanura aluvial del río Cauca, se presentan dos zonas con valores de entre 1 y 4 l/s/m.

- Finalmente, en el sector aledaño al río Cauca, a medida que se profundiza en el acuífero sus rendimientos se optimizan en gran magnitud. En esta zona, donde actualmente se dispone de poca información de pruebas de bombeo, se pueden encontrar valores superiores a los 4 l/s/m.

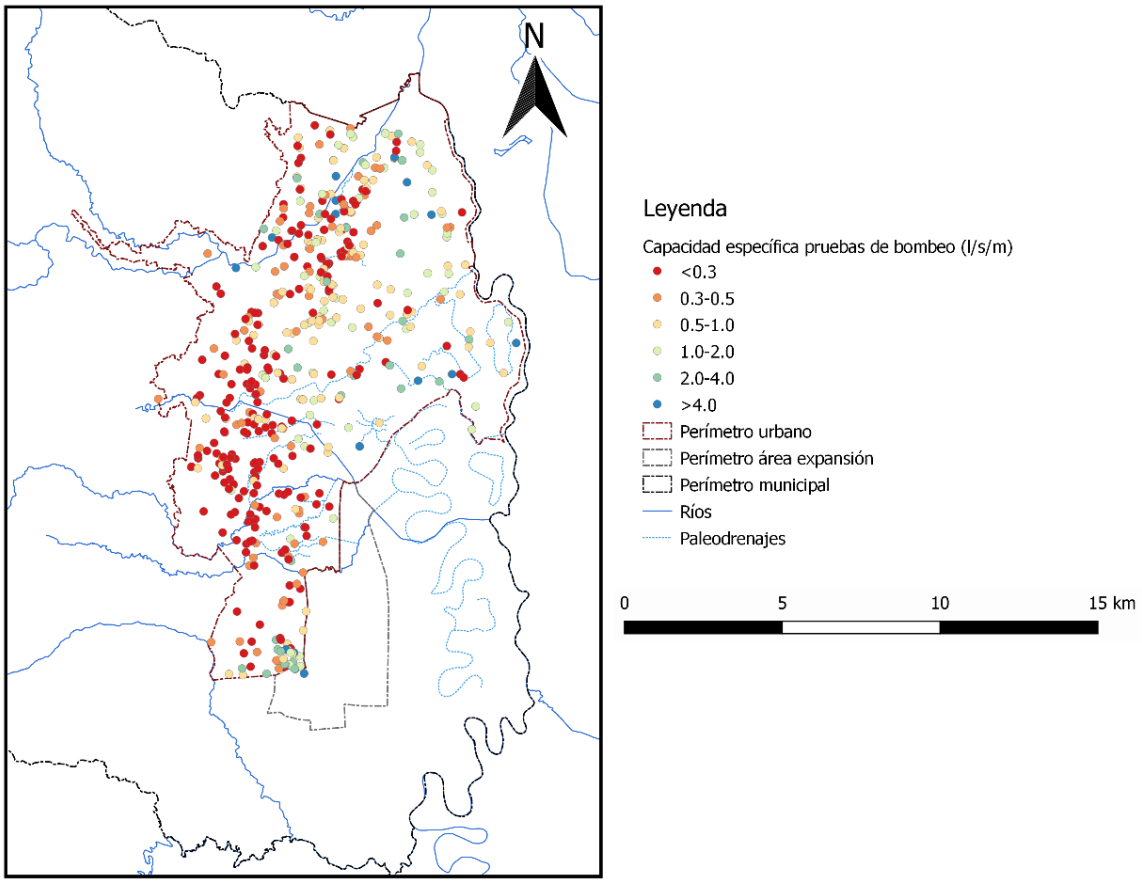


Figura 3-24 Capacidad específica de pruebas de bombeo en pozos que captan la Unidad A.

3.2.3.2.2 Análisis a partir de columnas litológicas

Conductividad hidráulica (K):

La conductividad hidráulica es la capacidad de un medio poroso que permite el movimiento del agua, usualmente las unidades más permeables son los depósitos sedimentarios fluviales, aluviales, coluviales, lacustres y lagunares. La conductividad hidráulica depende, básicamente, de la cantidad de finos, del grado de compactación y de cementación de los depósitos o rocas.

Para el diagnóstico de las aguas subterráneas en la zona urbana de Cali, se realizó la estimación de las conductividades hidráulicas a partir de las columnas litológicas de los pozos y de perforaciones hechas para los proyectos de construcción. La metodología utilizada se presenta a continuación.

1) Primero, se asignaron unos valores de conductividades hidráulicas determinados por expertos a cada clase litológica (haciendo la suposición de que no hay anisotropía dentro de la misma clase). Los valores que se asignaron a cada litología quedan resumidos en la tabla (Tabla 3-1).

Tabla 3-1 Conductividades hidráulicas asignadas a cada clase litológica. Fuente: producción propia de acuerdo al conocimiento de expertos locales

Clase litológica	Nombre	K (m/d)
A	Arena	20
A-L	Arena con Limo	3
A-Ar	Arena con Arcilla	3
L	Limo	1
L-A	Limo con Arena	1
L-Ar	Lino con Arcilla	1
Ar	Arcilla	10^{-4}
Ar-A	Arcilla con Arena	10^{-2}
Ar-L	Arcilla con Limo	10^{-3}
T	Turba	10^{-4}
G	Gravas	55
C	Cantos	55
B	Basamento	10^{-6}
Cal	Caliche	10^{-6}
Con	Conglomerados	55
O	Otros	-

2) Se calculó la conductividad hidráulica horizontal (kh) equivalente para la Unidad A mediante la siguiente expresión:

$$K_{eq} = \frac{\sum b_i K_i}{espA}$$

Donde b_i es la longitud de cada litología en la porción del pozo que cae dentro de la Unidad A, K_i es la conductividad hidráulica de la clase litológica, espA es el espesor de la Unidad A, y K_{eq} es la conductividad hidráulica equivalente de la Unidad A.

3) Se interpolaron las conductividades hidráulicas entre los pozos utilizando la metodología de interpolación Kriging.

Los mayores valores de conductividad para el área de estudio se encuentran hacia las cuencas de los ríos Cali y Pance, así como también en algunas áreas al oriente de la ciudad que coinciden con la presencia de paleodrenajes y humedales actualmente existentes, ubicados en la zona de descarga del acuífero (Figura 3-25). Particularmente, se destaca hacia el norte el área del río Cali ubicada aguas debajo de la confluencia con el río Aguacatal y hacia la zona centro de la ciudad; hacia el sur, el área con mayores conductividades corresponde a la comuna 22 y al área de expansión cercana a la margen derecha del río Lili. En el oriente de la ciudad y fuera del área urbana actual, se resalta una franja cercana al río Cauca de aproximadamente 2 km con valores de conductividad del orden de los 25 a 50 m/día.

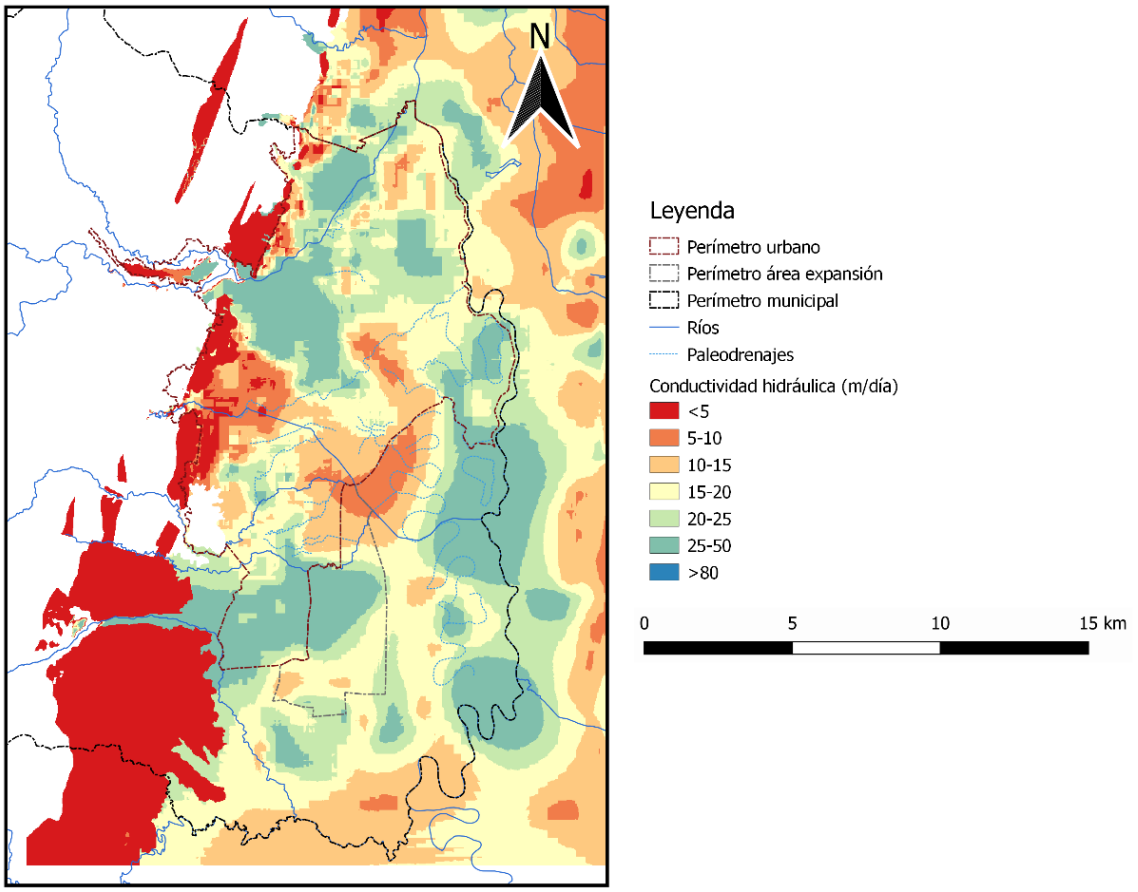


Figura 3-25 Conductividad hidráulica equivalente para la unidad A del acuífero

3.2.4 Captaciones de aguas subterráneas

Un punto de agua subterránea, es un lugar u obra civil que permite el acceso al agua subterránea, incluyendo pozos, aljibes, o surgencias naturales que corresponden a descargas del acuífero de acuerdo al MADS (2014). Además, en el contexto urbano, se pueden considerar como puntos de agua, afloramientos de aguas subterráneas causadas por construcciones, que pueden aparecer durante la construcción, o una vez ésta ha terminado, como en sótanos o galerías filtrantes.

La información recopilada y espacializada de las captaciones de agua facilita el desarrollo de análisis territoriales, tales como la distribución espacial de puntos de agua por unidades geológicas, por rangos de profundidad, por tipos de captación, por tipo de uso del agua, por rangos de caudales aprovechados o mapas de parámetros fisicoquímicos, entre otros (MADS, 2014). La información de las captaciones de agua permite también analizar los niveles del acuífero y determinar zonas de recarga, descarga y de tránsito.

Para este estudio se realizó un inventario de puntos de agua subterránea con base en la información presente en el inventario general de puntos del DAGMA, registros históricos de consumos en las bases de datos de la autoridad ambiental, información que aún reposa en los archivos de la CVC, y se complementó con información digitalizada de los expedientes de agua subterránea del archivo del DAGMA.

Los puntos de agua relacionados con construcciones no están inventariados a día de hoy y por lo tanto no se pudieron utilizar para este estudio. Sin embargo, cabe resaltar la importancia de este inventario para conocer el agua que se drena a través de dichos puntos.

A continuación, se presenta el inventario de puntos a partir de la información recopilada, y su clasificación de acuerdo a la ubicación espacial, usos, y estado de los pozos. Además se recopiló información sobre consumos, diseños, litologías, información hidroquímica, pruebas de bombeo y niveles que fueron usados durante la fase del diagnóstico.

Inventario de puntos de agua subterránea:

A partir del inventario de puntos de aguas subterráneas en el DAGMA se identificaron 819 pozos en la jurisdicción de la entidad a inicios de 2018. Además, para la zona urbana se cuenta con registros históricos de 66 pozos de la base de datos de CVC.

Para el área de expansión de la zona urbana se tienen 38 puntos, 96 dentro del área rural del límite municipal y 282 correspondientes a los municipios de Yumbo, Palmira y Candelaria, en los límites de influencia del sistema hidrogeológico para Cali. Para el inventario final entonces se dispone de un total de 1301 puntos de aguas subterráneas. De estos puntos, 1160 son puntos de agua activos, con coordenadas y con información que permite aportar al diagnóstico de las aguas subterráneas en la zona (Figura 3-26).

En la Tabla 3-2 se presenta la cantidad de puntos ubicados en las zonas urbana, urbana de expansión, rural de Santiago de Cali y en los municipios vecinos que hacen parte del área de estudio.

Tabla 3-2 Puntos de agua subterránea por zonas

Área	**Total**
Urbana	744
Urbana - Expansión	38
Rural Santiago de Cali	96
Municipios Vecinos	282
Total	1160

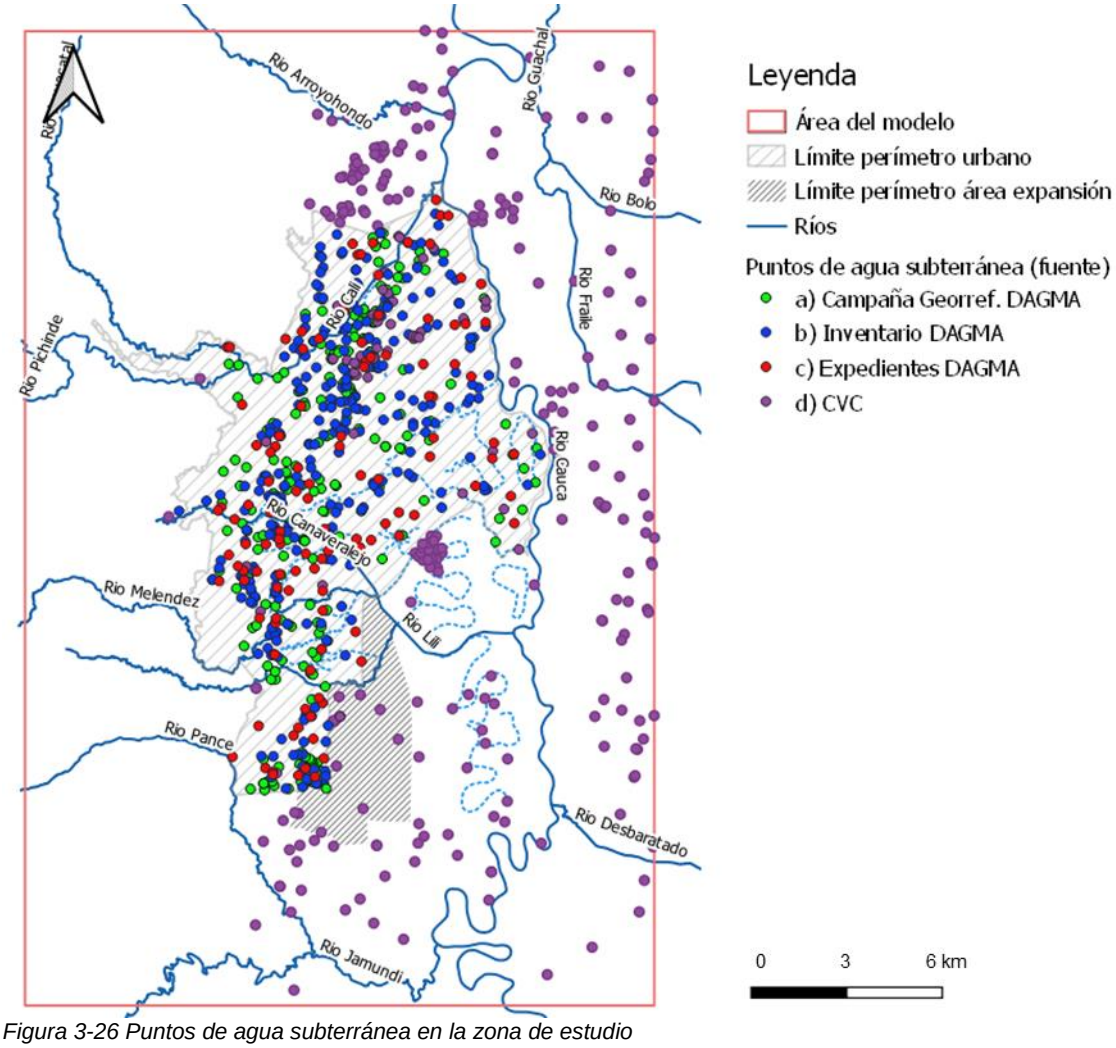


Figura 3-26 Puntos de agua subterránea en la zona de estudio

Respecto al estado de los 819 pozos bajo la jurisdicción del DAGMA, existen 542 pozos activos que a la fecha cuentan con una resolución y caudal otorgado o se encuentran en trámite, 211 pozos inactivos que han sido declarados sin uso por los usuarios o presentan un sellado temporal y 66 pozos que han sido sellados definitivamente por los usuarios (Figura 3-27).

Figura 3-27 Estado de los pozos de agua subterráneas

En cuanto a los usos concesionados para el uso del agua, el mayor número de las concesiones está asignado para lavado de vehículos, seguido de las concesiones para riego, principalmente de zonas verdes como parques o canchas. Sin embargo, en cuanto a volumen, la mayor concesión es para el uso industrial. Los detalles de los usos asignados a las extracciones y de los volúmenes asociados se detallan en el título de demanda subterránea, parte del capítulo del balance hídrico.

3.2.5 Recarga

La recarga es el proceso por el cual el agua proveniente de distintas fuentes entra al acuífero. Así, la recarga está compuesta por varios componentes, siendo los principales: 1) la recarga difusa o “areal” dominada por el proceso de infiltración de agua que queda como excedente de precipitación y riego, y 2) la recarga por infiltración en los cauces de los ríos y cuerpos de agua superficial que cruzan la zona. Aparte de estos dos mecanismos, la recarga puede darse por flujos laterales provenientes de otras unidades hidrogeológicas, como las formaciones de la cordillera occidental o por procesos de recarga artificial como la potencial recarga por fugas en las tuberías de suministro de agua potable o alcantarillado.

3.2.5.1 *Estimación de la recarga difusa*

En esta sección se presenta la metodología aplicada para la estimación de la recarga difusa, que se estimó a escala diaria para el período de estudio, 2007-2017. Existen varios métodos para el cálculo de la recarga difusa según los datos de los que se disponga. Entre ellos, los más comunes son los balances hidrometeorológicos, los balances de iones, y las diferencias de niveles piezométricos. En este estudio se utilizó un método basado en un balance hidrometeorológico vertical diario de la zona no saturada que no contempla los flujos laterales ni la interacción con las aguas superficiales. El método utilizado es una modificación del balance propuesto por Bradbury et al. (2000) y se realizó para toda el área de estudio, que incluye zonas urbanas, de expansión y de cultivos.

Para hacer este balance se necesitan datos climatológicos (precipitación, temperatura, evapotranspiración), datos del uso del suelo o cobertura (urbano impermeable, urbano zonas verdes, zonas de cultivo en el área rural del área de estudio), características del suelo en zonas

verdes urbanas o cultivadas rurales (profundidad radicular, capacidad de campo y punto de marchitez permanente), datos agronómicos para las zonas cultivadas (volúmenes de riego, coeficientes de cultivo, y profundidad radicular), pendiente del terreno, datos hidrológicos (umbral de escorrentía superficial), y datos hidrogeológicos (nivel freático).

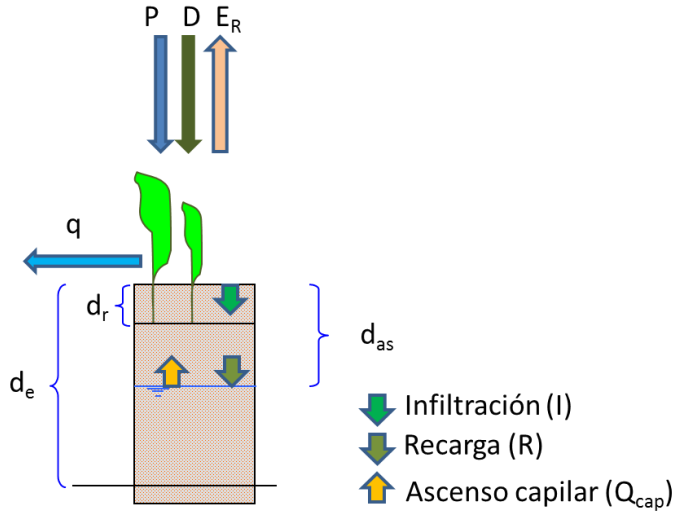


Figura 3-28 Esquema del balance hídrico de la columna del suelo

La Figura 3-28 muestra los principales flujos y parámetros del balance:

- P es la precipitación (mm/día)
- D es la dotación del riego (mm/día)
- E_R es la evapotranspiración real (mm/día)
- I es la infiltración (mm/día)
- q es la escorrentía superficial (mm/día)
- R es la recarga (mm/día)
- Q^{cap} es el ascenso capilar
- d^r (m) es la profundidad radicular que depende de la cobertura vegetal (pastos o cultivos).

La profundidad del nivel freático (d^{as}, m), con relación a la profundidad de extinción (d^e, m) determinan si el ascenso capilar contribuye a la evaporación real.

Este balance hidrometeorológico vertical por unidad de suelo es un balance diario calculado con datos diarios para los diferentes parámetros del balance. A continuación, se describen los pasos que se siguieron para calcularlo:

- Determinar la variación diaria de precipitación,
- Determinar la variación diaria de temperatura máxima, mínima y media, para calcular la evaporación potencial de referencia,
- Determinar la variación diaria de riego en zonas verdes urbanas y de cultivo,

- Determinar la escorrentía superficial y la infiltración,
- Asignar valores a diferentes parámetros del suelo, y
- Hacer el balance hidrometeorológico para calcular la recarga integrando toda la información.

Para obtener la distribución espacial de la recarga, se calculó el balance hidrometeorológico en cada celda del modelo utilizando una malla con una resolución de 250m x 250m. A cada celda de la malla se le asignó un valor para cada una de las variables necesarias en el cálculo del balance. En el Anexo 2, se presenta el detalle del cálculo de cada uno de los términos del balance.

3.2.5.1.1 Cálculo de la recarga difusa

El cálculo de la recarga se hizo con un balance hidrometeorológico, considerando la lámina de agua máxima que se puede almacenar. La ecuación utilizada para calcular la recarga es:

$$R_t^* = \max(I_t + RF_{t-1} - RAU^{\max}, 0)$$

Ecuación 3.1

Donde R*$_t$ es la recarga en el día "t", I_t es la infiltración en el día "t", RF_{t-1} la humedad del suelo disponible para las plantas, es decir, la reserva de agua al final del día anterior, y $RAU^{\max}$ la reserva máxima de agua utilizable para las plantas dadas las condiciones de ese suelo y el tipo de cultivo. La RAU se define como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, y la LARA es la permanencia de la lámina de agua rápidamente aprovechable por las plantas.

La Reserva Final (*RF*) del día "t", es decir, la lámina de agua que queda en el suelo al final del día para el que calculamos la recarga es:

$$RF_t = \min(I_t + RF_{t-1} - ET_t^{real}, \mathrm{RAU}^{\max})$$

Ecuación 3.2

Dónde:

$$ET_t^{real} = \min(ET_t^{suelo} + ET_t^{pot} \times F^{cap}, ET_t^{pot})$$

Ecuación 3.3

Dónde ET_t^{pot} es la evapotranspiración potencial del cultivo, ET_t^{suelo} es la evapotranspiración potencial del suelo, y F^{cap} es el factor de ascensión capilar.

La evapotranspiración potencial del cultivo (ET_t^{pot}) se define como la evaporación potencial de referencia E_t^{pot} (calculada con la fórmula de Hargreaves, Ecuación 9.2), multiplicada por el factor del cultivo K_c, que se consideró 0.7 para cultivos de caña, 1.0 para bosques y cultivos de café, 0.8 para pasto y 0.85 para las zonas urbanas y rocosas:

$$ET_t^{pot} = E_t^{pot} \times K_C$$

Ecuación 3.4

La evapotranspiración potencial del suelo (ET_t^{suelo}) depende de la disponibilidad de agua en el suelo. Una primera estimación de la ET_t^{suelo} se calcula como el máximo entre la

evapotranspiración potencial (ET_t^{pot}), y una fracción entre la lámina de agua en el suelo en el día anterior (RF_{t-1}) más la infiltración (I_t), y la reserva de agua utilizable por las plantas multiplicada por un factor de reducción (ET^{redu}) que tiene un valor de 0.5 (parecido a la relación entre la LARA y la RAU):

$$ET_t^{suelo} = \max\left(\frac{I_t + RF_{t-1}}{RAU^{\max} \times ET^{redu}}, 1\right) \times ET_t^{pot}$$

Ecuación 3.5

El factor de ascensión capilar (F^{cap}) puede variar entre 0 y 1 y es el cociente entre la profundidad de extinción (d^e) menos la profundidad de las aguas subterráneas (d^{as}) y la profundidad de extinción menos la profundidad radicular (d^r):

$$F^{cap} = \frac{d^e - d^{as}}{d^e - d^r}$$

Ecuación 3.6

Una vez se ha calculado la recarga utilizando la Ecuación 3.1, ésta puede ajustarse utilizando un factor de impermeabilidad que reduce la recarga en un 90% para las zonas urbanas impermeabilizadas (ver Figura 3-29):

$$R_t = (1 - F^{imp})\,\mathrm{R}_t^*$$

Ecuación 3.7

La escorrentía superficial también puede ajustarse utilizando el mismo factor de impermeabilidad:

$$q_t = (1 - F^{imp}) q_t^* + F^{imp}(P_t - E_t)$$

Ecuación 3.8

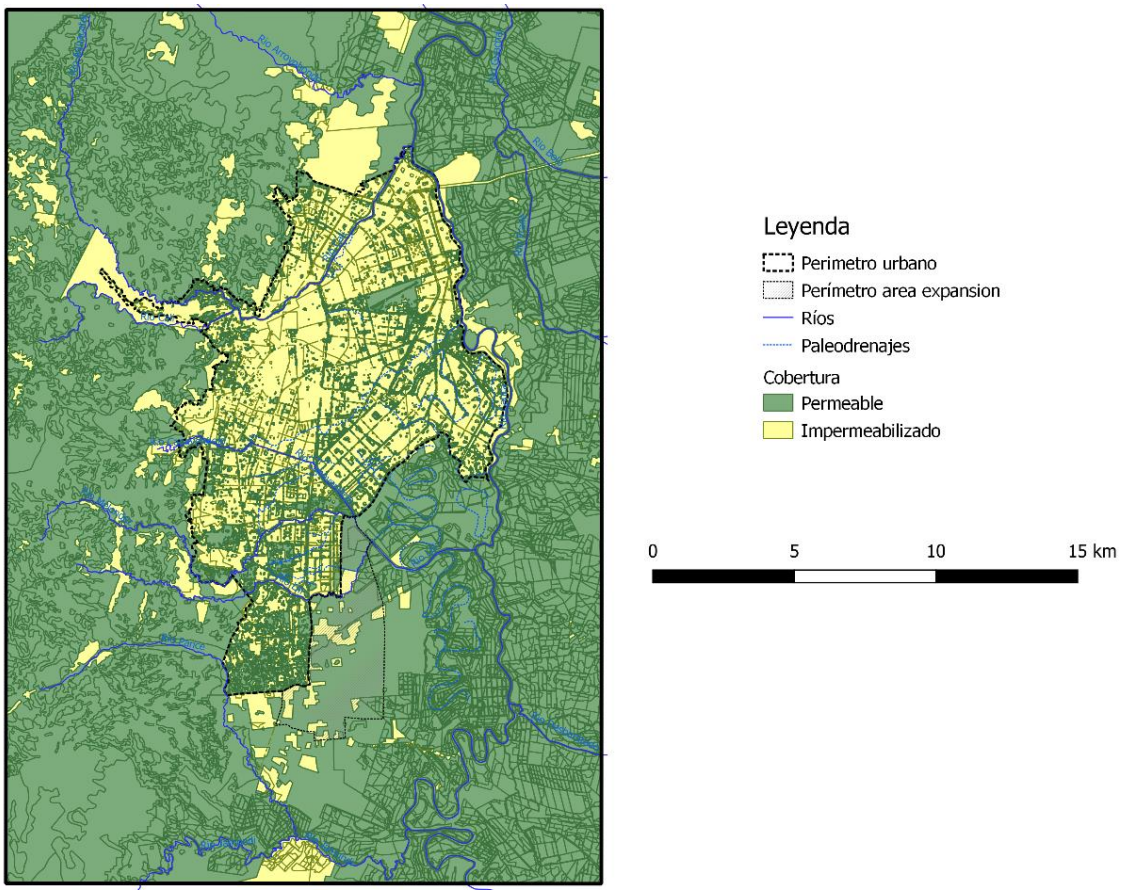


Figura 3-29 Zonas impermeabilizadas sobre las que se reduce la recarga estimada en un 90%

La recarga que resulta de este cálculo es diaria. Para este estudio se realizó el cálculo a nivel diario para el período entre el 01/01/2007 y el 31/12/2017, y después se agregó a valores mensuales y a un valor promedio multianual.

La Figura 3-30 muestra la recarga promedio en mm por día para el período 01/01/2007 31/12/2017. Las zonas de menor recarga corresponden a las zonas de la cordillera, sobre los afloramientos de la Formación Volcánica, con menos de 0.01 mm/d, y a las zonas impermeabilizadas dentro del perímetro urbano, con rangos de recarga entre 0.01 y 0.25 mm/d. Como es de esperarse, en la zona urbana las zonas verdes presentan una recarga mayor. En la zona norte de la ciudad, sobre las cuencas de los ríos Cali y Cañaveralejo, la recarga promedio en las zonas verdes varía entre 0.5-1.0 mm/d, mientras que hacia el sur, en la cuenca del río Pance, la recarga en las zonas verdes alcanza hasta los 4 mm/d. El gradiente en la recarga de las zonas verdes en el área urbana, mayor al sur, se debe al gradiente de precipitación que ocurre de Sur a Norte (ver Figura 9-3).

Otras zonas importantes de recarga corresponden a las formaciones terciarias (Guachinte, Ferreira y Jamundí), en donde la recarga estimada alcanza hasta 4 mm/d. Se debe resaltar que el porcentaje de la recarga que ocurre en estas formaciones que llega al acuífero del Valle del Cauca, en este caso en la zona de Cali, depende de la conexión hidráulica que exista entre estas formaciones y los depósitos cuaternarios, es decir, del flujo que pueda ocurrir a través de fracturas y del sistema de fallas.

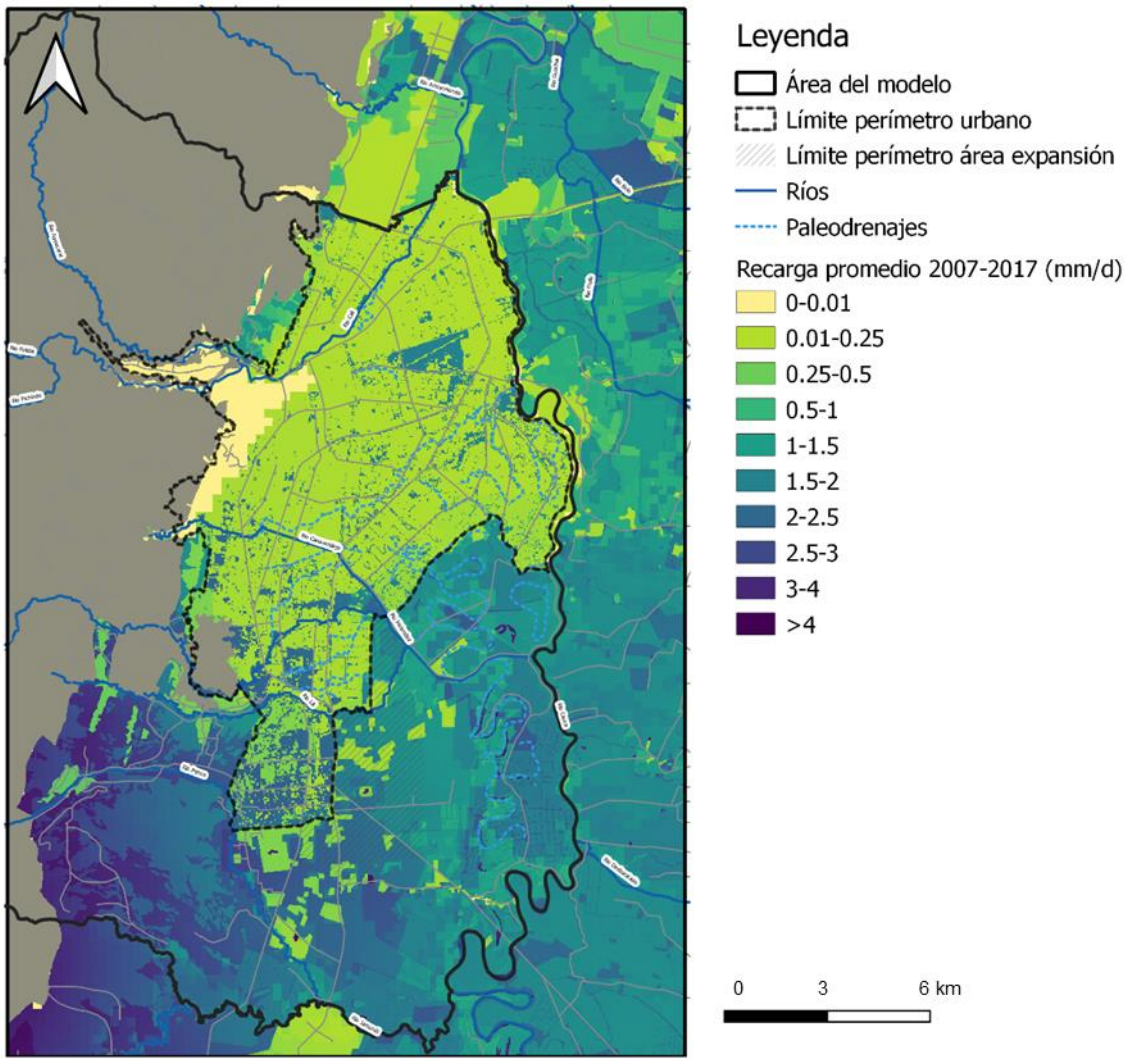


Figura 3-30 Mapa de la recarga promedio en la zona de estudio para el período enero de 2007 a diciembre de 2017. En gris queda sombreada el área que no ha formado parte del cálculo de la recarga.

Para la zona urbana, en la zona del acuífero, la recarga anual se estima aproximadamente en 140mm/año o 15Mm^3/año. En la zona de expansión, la recarga se estima aproximadamente en 460mm/año o 7.5Mm^3/año. El valor de la zona urbana es más bajo que el valor promedio estimado para el Valle del Cauca; 325 mm para una recarga calculada con datos del período 1987 – 1996 (CVC, 2000), y 482mm/año sin considerar aportes por riego y 597mm/año considerando riego, para el período 2000-2013 (CVC, 2016). Esto se debe principalmente a que el 78% de la zona urbana está impermeabilizada, lo cual impide en gran parte que la precipitación se infiltre.

En el caso de la zona de expansión, se estima que solamente un 15% está impermeabilizada, y por lo tanto la precipitación puede infiltrarse más libremente. Por este motivo la recarga es mucho más alta que en la zona urbana, y se acerca más a los valores promedio encontrados en el Valle.

Para el perímetro municipal, en la zona del acuífero, la recarga se estima en aproximadamente 400mm/año o 101Mm^3/año.

Tabla 3-3 Recarga promedio por zona

Área	Recarga en mm/año	Recarga en Mm3/año	Área (km2)*
Perímetro urbano dentro del área del modelo	140	15	108.7
Perímetro zona de expansión dentro del área del modelo	460	7.5	16.3
Perímetro municipal dentro del área del modelo	400	101	251.7

* Esta área corresponde al área con recarga

3.2.5.2 *Recarga por tuberías*

Un componente potencial de la recarga de acuíferos en áreas urbanas son las filtraciones de agua que pueden darse por fugas en las tuberías subterráneas. En este caso, se analizó la información de EMCALI EICE ESP correspondiente a los estudios de pérdidas del sistema de acueducto. Las tuberías del sistema de acueducto están en general a 1 metro de profundidad en el subsuelo, y teniendo en cuenta que los niveles del agua subterránea en la ciudad de Cali oscilan entre 2 metros y 12 metros, las pérdidas que se den bajo la superficie como un caudal constante pueden filtrarse a través de la zona no saturada hasta alcanzar el acuífero.

El balance hídrico de EMCALI para el año 2015, indica que los consumos anuales totales de agua potable fueron de 303,3 Mm^3, de los cuales un 44% son consumos facturados y el 56% son pérdidas totales que corresponden a 168.5 Mm^3. Este volumen anual de pérdidas totales reportado se divide en pérdidas comerciales y pérdidas técnicas (Figura 3-31) (NEP ICESI, 2016 citado por EMCALI, 2017).

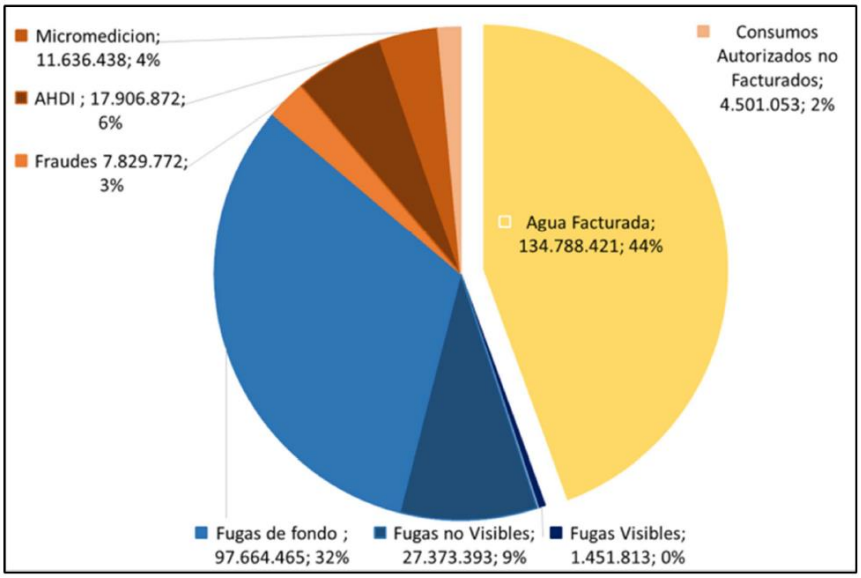


Figura 3-31 Balance hídrico de EMCALI. Fuente: estudio NEP ICESI 2016, citado por EMCALI 2017

De las pérdidas totales, se considera que solo a partir de las pérdidas técnicas se puede tener una recarga al acuífero, estas corresponden a los volúmenes de agua perdidos por fallas en la infraestructura física instalada, que son: fisuras, filtraciones, roturas. A su vez estas fallas se deben a la calidad y tiempo de uso de los materiales, a las altas presiones manométricas entre otros aspectos. En el caso de Cali las interrupciones y arranques del sistema de la red baja, generados por los cambios súbitos de calidad y turbiedad del río Cauca, influyen en el aumento de fallas en la infraestructura y pérdidas técnicas. Las pérdidas técnicas se dividen en fugas inevitables o de fondo, fugas no visibles, fugas visibles y fugas por reboses (Figura 3-32) (NEP ICESI, 2016 citado por EMCALI, 2017).

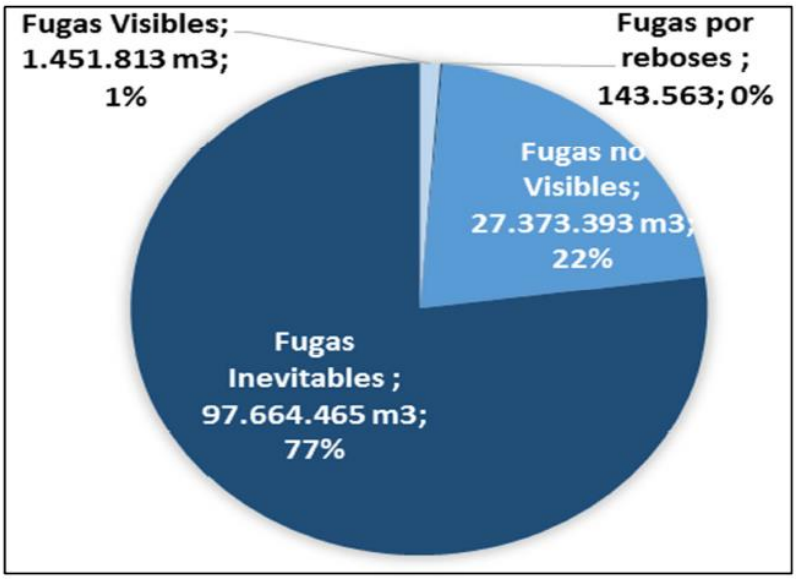


Figura 3-32 Diagnóstico de las pérdidas técnicas
Fuente: estudio NEP ICESI 2016, citado por EMCALI 2017

Las fugas visibles, relacionadas a daños visibles en red y acometidas que afloran a la superficie y daños reportados, corresponden solo al 1% del total. Las fugas no visibles, aquellas que pueden localizarse por medios acústicos, representa el 22% del total. Por último, las fugas inevitables, o de fondo, representan el 77% de las pérdidas técnicas de EMCALI (NEP ICESI, 2016 citado por EMCALI, 2017).

Las fugas visibles afloran a la superficie y pueden ser conducidas posteríormente por canales de drenaje o el sistema de alcantarillado, las fugas no visibles constituyen pérdidas que también pueden darse en la parte superficial del sistema y por tanto aflorar a la superficie. Las fugas de fondo o inevitables son imperceptibles, se eliminan mediante la reposición de redes y se disminuyen con la gestión y control de presiones. Son estas fugas de fondo las que en el presente estudio se consideran recarga del acuífero a través de la infiltración del agua por el subsuelo y representan el 58% de las pérdidas totales (técnicas y comeciales).

Por otro lado, se cuenta con información de volúmenes de las pérdidas totales del sistema para el período 2006-2016 (EMCALI, 2016). De esta serie se estimó la recarga al acuífero suponiendo que para todos los años un 58% de las pérdidas totales corresponde a fugas de

fondo, con base en el estudio del año 2015. Para el año 2017 por no existir información de volúmenes de perdidas totales, las pérdidas se asumen iguales a las de 2016.

Tabla 3-4 Pérdidas totales y fugas de fondo para el período de modelación

Año	Pérdidas totales (m^3)	Fugas de fondo (m^3)
2007	89,853,304	52,077,692
2008	95,244,502	55,202,354
2009	101,911,618	59,066,518
2010	109,045,431	63,201,175
2011	123,221,337	71,417,327
2012	136,775,684	79,273,233
2013	155,924,280	90,371,486
2014	166,838,979	96,697,490
2015	168,507,369	97,664,465
2016	158,396,927	91,804,597
2017	158,396,927	91,804,597

Estos volúmenes son finalmente distribuidos en el área urbana de la ciudad (119.2 km^2), que es el área con cobertura del sistema de acueducto y en la cual se dan las fugas. La recarga asumida entonces para el sistema acuífero producto de estas pérdidas se presenta en la Tabla 3-5, tanto en mm/año como en mm/m^2/día a partir de la distrubución de los volúmenes en el área urbana.

Tabla 3-5 Recarga (mm) producto de las fugas de fondo en el sistema de acueducto

Año	Recarga (mm/año)	Recarga (mm/m^2/día)
2007	437	1.2
2008	463	1.3
2009	496	1.4
2010	530	1.5
2011	599	1.6
2012	665	1.8
2013	758	2.1
2014	811	2.2
2015	819	2.2
2016	770	2.1
2017	770	2.1

En la zona urbana, se estima que la recarga por pérdidas de acueducto representa un 82% de la recarga total que llega al acuífero, siendo la recarga por precipitación solamente un 18%.

3.2.6 Sistemas de flujo de agua subterránea

Las líneas piezométricas que definen el sistema de flujo de agua subterránea en la Unidad A, se obtuvieron a partir de pozos de monitoreo tanto de la CVC como del DAGMA (ver Figura 3-33). Los criterios de selección de estos puntos fueron los siguientes:

1) Las mediciones realizadas por el DAGMA en los 56 pozos de monitoreo existentes en la zona urbana. Estos pozos tienen profundidades entre 10 y 30 metros, captando únicamente la Unidad A. A partir del año 2012 se cuenta con datos de mediciones en esta red. Sin embargo, no existen mediciones sistemáticas que permitan diferenciar campañas de monitoreo en época de lluvia y en época seca, con variaciones en los meses de medición y el número de mediciones por año. Por esta razón, se utilizó el promedio multianual de cada punto para definir las líneas de flujo en la zona urbana. Un registro sistemático de niveles en cada época (lluviosas y secas) daría información valiosa sobre la variabilidad estacional de los niveles. Por esta razón se recomienda hacer un monitoreo más sistemático de los niveles, y a ser posible, instalar sensores de medición continua en pozos de las zonas de recarga, descarga y equilibrio, así como en las cercanías de los ríos, para conocer la dinámica de las aguas subterráneas, y evaluar su variabilidad en el tiempo.

   Además de los pozos de la red de monitoreo, el DAGMA realiza campañas de monitoreo semestrales des del año 2015 en pozos de producción localizados en la zona urbana. Los análisis de las mediciones en estos pozos no son del todo confiables ya que se observan variaciones de niveles estáticos de hasta 50 metros en el mismo pozo. Esto se debe a que probablemente las mediciones realizadas no siempre corresponden a niveles estáticos, es decir, se miden niveles dinámicos (en recuperación) que no han alcanzado a estabilizarse. Por este motivo se utilizaron únicamente los datos de la red de monitoreo, la cual se encuentra distribuida en toda la zona de interés urbana. Estos pozos, sin embargo, pueden proporcionar información adicional e interesante a más profundidad o en zonas sin pozos de la red de monitoreo, razón por la cual se recomienda que se continúen monitoreando, y se recomienda enfáticamente que se asegure que el nivel de agua en el pozo se ha recuperado del todo, antes de tomar la medición.

2) Mediciones de niveles en los piezómetros de la red de monitoreo de la CVC para actividades potencialmente contaminantes. Corresponden a 95 puntos localizados en la zona rural con profundidades entre 8 y 23 metros, captando igualmente la Unidad A.

3) Finalmente, para complementar en las zonas rurales donde no existen pozos de monitoreo, se adicionaron los pozos de producción de menos de 30 metros de profundidad con registros de niveles estáticos.

A partir de los pozos de monitoreo y los pozos de producción seleccionados se realizó un filtro para utilizar únicamente aquellos puntos que tuvieran más de dos mediciones de niveles estáticos, de tal manera que pudieran tomarse como mediciones representativas promedio multianuales. El total de puntos utilizados para el análisis del sistema de flujo de la Unidad A es de 146 pozos (Figura 3-33).

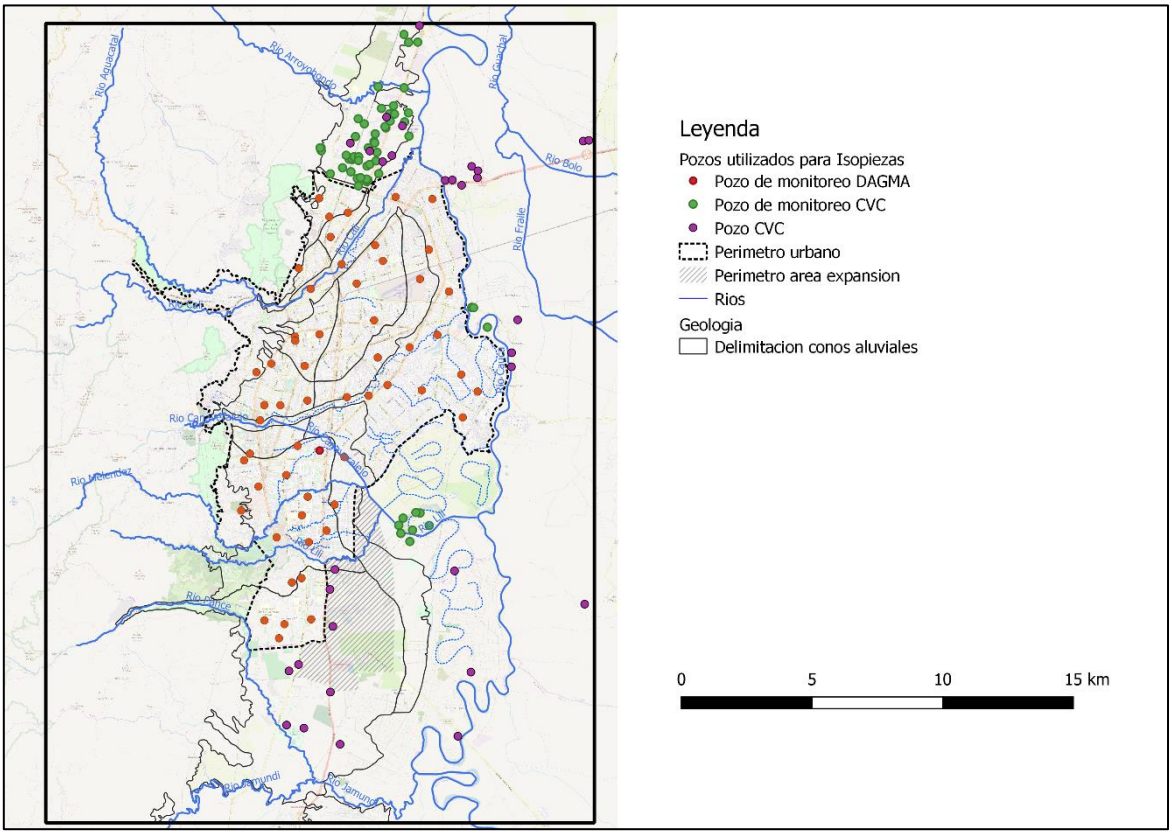


Figura 3-33 Pozos de monitoreo (en la leyenda: Pozo de monitoreo DAGMA y Pozo de monitoreo CVC) y de bombeo (en la leyenda: Pozos CVC) utilizados para la generación del mapa de isopiezas y el análisis del sistema de flujo de agua subterránea.

El promedio multianual de las mediciones en cada punto se interpoló para generar el mapa de líneas equipotenciales que permite analizar el sistema de flujo de aguas subterráneas (ver Figura 3-34).

En términos generales, la dirección del flujo de agua subterránea del sistema del Municipio de Cali es en sentido Oeste-Este, con gradiente hidráulico desde las partes altas de los conos aluviales hacia el río Cauca, que corresponde al drenaje principal del acuífero. Los mayores gradientes hidráulicos se localizan en las partes altas de los conos aluviales de los ríos Cali y Pance, y en menor grado la parte alta de los conos de los ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo.

- En el cono de Pance las isopiezas divergen en la dirección de flujo, lo que indica un sistema de recarga de gran magnitud. La recarga proviene principalmente del río Pance, cuyo lecho está compuesto principalmente por materiales gruesos limpios, facilitando la interacción del río con los sedimentos del cono. A la entrada del perímetro urbano, el curso del río cambia de Oeste a Este en dirección Norte-Sur. En este punto ocurre gran infiltración de agua subterránea hacia el cono aluvial del Pance. Adicionalmente, la densa red de acequias en el sector de Pance contribuye con la recarga del cono aluvial.

  El gradiente hidráulico en la parte alta del cono de Pance es de aproximadamente 3.8%, y va disminuyendo gradualmente, hasta llegar a un gradiente de

aproximadamente 0.7% en la parte baja del cono, donde se interdigita con la zona de transición y los depósitos del río Cauca.

A partir de la parte distal del cono de Pance, hacia la zona de transición y depósitos del Cauca las curvas isopiezas muestran un cambio de dirección hacia el Norte, paralelo al río Cauca. Sobre la Unidad A el gradiente hidráulico es muy bajo, aproximadamente 0.1%, y los sedimentos tienen conductividades de 10-55 m/d (ver Figura 3-54) indicando una zona de alto potencial hidrogeológico. Los planes de expansión y desarrollo deben tener especial cuidado durante el proceso de planificación y ordenamiento territorial de la ciudad para proteger esta zona que potencialmente podría utilizarse como fuente para abastecimiento de algunos sectores de la ciudad.

- La parte alta del cono de río Cali también representa una zona de recarga, en menor magnitud que el cono de Pance. La dirección del flujo es en dirección Oeste - Este hacía el río Cauca, aunque el curso del río tiene una dirección predominante Suroeste – Noreste. Las principales zonas de recarga se dan en la parte alta del cono y la recarga directa por infiltración es muy baja ya que casi todo el cono se encuentra en zona urbana construida.

  El gradiente hidráulico en la parte alta del cono de Cali es de aproximadamente 1.5%, y disminuye hasta llegar a un gradiente de aproximadamente 0.5% en la parte baja del cono, zona de transición.

  Al norte del río Cali se observa la convergencia de las líneas de flujo, lo que puede indicar una sobreexplotación en la zona de Yumbo donde las industrias hacen gran uso del agua subterránea.

- El cono Meléndez-Lili presenta un comportamiento hidráulico similar al del cono de Cali, con dirección predominante hacia el río Cauca. En la parte alta el gradiente es de aproximadamente 2% y disminuye hasta 1.2% en la zona de transición. Cabe resaltar que este cono es mucho más pequeño que el de los ríos Cali y Pance y, por ende, la zona de transición se encuentra más cerca a la parte alta del cono aluvial.

- El cono aluvial del río Cañaveralejo se ve afectado por la impermeabilización en casi todo su recorrido sobre el cono. La recarga principalmente se da por infiltración del río, en un corto tramo donde el río no se encuentra impermeabilizado. A nivel local se observa interacción y dirección de flujo de los conos del río Cali, al norte, y de los ríos Meléndez-Lili al sur, hacia este cono.

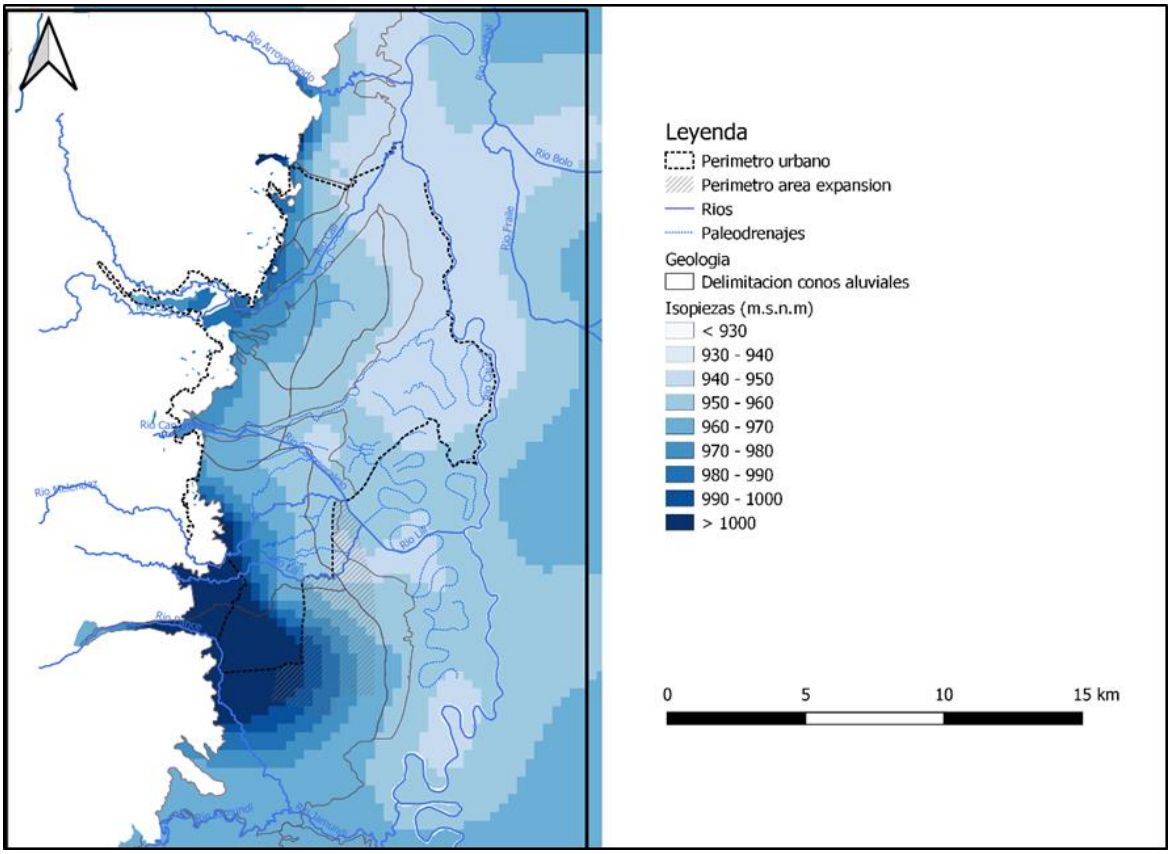


Figura 3-34 Líneas equipotenciales del agua subterránea en el municipio de Cali

3.2.7 Consumos de agua subterránea en Cali

Actualmente, el volumen anual concesionado de los pozos activos es de 10.9 Mm^3 de acuerdo al inventario de concesiones del DAGMA. Los principales usos del agua subterránea en la zona urbana de Santiago de Cali están asociados al lavado de vehículos, el riego de zonas verdes, jardines y áreas comunes, el uso doméstico para actividades de aseo y baterías sanitarias, y el uso industrial. Más del 43% de los pozos concesionados (239) que tienen una profundidad promedio de 13 metros, se utilizan en el lavado de vehículos, sin embargo, el volumen de explotación de estos pozos es bajo en comparación con el total de las concesiones, con un volumen total concesionado de 1.3 Mm^3/año.

Por otra parte, el sector industrial cuenta con menos del 10% de los pozos concesionados (43) que tienen una profundidad promedio de 48 metros, sin embargo, en términos de volumen este sector representa el 68% del total del volumen concesionado de la ciudad de Cali. En la Tabla 3-6 y en la Figura 3-35 se presenta el resumen de pozos activos por uso y volumen total concesionado.

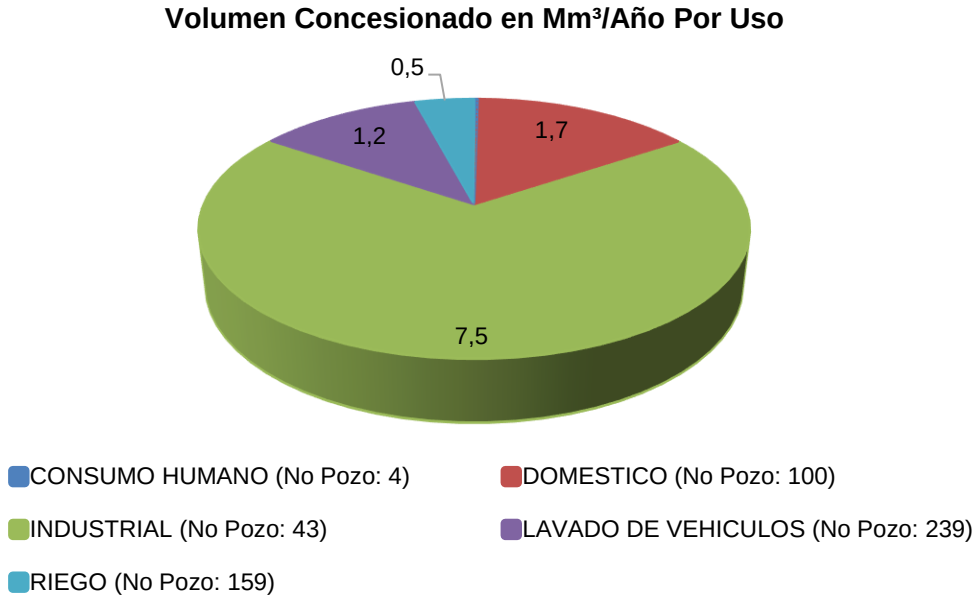


Figura 3-35 Volumen Por Uso - Pozos Activos

Tabla 3-6 Volumen anual concesionado por uso y actividad

Uso	Actividad	No. de Pozos	Volumen Concesionado Mm³/Año Por Actividad
Consumo Humano	Domestico	4	0.03
Domestico	Domestico	100	1.7
Industrial	Industria Manufacturera	43	7.5
Lavado De Vehículos	Comercio, Reparación, Restaurantes Y Hoteles	239	1.2
Riego	Actividades De Servicios Sociales, Comunales Y Personales	159	0.5
	TOTAL		10.9

Además del volumen actual concesionado, en la Tabla 3-7 se presentan los volúmenes de consumo en el período 2007-2017, discriminados por los diferentes usos, donde los pozos con usos para consumo humano y para uso doméstico se agruparon según su actividad como usos domésticos.

Tabla 3-7 Volúmenes anuales de consumos de aguas subterráneas por uso

Usos	Doméstico (Mm^3/a)	Industrial (Mm^3/a)	Lavado de vehículos (Mm^3/a)	Riego (Mm^3/a)	Total general (Mm^3/a)
2007	0.29	7.24	1.44	0.43	9.41
2008	0.28	7.75	0.92	0.44	9.39
2009	0.31	3.45	1.01	0.29	5.07
2010	0.44	3.84	2.97	0.33	7.57
2011	0.46	5.58	1.31	0.38	7.73
2012	0.81	9.22	1.44	0.57	12.04
2013	0.75	6.83	1.46	0.49	9.53
2014	0.87	5.80	1.65	0.88	9.20
2015	1.49	8.30	1.48	1.08	12.35
2016	1.64	7.59	1.56	4.36	15.15
2017	1.20	5.52	1.78	1.31	9.81

La información de la Tabla 3-7 se presenta a modo de gráfico a continuación, en la Figura 3-36:

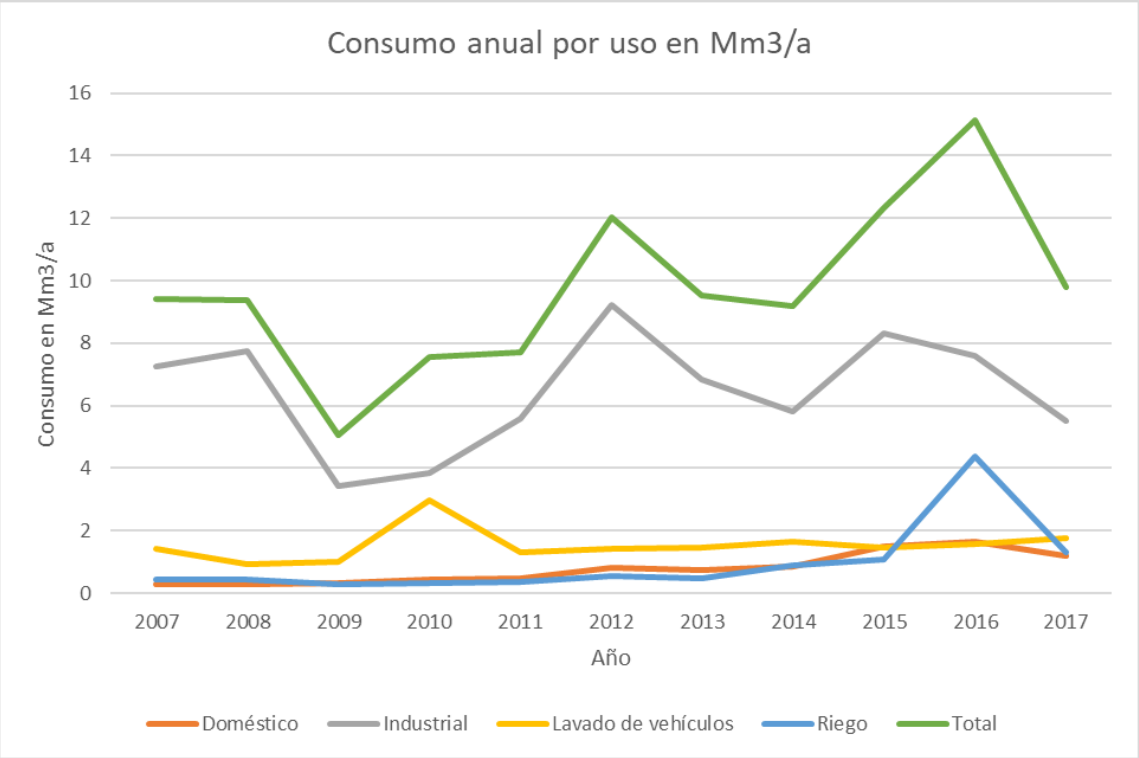


Figura 3-36 Consumos de agua subterránea entre los años 2007 y 2017 por uso

La Figura 3-36 muestra que los consumos de agua subterránea han ido variando en el tiempo y que para todos los usos hay una tendencia positiva, es decir, que cada vez se consume más agua subterránea. Esto podría deberse simplemente a una cuestión de registro de consumos y no del consumo real. Se observa que algunos años presentan datos más elevados, como el del lavado de vehículos del año 2010 o el del riego del año 2016.

3.2.8 Balance hídrico subterráneo

El balance hídrico del sistema acuífero da información sobre los principales flujos de agua que entran y salen del sistema, proporcionando así un cuadro resumen de los volúmenes más importantes en la gestión de las aguas subterráneas. Además, definir los términos del balance hídrico y cuantificarlos, permite identificar aquellos términos con más incertidumbre y aquellos que están mejor caracterizados hasta la fecha.

En la zona urbana de Cali hay varios componentes que forman parte del balance hídrico. Para entender mejor los componentes y su papel en el balance, podemos dividir el balance en tres; uno para el acuífero, otro para el río Cauca, y otro para los ríos tributarios, tal como se muestra en la Figura 3-37.

En esta sección se identifican los términos del balance hídrico. En la sección 3.4 se cuantifican los términos pertenecientes a la zona urbana y a la zona de expansión para la Unidad A, utilizando los resultados obtenidos durante la etapa de diagnóstico.

Para el sistema acuífero, dada su configuración y las principales actividades, se ha identificado el siguiente balance y sus componentes:

$$Entradas - Salidas = \Delta S$$
$$(R_{ca}+R_{ar}+R_{tb}+R_{tr}+R_{L}+R_{rrg}+R_{ls}) - (D_{Ca}+D_{tr}+D_{cp}+D_{ls}+D_{tb}) = \Delta S$$

Ecuación 3.9

Dónde las entradas son:

- R_{ca} es la recarga a través de los ríos en el área de los conos aluviales; este parámetro se calcula con el modelo numérico de aguas subterráneas de Cali;

- R_{ar} es la recarga difusa, proveniente de la infiltración directa de la precipitación; este parámetro se calcula con base en un balance hidrometeorológico vertical diario de la zona no saturada del suelo (ver sección 3.2.5.1);

- R_{tb} es la recarga por los sistemas de tuberías de agua potable y aguas servidas en la zona urbana. La estimación de este parámetro es bastante compleja, para lo que se utilizó información secundaria proveniente de las empresas prestadoras de servicios públicos

- R_{tr} es la recarga a través de los ríos tributarios fuera de la zona de los conos aluviales; también se estima con el modelo numérico de aguas subterráneas;

- R_{L} es la potencial recarga lateral de las formaciones rocosas (terciarias y cretácicas) localizadas sobre la cordillera occidental (Guachinte, Ferreira, Jamundí, Rocas Volcánicas). se realizó mediante el análisis hidrogeoquímico e isotópico

- R_{rrg} es la recarga causada por el retorno de riego al acuífero en las zonas no urbanas de cultivo; el cálculo de este parámetro se explica en el balance hidrometeorológico (ver sección 3.2.5.1);

- R_{ls} es la entrada lateral de agua subterránea al sur del área de estudio; es un parámetro difícil de estimar, que se procura obtener en la calibración del modelo;

Y las salidas del sistema acuífero son:

- D_{Ca} es la descarga subterránea sobre la franja del río Cauca, calculada por el modelo numérico de aguas subterráneas;
- D_{tr} es la descarga subterránea a los ríos tributarios, también determinada por el modelo;
- D_{cp} es la captación de agua subterránea en pozos, su cálculo se explica en la sección 0.
- D_{ls} es la salida lateral de agua subterránea al norte del área de estudio, un parámetro que se procura estimar en la calibración del modelo;
- D_{tb} es la descarga que se da del acuífero a las tuberías de aguas servidas a través de fracturas en las tuberías. Su estimación es compleja, ya que se requiere de un monitoreo detallado de los sistemas de recolección de aguas lluvias y negras.

ΔS es la variación del almacenamiento del acuífero, que se puede determinar con el modelo o con los demás términos del balance.

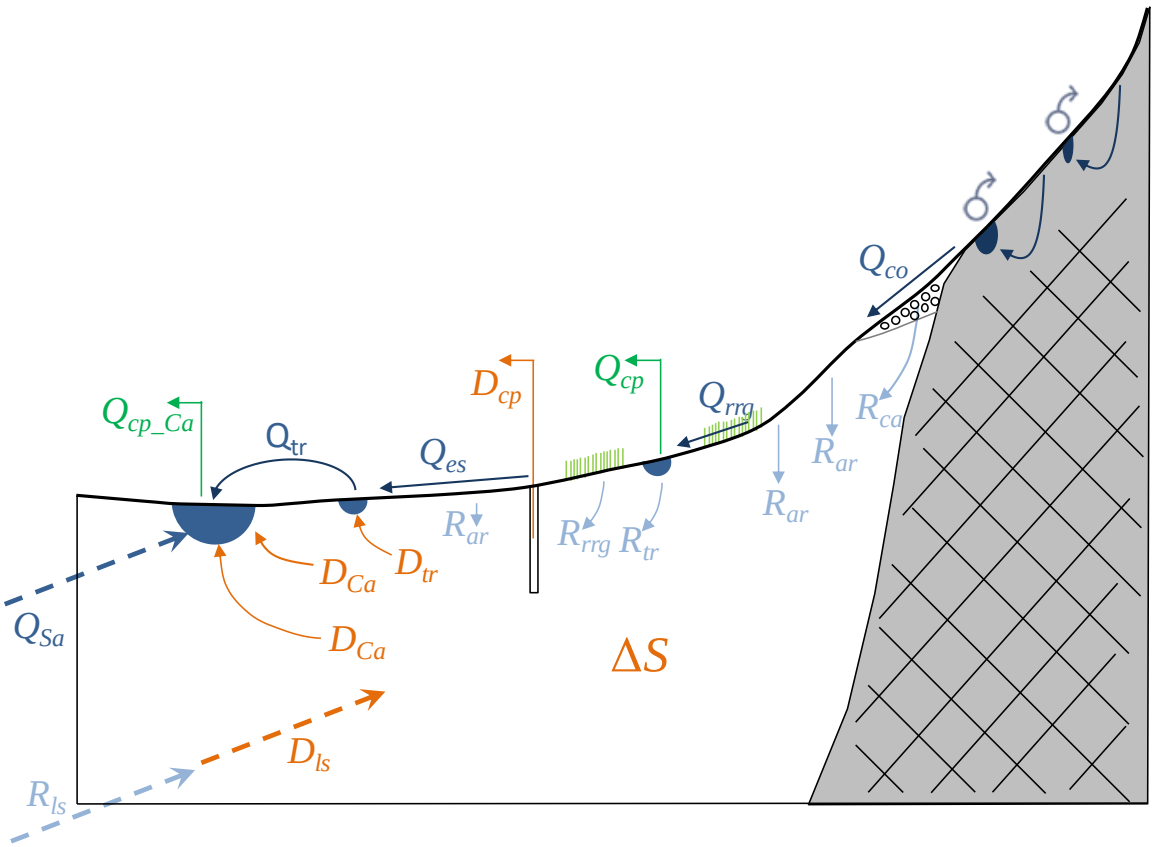


Figura 3-37 Esquema del lado oriental del Valle del Cauca con los componentes de los balances hídricos del acuífero, del río Cauca o de los ríos tributarios;.

El balance del río Cauca a la salida de la zona de estudio se puede definir de la siguiente forma:

$$Q_{Ca} = (Q_{Sa}+Q_{tr}+D_{Ca}+P_d) - (Q_{cp_C}+E)$$

Ecuación 3.10

Dónde:

- Q_{Ca} es el caudal del río Cauca a la salida de la zona de estudio;
- Q_{Sa} es el caudal del río Cauca a la entrada de la zona de estudio, influenciada directamente por el embalse de Salvajina;
- Q_{tr} es la suma de caudales de los ríos tributarios que llega al río Cauca;
- D_{Ca} es la descarga subterránea al río Cauca;
- P_d es la precipitación directa que llega como escorrentía superficial al río;
- Q_{cp_C} es la captación de agua del río Cauca para riego y consumo humano;
- E es la evaporación directa del agua del río Cauca;

Finalmente, el balance de los ríos tributarios del río Cauca se puede definir de la siguiente manera:

$$Q_{tr} = (Q_{co}+D_{tr}+Q_{rrg}+Q_{es}) - (Q_{cp}+R_{ca}+R_{tr})$$

Ecuación 3.11

Donde:

- Q_{tr} es el caudal del río tributario que llega al río Cauca;
- Q_{co} es el caudal del río tributario a la salida de las cordilleras, entrada en la zona plana
- D_{tr} es la descarga subterránea a los ríos tributarios;
- Q_{es} es la entrada de agua en los ríos tributarios a través de la escorrentía superficial
- Q_{rrg} es la entrada de agua causada por el retorno de riego a los ríos tributarios;
- Q_{cp} es la captación de agua de los ríos tributarios para riego y consumo humano;
- R_{ca} es la infiltración de agua de los tributarios al acuífero en el área de los conos aluviales;
- R_{tr} es la infiltración de agua de los tributarios al acuífero fuera de la zona de los conos aluviales.

3.2.9 Características hidrogeoquímicas

La hidroquímica del acuífero está correlacionada con la lluvia, la geología de los materiales que forman el acuífero y con la dinámica de los flujos regionales y locales del agua

subterránea. Para analizar la correlación de las formaciones geológicas presentes en el acuífero con la composición química del agua subterránea, se han evaluado las características litológicas y mineralógicas de las diferentes formaciones geológicas presentes, y la concentración de los iones mayoritarios, así como algunas relaciones iónicas de interés. Teniendo en cuenta que el agua subterránea fluye desde la zona de recarga hasta su zona de descarga, algunos minerales son disueltos, otros precipitan, y pueden ocurrir reacciones químicas que cambian la química del agua subterránea a lo largo de su trayecto.

3.2.9.1 *Metodología*

Para este estudio se han utilizado todos los pozos tanto del DAGMA como de CVC que tienen información hidrogeoquímica. En total se dispone de 271 puntos con datos tomados entre los años 1988 y 2017, aunque la mayoría de datos son de después del año 2007. La profundidad de los pozos varía entre 2 y 401 metros, pero el 90% tienen menos de 60 metros de profundidad. De estos pozos, que incluyen pozos de monitoreo y pozos de producción, se filtraron aquellos con un error en el balance iónico superior al 10%. Quedaron 90 puntos que cuentan con muestreos realizados entre los años 2013 y 2017 y tienen un error del balance inferior al 10%. La profundidad de los pozos varía entre 5 y 45 metros, con una profundidad promedio de 20 metros, y un solo pozo que llega a 159 metros.

Como se puede identificar, prácticamente todos los pozos quedaron ubicados dentro de la Unidad A. Dado que el número de puntos que quedó después del filtro no quedan distribuidos en toda la zona urbana, y que en algunos casos el error de balance iónico se debe a que algunos de los iones no se analizó, se decidió hacer primero el análisis con los 90 puntos y después añadir los otros puntos para apoyar las observaciones.

Los principales iones estudiados son el calcio, el magnesio, el bicarbonato, el sulfato, el sodio, el potasio, el nitrato y el cloruro. No se pudo estudiar el silicio porque no se tenían muestras con este ion analizado, sin embargo se considera importante tener información de este ion dada la composición silicatada de las rocas de la ladera. Además, se han evaluado las siguientes relaciones iónicas:

- Sodio y cloruro: da información sobre la disolución de halita o la presencia de agua marina, la disolución de albita, y el intercambio iónico
- Sulfato y calcio: da información sobre la disolución de yeso o anhidrita, la neutralización de aguas ácidas por calizas o dolomita, si la fuente de calcio es diferente del yeso y la anhidrita.
- Calcio y magnesio: proporciona información sobre la disolución de dolomita o de minerales ferromagnesianos de rocas máficas, o de la existencia de agua de procedencia marina.
- Bicarbonato sobre la suma de aniones: da información sobre el intemperismo de silicatos y la adición de iones en el agua

Respecto a la isotopía, se dispuso de algunos análisis, que tenían información incompleta y sin referencias, por lo que no fue posible su análisis e interpretación.
.

3.2.9.2 *Resultados*

A continuación, se muestran algunos mapas y gráficos de los iones principales, presentando la concentración de los parámetros analizados en los 90 pozos seleccionados para el análisis de hidroquímica. Los rangos de estos parámetros representan el estado natural del agua.

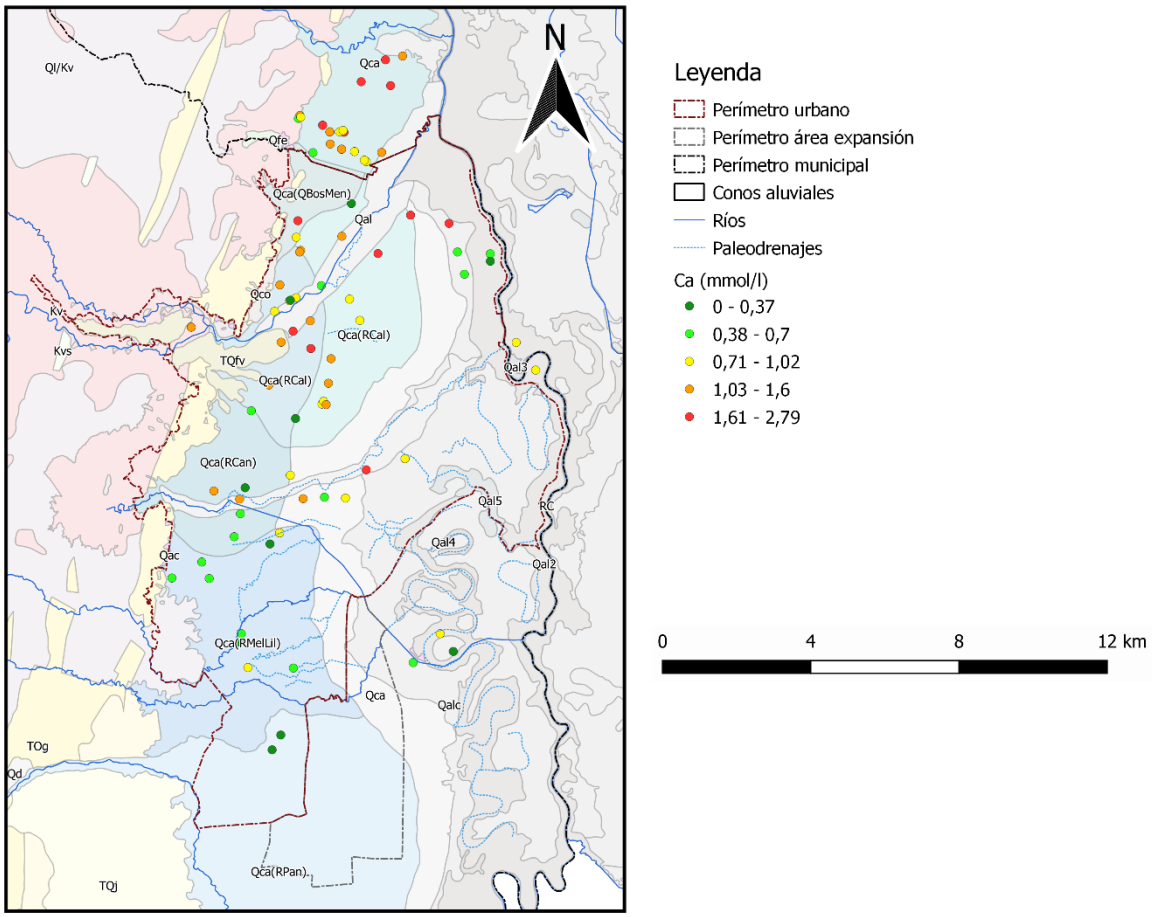


Figura 3-38 Concentración de calcio en mmol/l

La Figura 3-38 muestra que las concentraciones de calcio son más altas en la mitad norte de la zona de estudio y alrededor del río Cali (generalmente entre 0.7 y 2.79mmol/l), mientras que en la mitad sur, las concentraciones varían entre 0 y 0.71mmol/l. La división entre ambas zonas se ubica en el borde sur del abanico aluvial del río Cali.

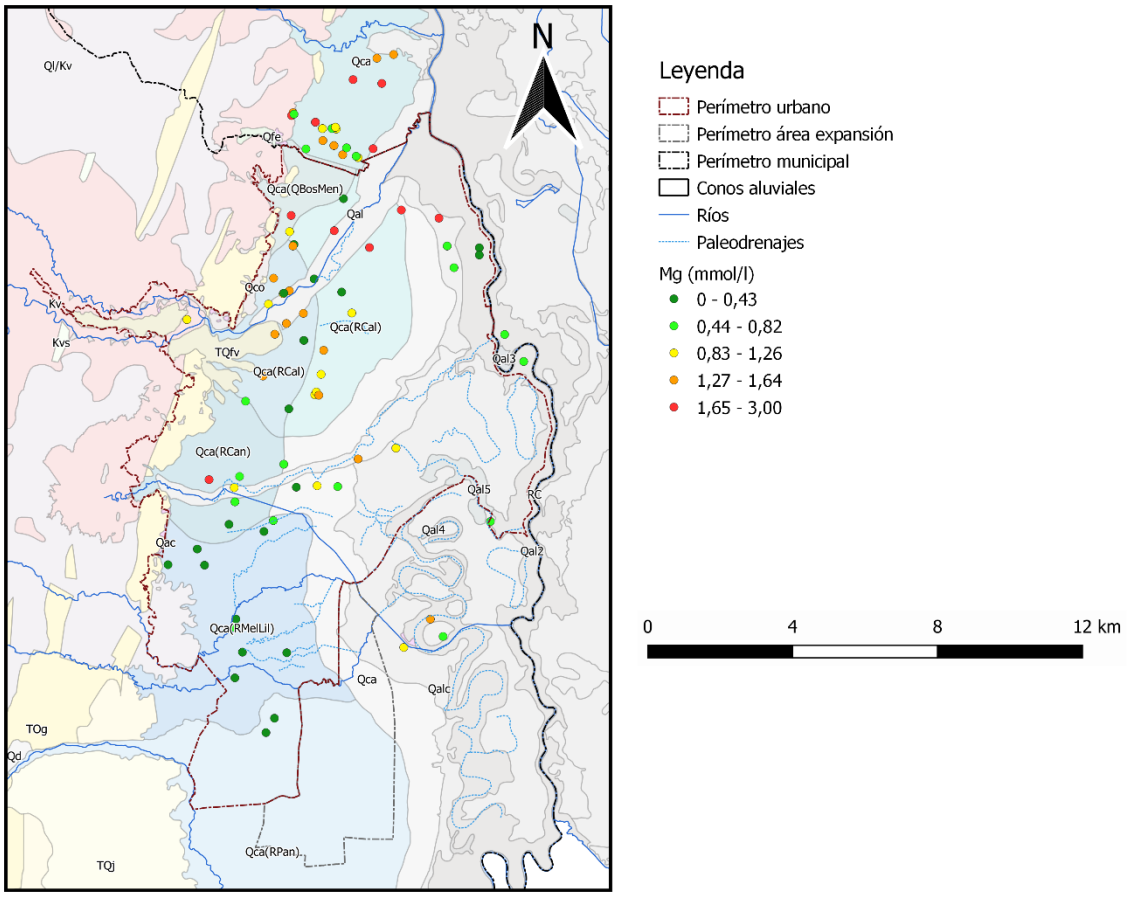


Figura 3-39 Concentración de magnesio en mmol/l

Igual que en el caso del calcio, en la Figura 3-39 se muestra que el magnesio se encuentra en concentraciones más altas en la parte norte que en la parte sur de la zona urbana. En la parte norte, principalmente en el abanico aluvial del río Cali y en la zona de Yumbo, las concentraciones varían entre 1.27 y 3 mmol/l a excepción de algunos puntos cercanos a los ríos. En la mitad sur de la zona urbana, las concentraciones varían de 0 y 0.8mmol/l en general.

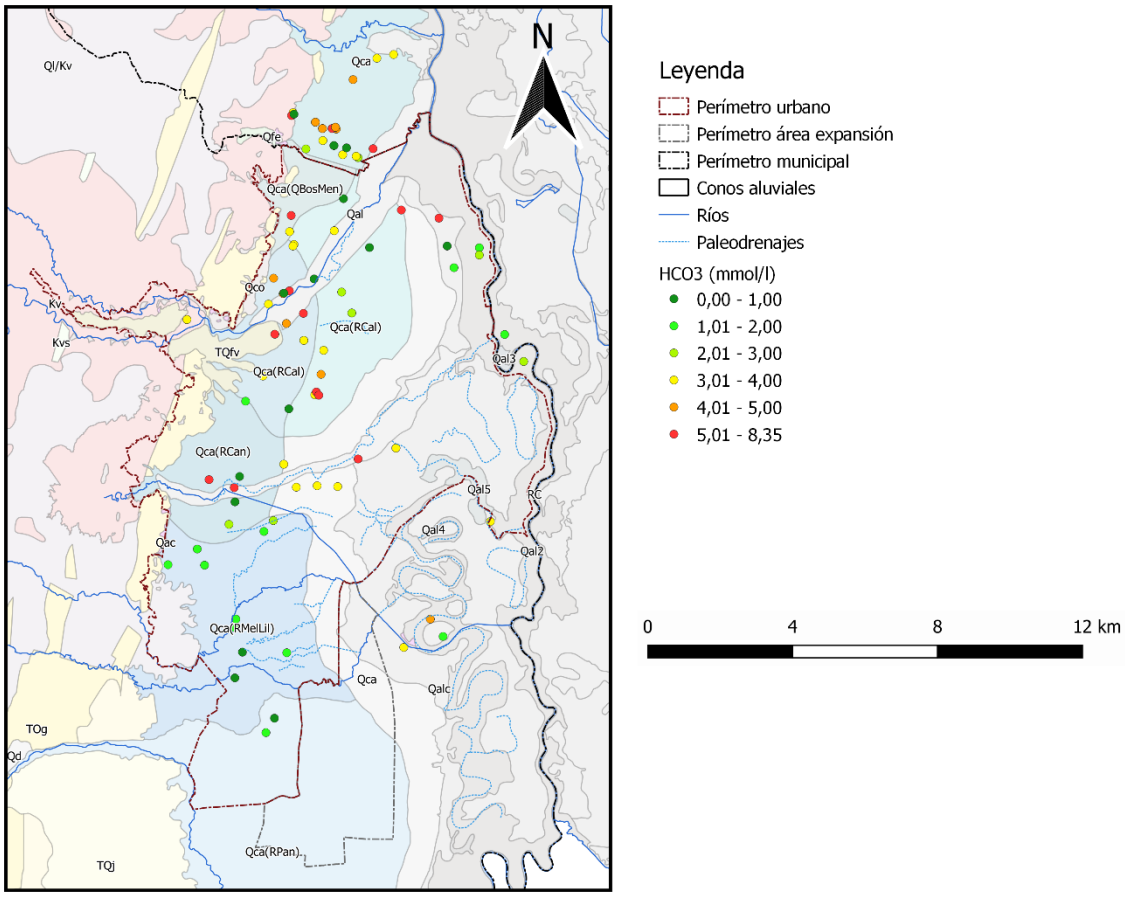


Figura 3-40 Concentración de bicarbonato en mmol/l

El bicarbonato sigue la misma distribución que el calcio y el magnesio y se encuentra en concentraciones más altas (generalmente entre 3 y 5 mmol/l) alrededor del río Cali y en concentraciones más bajas al sur del río Cañaveralejo (generalmente entre 0 y 3mmol/l a excepción de algunos puntos) (Figura 3-40).

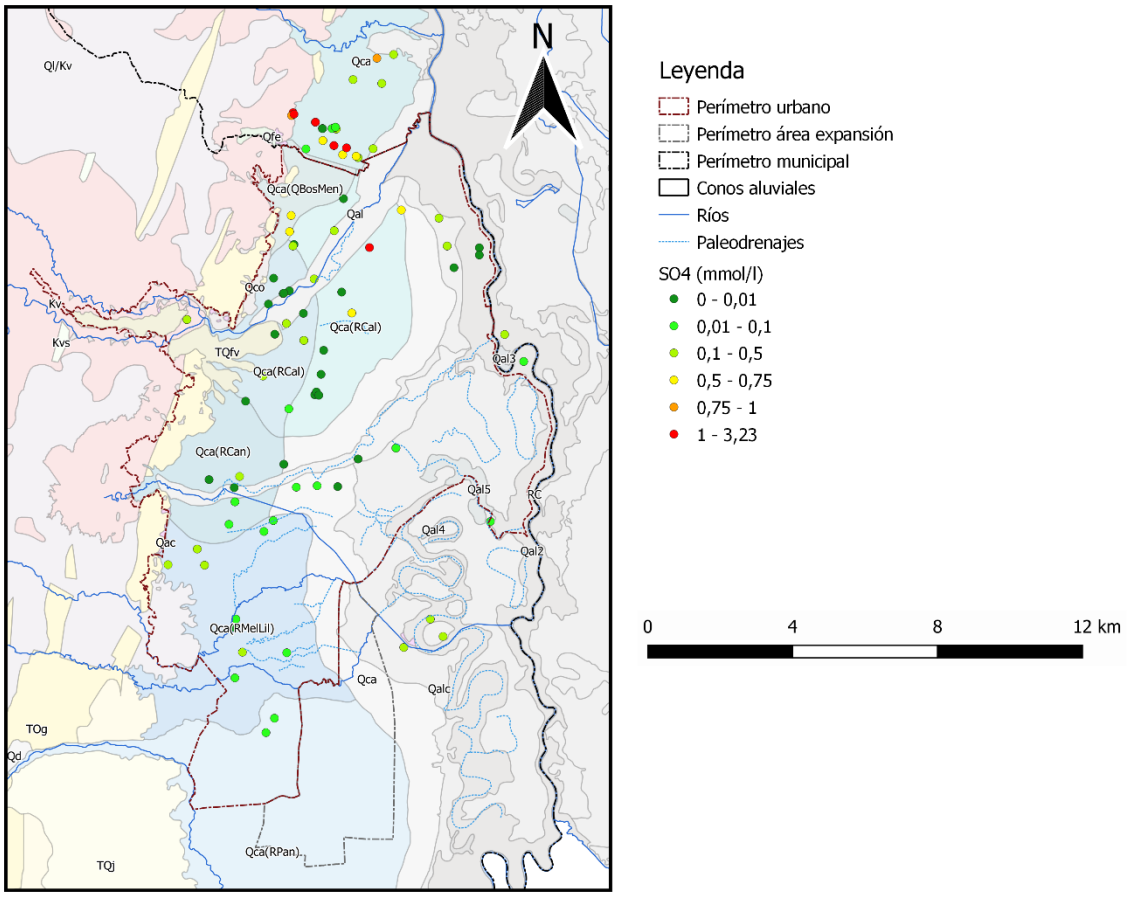


Figura 3-41 Concentración de sulfato en mmol/l

El ion sulfato se encuentra en general en concentraciones bajas (entre 0 y 0.5mmol/l), excepto en algunos puntos al norte de la frontera del perímetro urbano en la zona de Yumbo, que es una zona industrial. Estos pozos son relativamente someros (entre 5 y 30 metros) y en general presentan concentraciones relativamente altas de todos los iones analizados. Estas concentraciones podrían estar relacionadas con los procesos industriales (Figura 3-41).

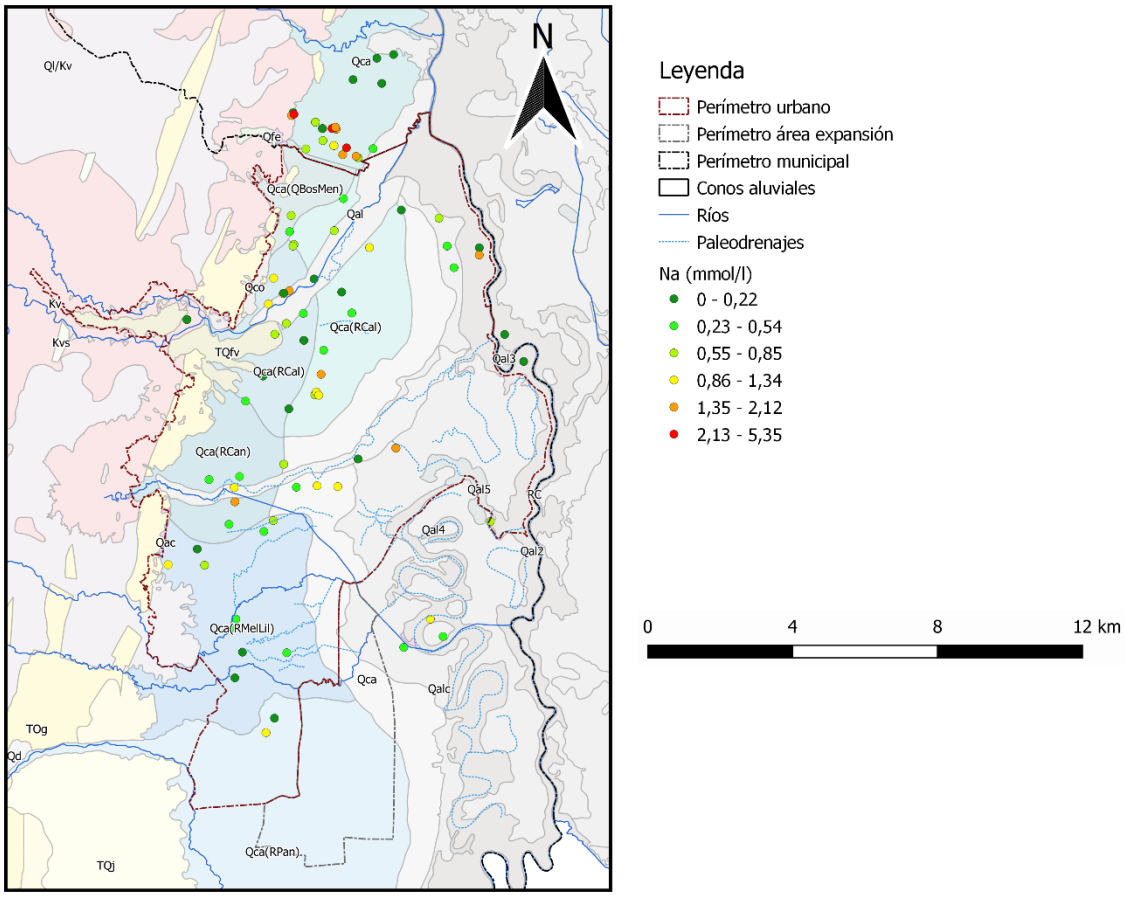


Figura 3-42 Concentración de sodio

El ion sodio en general se encuentra en concentraciones bajas en toda la zona excepto en algunos puntos y concretamente en algunos pozos de la zona de Yumbo (Figura 3-42).

En líneas generales se puede observar que el agua de la Unidad A es principalmente bicarbonatada cálcico-magnésica. Pozos de otras zonas del Valle (escala regional) indican que el agua en la Unidad C es bicarbonatada sódica. La diferencia del tipo de agua entre la Unidad A y la Unidad C indica que hay una evolución geoquímica en la dirección del flujo (desde la cordillera Occidental al río Cauca) y un intercambio catiónico de Ca/Mg a Na debido a los niveles arcillosos de la Unidad B.

En la Unidad A además se pueden diferenciar dos regiones, una en la que el agua está menos mineralizada (menos rica en Ca^{2+}, Mg^{2+} y HCO_3^-) y que se encuentra alrededor de los ríos Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Pance, y otra zona con agua más mineralizada (más rica Ca^{2+}, Mg^{2+} y HCO_3) alrededor del río Cali. En la zona cercana a los ríos del sur (Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Pance) hay un predominio de sedimentos permeables asociados a los cauces de los ríos Lili, Pance y Jamundí, y es una zona importante de recarga del acuífero. Aquí la infiltración del agua de recarga es muy rápida y eso podría explicar la poca mineralización del agua.

En la parte norte de la zona de estudio, alrededor del río Cali, si bien es una zona de recarga, la transmisividad es más baja que en la zona sur y los flujos son más lentos. En esta zona el agua está más tiempo en contacto con los sedimentos que en la zona sur, lo que puede explicar que la mineralización sea más alta. Las líneas piezométricas corroboran la diferencia

en la velocidad del flujo de la zona norte y de la zona sur. Otros iones como el K^+, el Na^+, el SO_4^{2-}, el Cl^- o el NO_3^- no presentan esta diferencia tan clara entre la zona norte y la zona sur.

Las relaciones iónicas estudiadas indican que no parece haber una diferencia en el origen del agua de recarga dentro de la zona de estudio, es decir, que el agua de recarga entra en el sistema a través de las mismas formaciones. Las diferencias que se encuentran en la mineralización se deben a la diferencia en la velocidad de infiltración y circulación del agua subterránea. Otras observaciones que derivan del estudio de las relaciones iónicas son:

- El calcio que se encuentra disuelto en el agua es posible que se deba al intemperismo de los silicatos y la evolución del agua por tiempos de residencia mayor.

- El calcio también podría deberse a la disolución de minerales ferromagnesianos, para lo cual se recomienda hacer el análisis de Sólidos Disueltos Totales..

- Hay algunos pozos que presentan aguas sulfatadas cloruradas (en la zona de Yumbo), posiblemente debido a posibles procesos de contaminación.

Si bien los datos estudiados proporcionan mucha información sobre el tipo de agua y posibles procesos hidrogeoquímicos que se han dado en la Unidad A, ser recomienda la recopilación de nuevas muestras en pozos profundos para poder caracterizar la Unidad C. Además, dada la importancia de los silicatos en la zona, se recomienda obtener análisis del ion silicio para poder determinar mejor el origen del agua de recarga. Por otro lado, nuevas muestras más fiables de pozos profundos en la zona de Yumbo podrían ayudar a determinar el posible origen marino del agua en algunos puntos del terciario.

3.2.10 Calidad del agua subterránea

Para el análisis de indicadores de calidad para el estudio de la contaminación se utilizaron los datos de la red de pozos de monitoreo con la que cuenta el DAGMA para el monitoreo de los niveles y la calidad del agua del acuífero.

En el año 2015 se realizó el primer análisis de los datos de la red (García & Molano, 2015) en el cual se incluyeron los datos de la línea base levantados en el año 2013. En este primer análisis se concluye que existe contaminación microbiológica por coliformes fecales, resaltando las zonas de la cuenca del río Cali y del río Cañaveralejo como las zonas en donde más se presentan indicadores de contaminación.

En el presente análisis, además de los datos del año 2013 se incluyeron los datos de análisis realizados durante los años 2016 y 2017. Se analizaron los parámetros de conductividad eléctrica, nitratos, coliformes fecales y coliformes totales como indicadores de contaminación. Para esto se realizaron mapas por parámetros y por año buscando una conexión espacial y temporal en los resultados.

Las aguas subterráneas en general tienen una conductividad eléctrica mayor a la de las aguas superficiales debido al tiempo de contacto del agua con la roca y la consecuente mineralización del agua. Sin embargo, las aguas de la unidad A en el Valle del Cauca no suelen presentar valores mayores a 1000 µS/cm, en cuyo caso es probable que los valores altos sean debido a la presencia de fuentes potenciales de contaminación. En las siguientes figuras se presentan los valores de conductividad eléctrica para los años 2013, 2016 y 2017. Se resalta que para el año 2013 no todos los puntos cuentan con información, por lo que los puntos sin información

se presentan como ND o NoData. Comparando los diferentes años con datos, no es posible concluir una tendencia en el tiempo con áreas donde la afectación esté en aumento. También cabe resaltar que algunos de estos datos pueden responder a situaciones que se dieron por fuentes de contaminación puntuales que no se mantienen en el tiempo.

A pesar de no existir una tendencia en el tiempo, sí es posible resaltar que en común existen puntos con valores por encima de los 600 µS/cm, y algunos alcanzando los 800 µS/cm y superando los 1000 µS/cm. Las zonas que se resaltan de atención por posible contaminación son la zona centro de Cali, los puntos que se encuentran cercanos al paleodrenaje del río Cañaveralejo, y en menor medida la zona al norte de la ciudad, en los puntos cercanos al río Cali. (Figura 3-43, Figura 3-44, Figura 3-45)

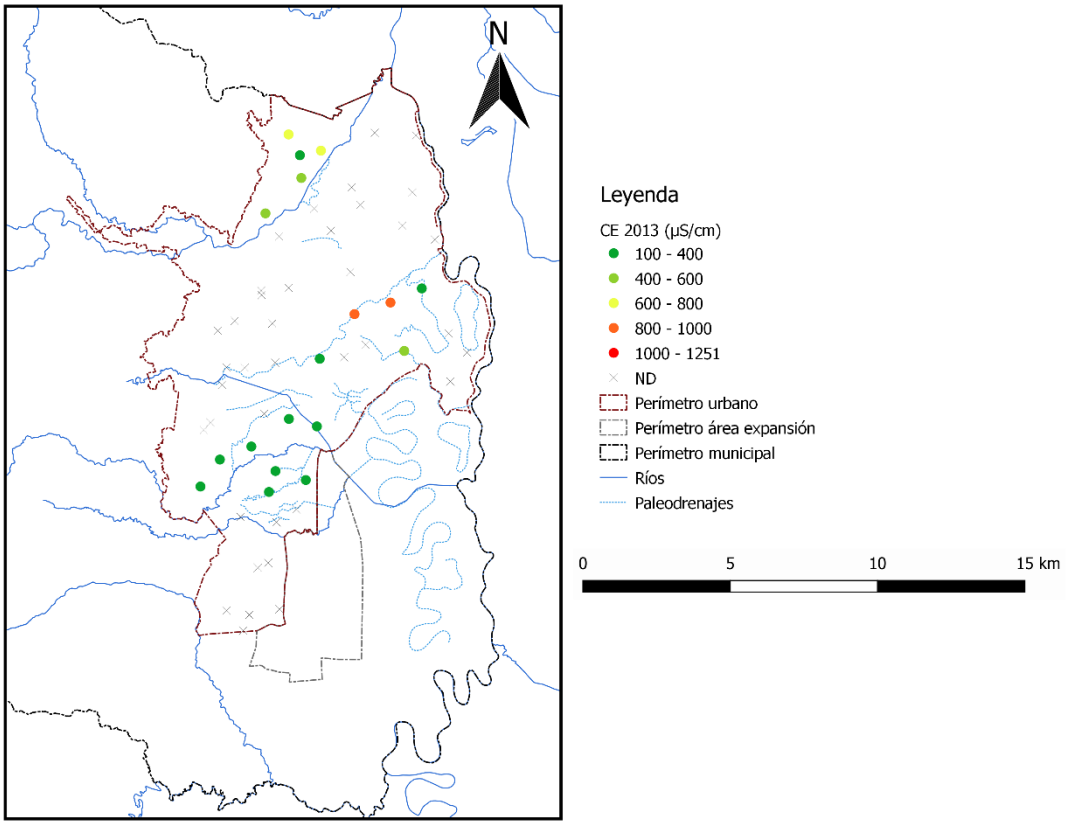


Figura 3-43 Conductividad eléctrica en el año 2013

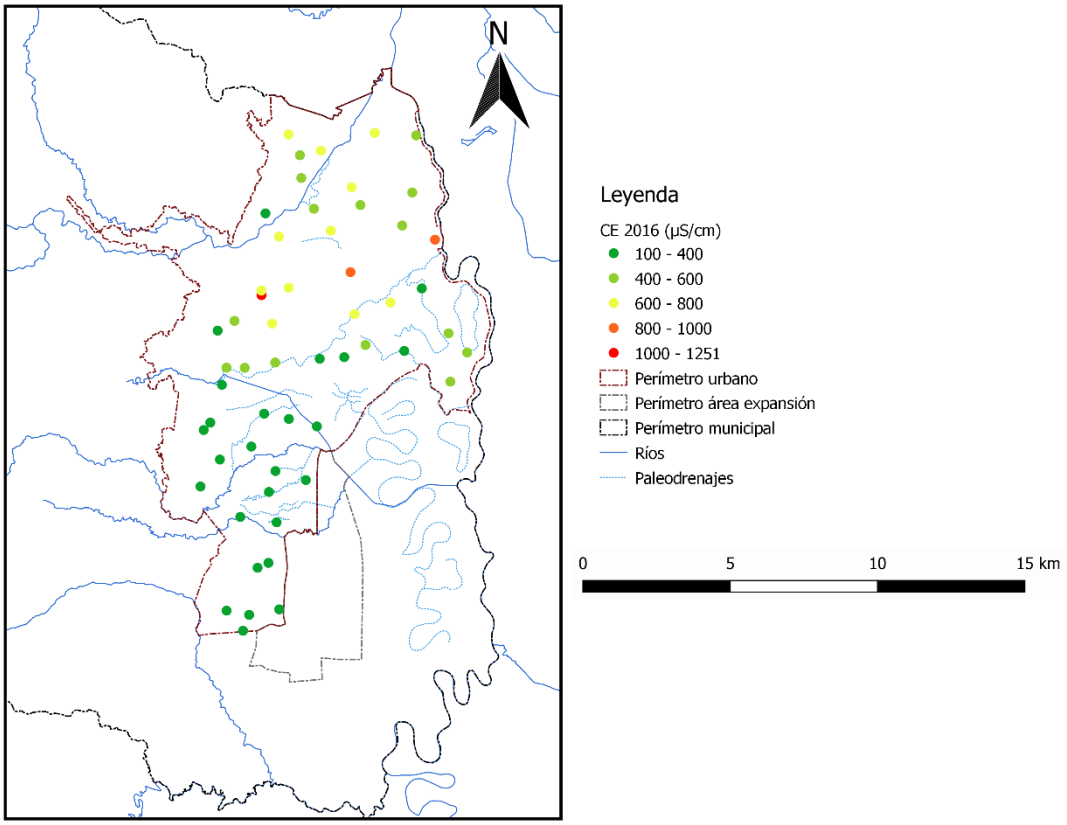


Figura 3-44 Conductividad eléctrica en el año 2016

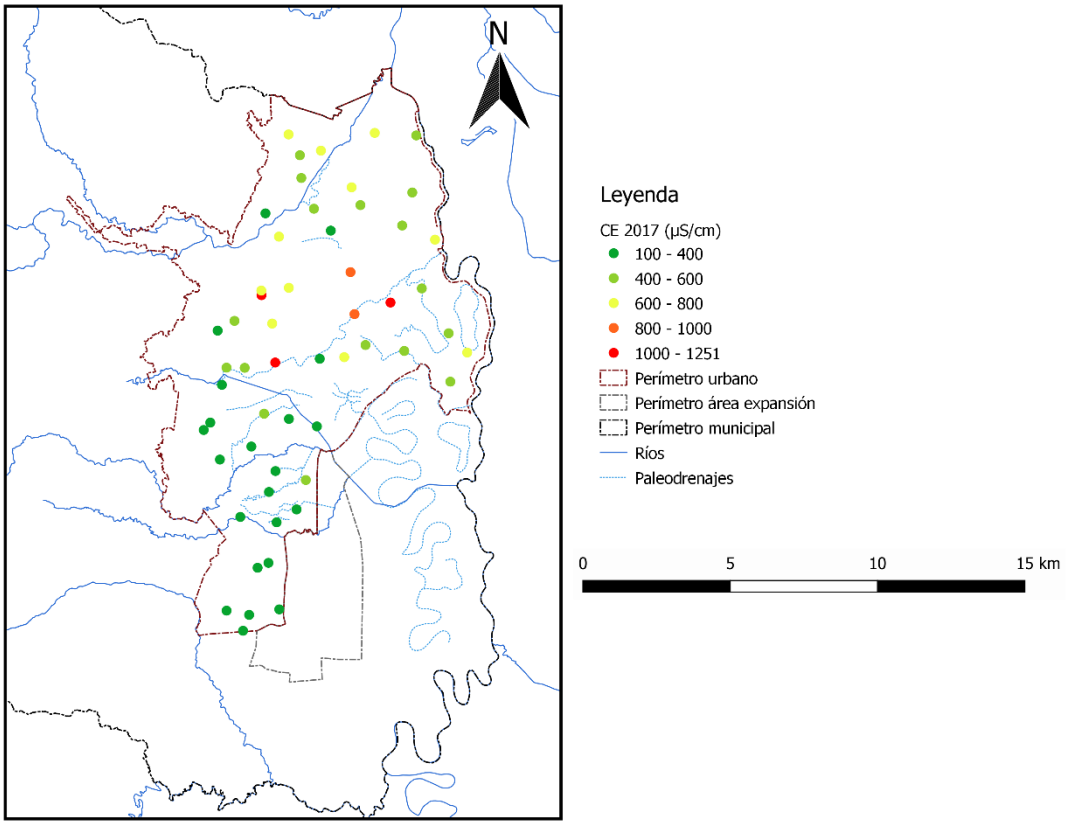


Figura 3-45 Conductividad eléctrica en el año 2017

El segundo parámetro de análisis empleado son los nitratos. Como referencia de análisis se tomó el valor límite de nitratos en el agua subterránea para consumo humano, que es de 10 mg/l NO_3^- . Cabe resaltar que el consumo humado no es uno de los principales usos del agua subterránea en la ciudad, y que dependiendo del uso, los niveles de nitratos o de otros parámetros pueden variar y pueden requerir diferentes tipos de tratamiento en el agua.

De acuerdo a los dos siguientes mapas, en donde se comparan los valores de nitratos entre los años 2013 y 2017, tampoco se puede hablar de una evolución en la difusión de la contaminación. Hay puntos que aparecen con valores superiores a los 10 mg/l en el año 2013 pero en el año 2017 se presentan valores menores o viceversa (Figura 3-46, Figura 3-47). Sin embargo, es posible resaltar que existen zonas en común y que corresponden a las tres zonas mencionadas anteriormente por valores más altos de conductividad eléctrica. Además, se resalta el valor alto de nitratos en el punto cercano al río Meléndez.

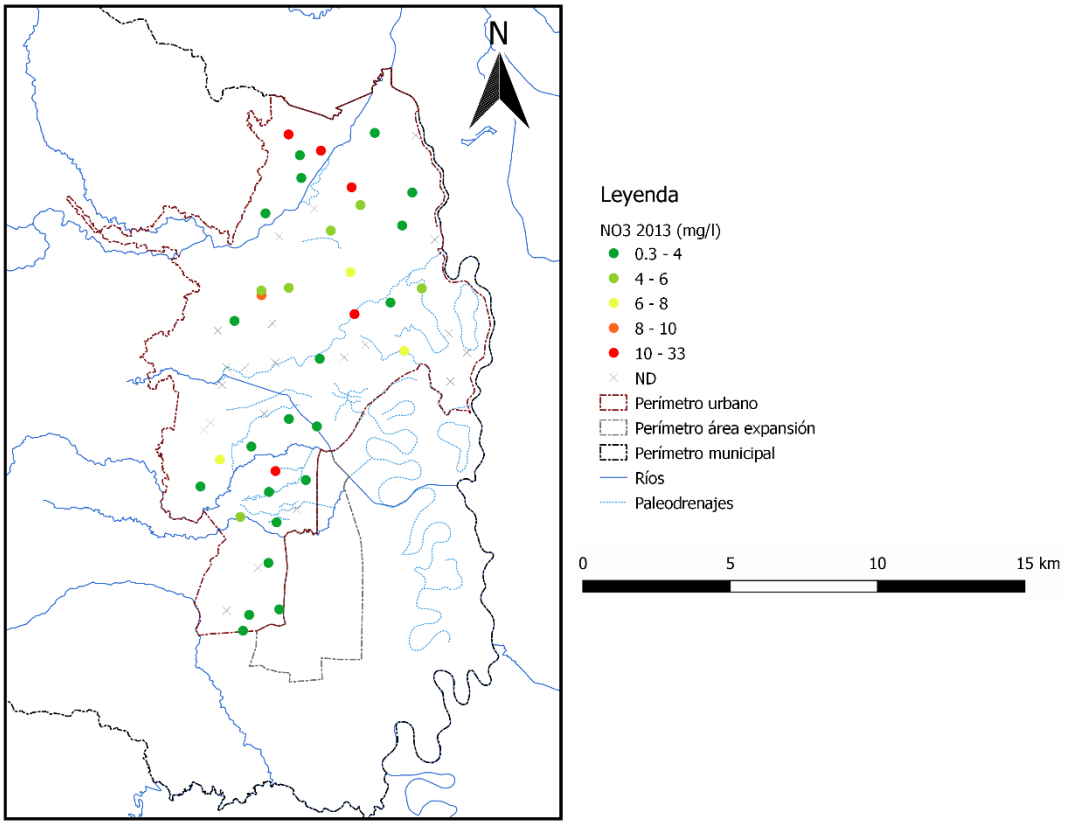


Figura 3-46 Nitratos en el año 2013

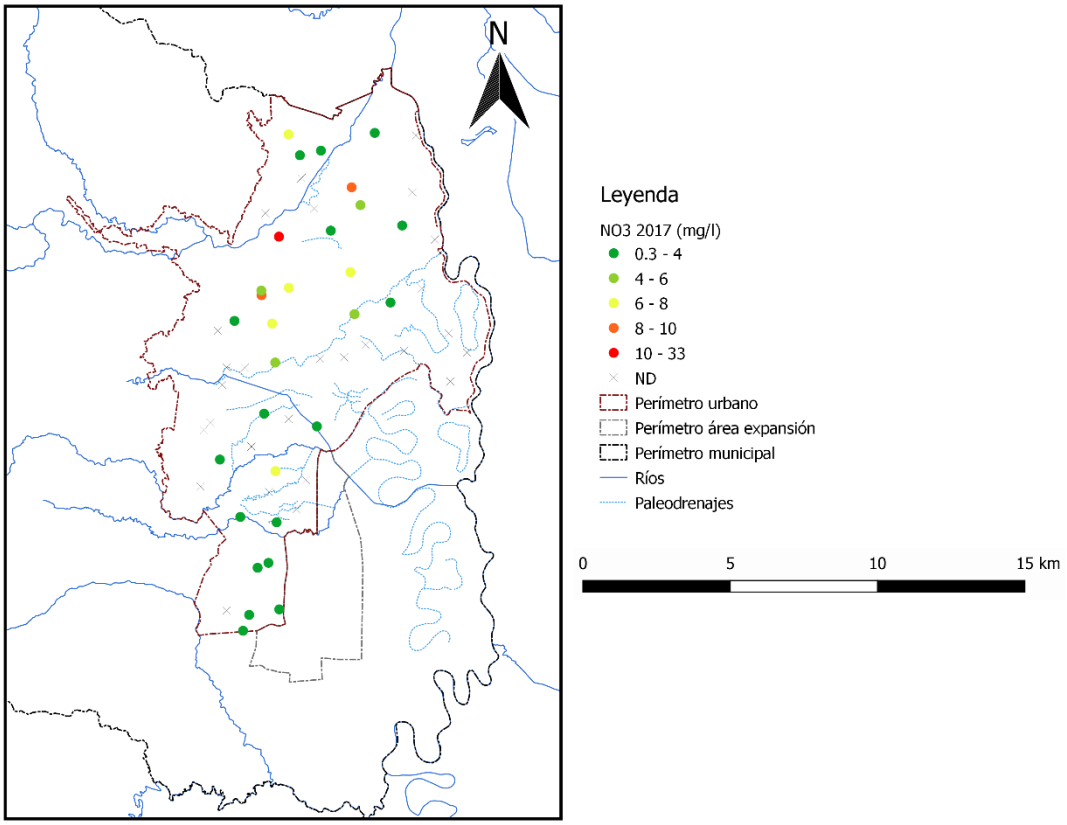


Figura 3-47 Nitratos en el año 2017

Por último, se analizaron los coliformes fecales (Figura 3-48, Figura 3-49) y los coliformes totales (Figura 3-50, Figura 3-51). Estos parámetros se expresan en NMP (número) / 100 mL. En este caso, se han establecido valores límites de 1000 NMP/100mL para puntos de atención (naranja) y puntos establecidos como críticos con valores superiores a los 1000 NMP/100mL. Ambos parámetros se analizaron para los años 2013 y 2016 de acuerdo a la disponibilidad de los datos.

Inicialmente, para los coliformes fecales se resalta una gran cantidad de puntos sin análisis para 2016, año en el cual solo se cuenta con datos en 11 puntos. De acuerdo a los datos del año 2013, se resaltan valores elevados de coliformes totales cerca de la antigua desembocadura del río Cañaveralejo, y se resalta también el área de la ciudad entre los ríos Cañaveralejo y Meléndez.

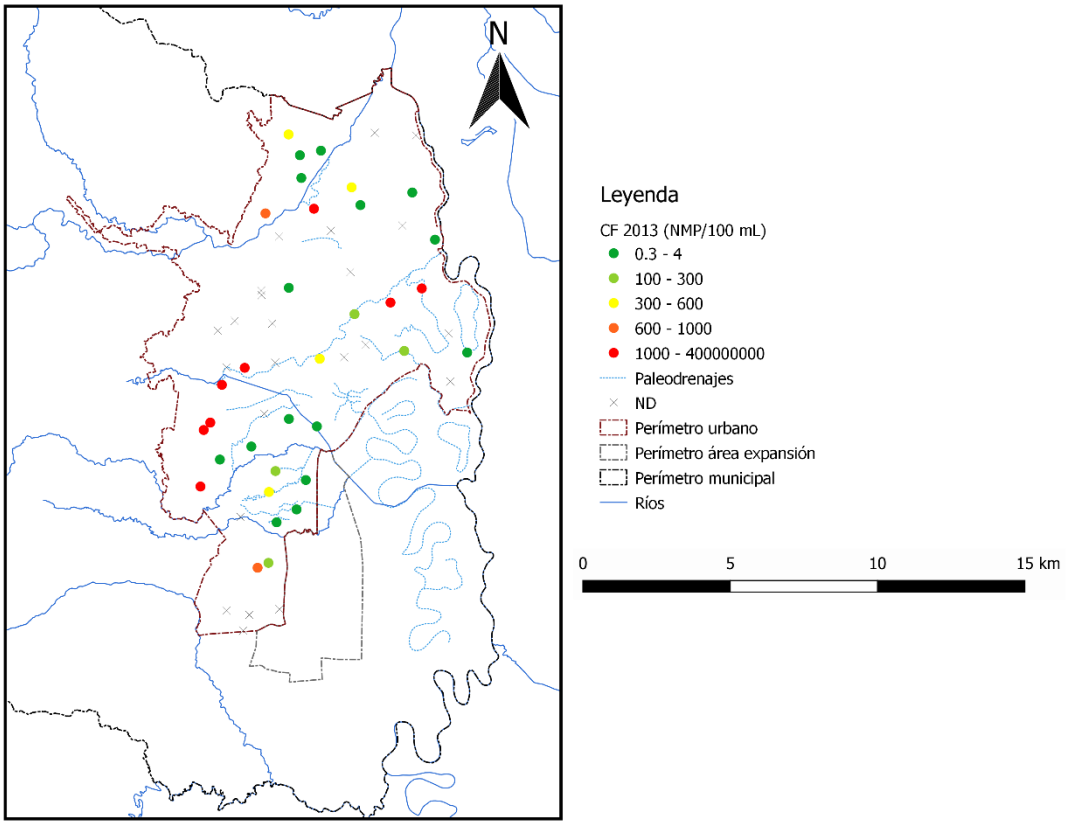


Figura 3-48 Coliformes fecales en el año 2013

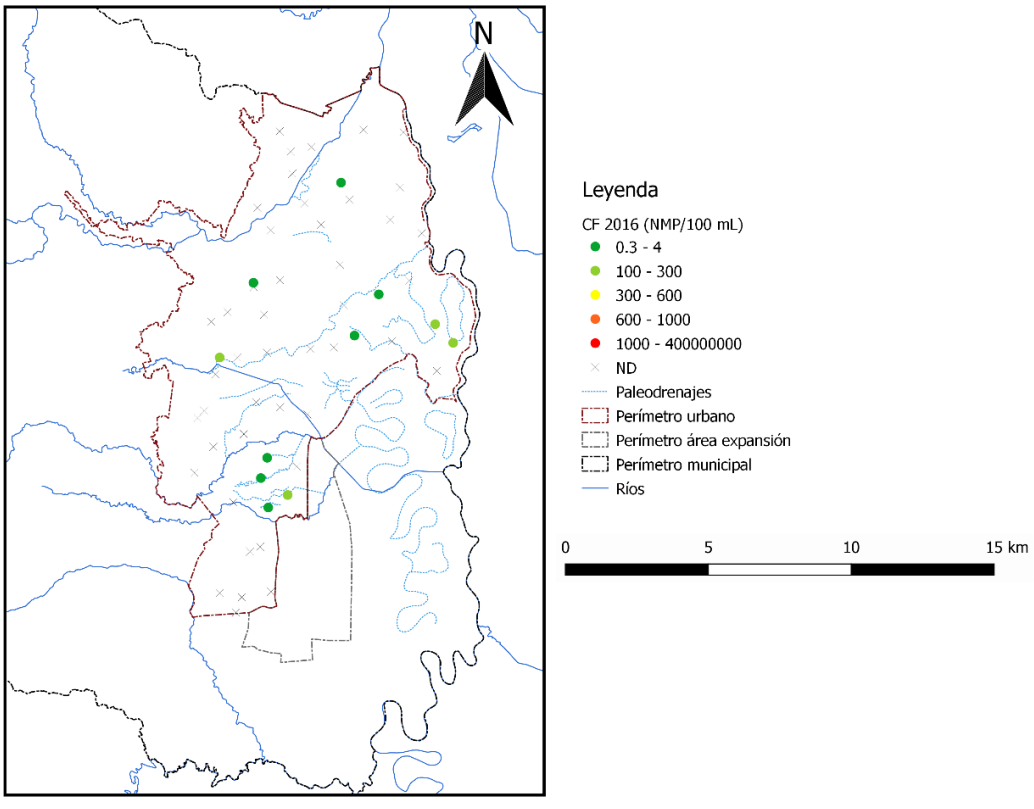


Figura 3-49 Coliformes fecales en el año 2016

Finalmente, los coliformes totales resaltan más puntos con valores elevados que los coliformes fecales. En este caso tampoco se puede concluir una evolución en el tiempo, aunque se resaltan varias zonas con valores por encima de 1000 NMP/100mL: en el norte de la ciudad, en las zonas cercanas al río Cali, entre los ríos Cañaveralejo y Meléndez, y en algunos puntos ubicados en la comuna 22.

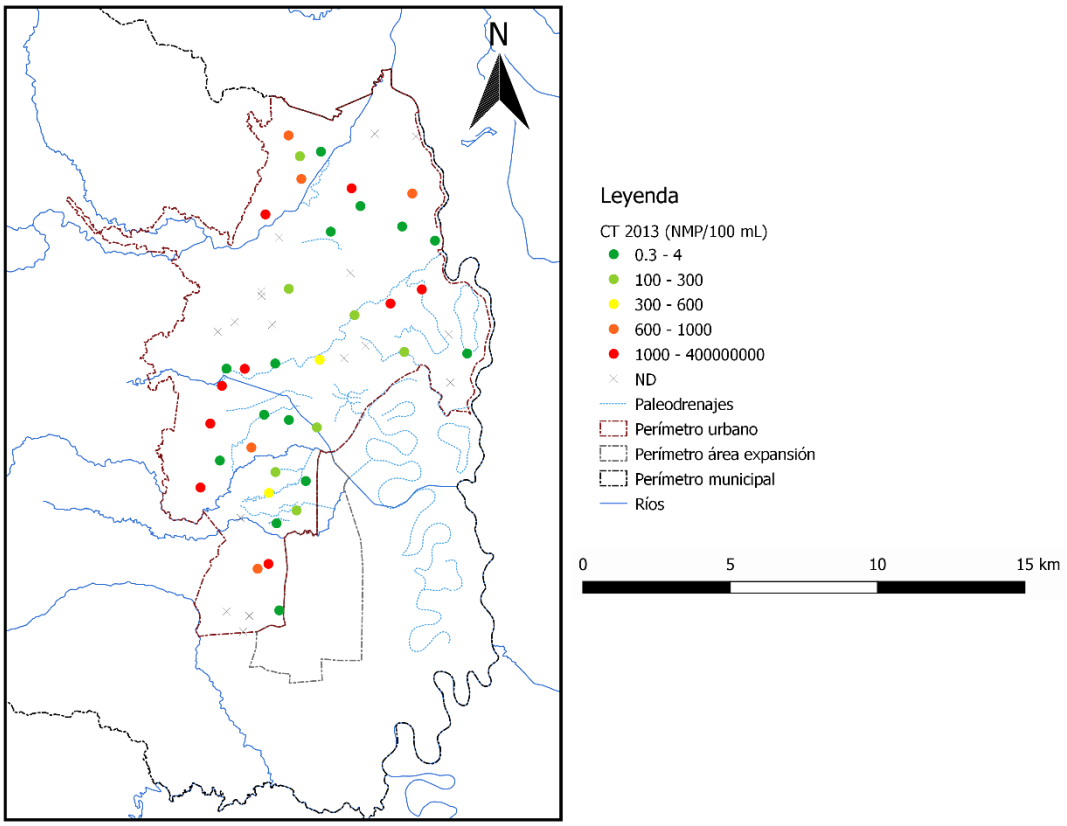


Figura 3-50 Coliformes totales en el año 2013

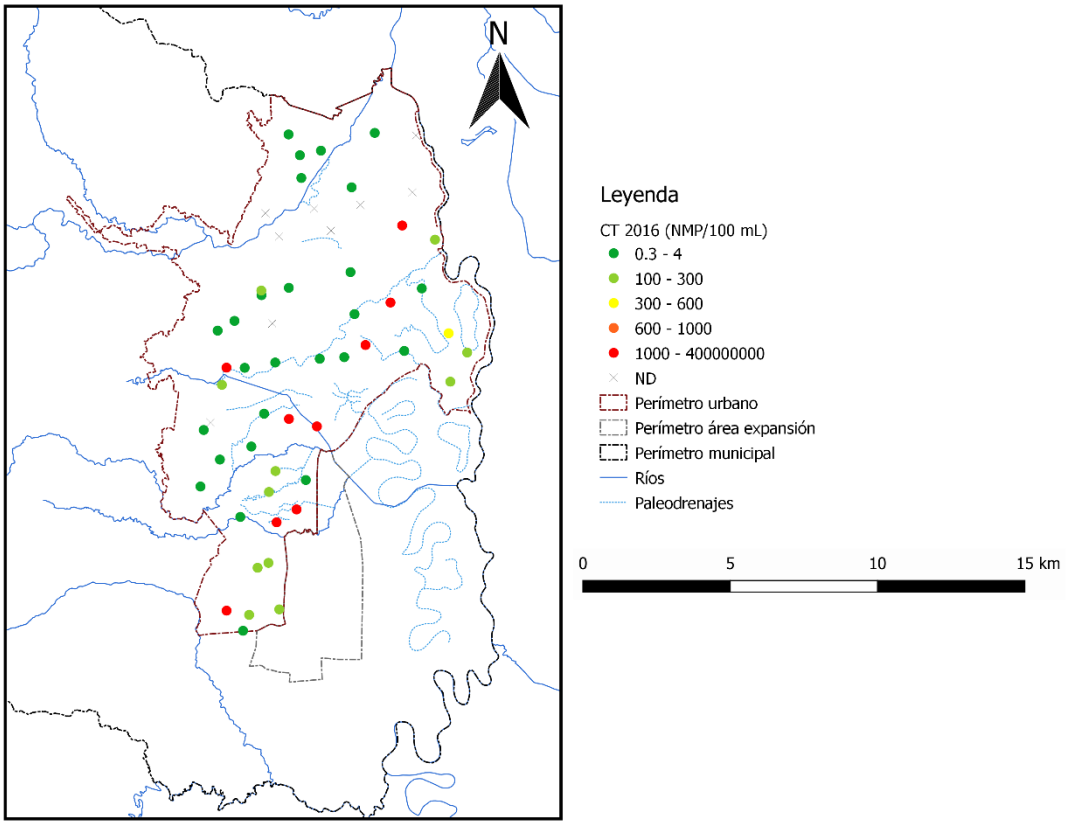


Figura 3-51 Coliformes totales en el año 2016

Los parámetros analizados en esta sección indican contaminación en algunos puntos (ver Figura 3-43 a Figura 3-51) que se pueden resumir en las siguientes zonas de la ciudad en donde se requiere más atención con el objetivo de mejorar el monitoreo de la calidad del agua subterránea.

La contaminación microbiológica en la ciudad de Cali puede darse principalmente por rupturas en el sistema de alcantarillado, que producen infiltración de aguas contaminadas al acuífero. Sin embargo, los indicadores en algunos puntos pueden deberse a fuentes puntuales de contaminación que sólo fueron medidas en determinado muestreo pero que no se mantienen en el tiempo. Otra fuente potencial de contaminación para las aguas subterráneas en la ciudad que debe ser monitoreada en mejor detalle son los ríos en las zonas de recarga, donde el agua que entra en el área acuífera se infiltra haciendo parte de la recarga por ríos.

En este análisis existen dos zonas de atención que coinciden con las zonas de descarga del acuífero, confirmadas con el análisis hidroquímico y de isopiezas: el área comprendida entre los ríos Cañaveralejo y Meléndez, y el paleodrenaje del río Cañaveralejo. Ambas son zonas de descarga en donde la contaminación proveniente de otras partes del acuífero puede estar concentrándose debido al funcionamiento del sistema. Esto explicaría que allí se observen indicadores de contaminación mayores que en las zonas de recarga. Particularmente, en la zona entre los ríos Cañaveralejo y Meléndez, debe considerarse también la contaminación proveniente de estos ríos como potencial fuente de contaminación al acuífero.

Además de estas dos zonas, se resalta como área de atención la zona centro de la ciudad y la zona norte, alrededor del río Cali. Se conoce que en estas zonas se encuentra el sistema de alcantarillado de la ciudad más antiguo probablemente tenga rupturas por donde se infiltra el agua. Por lo tanto, podría ser que las fugas del alcantarillado sean la principal causa de contaminación. Por lo anterior, es necesario identificar puntualmente la ubicación de estos

daños y analizar detalladamente si existe una correlación entre la contaminación y el sistema de alcantarillado, o si existen otras fuentes que puedan estar influyendo.

Otra de las conclusiones principales de este análisis es la necesidad de realizar el monitoreo a todos los puntos de la red de monitoreo de agua subterránea, para aquellos parámetros que son indicadores principales de contaminación como la conductividad eléctrica, los nitratos, los coliformes totales y los coliformes fecales, DQO, DBO y COT. Realizar estos análisis por lo menos dos veces al año, continuamente y solo con los parámetros seleccionados, permitirá hacer un monitoreo más eficiente, contar con los datos necesarios para el seguimiento y evaluar si existen zonas con tendencias al aumento en la contaminación.

3.3 Modelación numérica

El modelo numérico de la Zona Urbana de Santiago de Cali es un modelo en tres dimensiones que se desarrolló utilizando como base el modelo conceptual, los datos recopilados durante la fase de aprestamiento y el modelo numérico desarrollado anteriormente por la CVC para todo el Valle del Cauca. A través de un proceso participativo organizado con los profesionales del DAGMA y de la CVC, se determinó el área del modelo numérico, el número de capas y la resolución mínima que debía tener el modelo para garantizar que se dé respuesta a las necesidades de la autoridad ambiental en el manejo de las aguas subterráneas.

Con el fin de potencializar el uso de esta herramienta de modelación, se realizaron dos jornadas de capacitación a los profesionales del DAGMA, y con ello garantizar el desarrollo colaborativo del modelo. El Anexo digital “Capacitaciones” recoge el material de las capacitaciones.

3.3.1 Código iMODFLOW

El modelo numérico se desarrolló utilizando iMOD (interactive MODeling o modelado interactivo, (http://oss.deltares.nl/web/imod/home), una interfaz de código abierto desarrollada por Deltares para crear modelos de agua subterránea utilizando conceptos de MODFLOW. La interfaz permite construir y correr grandes modelos de flujo de agua subterránea, incluyendo la generación interactiva de submodelos. Con iMOD la resolución del modelo es independiente de la resolución de los insumos y puede ser definida por el usuario según sus objetivos y las capacidades computacionales. iMOD también se creó para facilitar la participación de las partes interesadas durante el proceso de modelación.

Esta herramienta permite importar modelos de MODFLOW y exportarlos para obtener los paquetes con el formato básico de MODFLOW, lo que facilita el uso de otras herramientas para el análisis de resultados.

3.3.2 Discretización del modelo

3.3.2.1 *Discretización espacial*

Para evitar efectos de las fronteras del modelo en los resultados en la zona de interés, zona urbana de Cali, se extendieron los límites del modelo para Cali algunos kilómetros en las direcciones norte, sur y este (Figura 3-52). El límite norte corresponde al Río Arroyohondo, en el municipio de Yumbo; al sur el límite corresponde al río Jamundí, al este se definió una franja de 3 km al oriente del río Cauca y al oeste el límite corresponde con las formaciones rocosas volcánicas (Kv) de la cordillera occidental que bordean la cuenca sedimentaria. Las

formaciones terciarias (Guachinte, Ferreira y Jamundí) se dejaron como activas, permitiendo el flujo lateral de estas formaciones hacia los depósitos no consolidados de las unidades A y C.

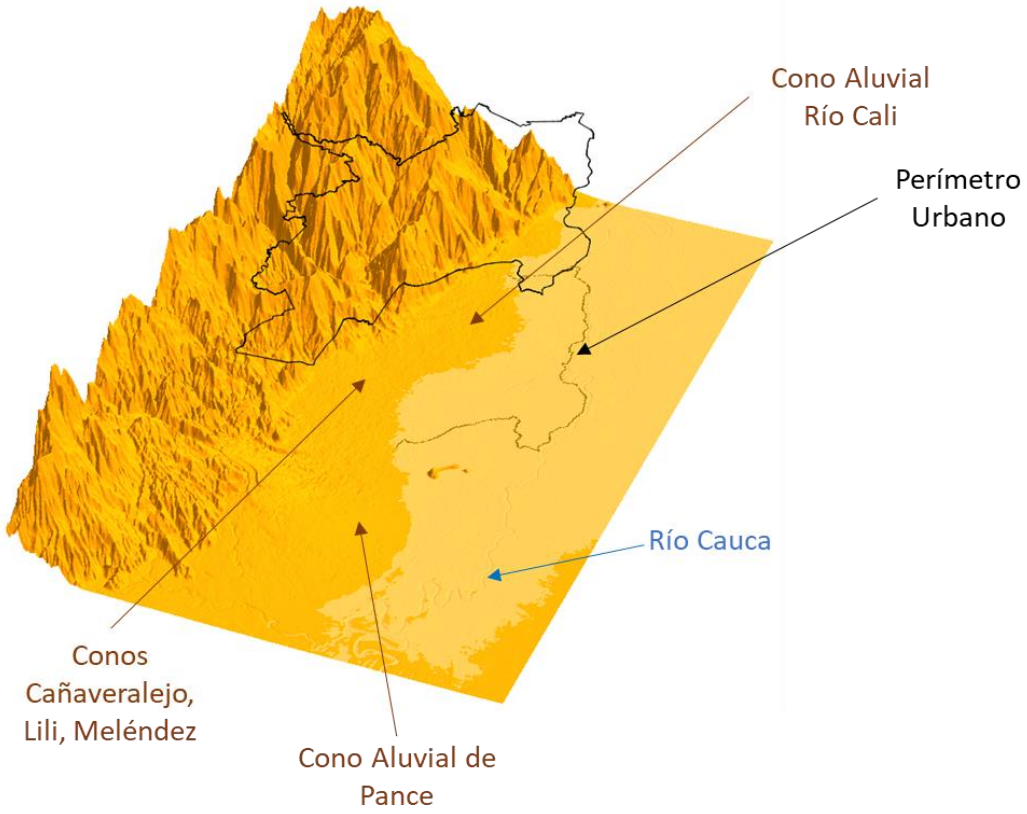


Figura 3-52 Dominio del modelo numérico

Con base a los objetivos del modelo, la morfología, las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, y los procesos que ocurren en el acuífero, y que son objeto de estudio, se determinó el número de capas y sus características (Figura 3-53):

- Capa 1: 3 metros de espesor. Para simular los flujos a galerías someras y recarga de tuberías
- Capa 2: de 3 a 10 metros de profundidad (7 metros de espesor) para simular los flujos a galerías más profundas, recarga y drenaje por tuberías.
- Capa 3: de 10 a 25 m de profundidad (15 metros de espesor) para simular los bombeos someros.
- Capa 4: con un espesor variable, desde el fondo de la capa 3 hasta la base de la Unidad A/techo de la Unidad B. Esta última superficie se definió mediante cortes geológicos analizando información secundaria y las columnas litológicas digitalizadas durante la fase de aprestamiento
- Capa 5: corresponde al fondo de la unidad B, también definida mediante análisis de información secundaria y las columnas litológicas.

- Capa 6: corresponde al fondo de la unidad C, es decir la base hidrogeológica, la cual se definió con base a varias fuentes de información. Por un lado, se dispone de columnas litológicas que llegan al basamento. También se cuenta con perfiles geoeléctricos del estudio de microzonificación sísmica llevado a cabo por el Servicio Geológico Colombiano, y se utilizó información sobre la geomorfología y el sistema de fallas. En la parte occidental del modelo, la base hidrogeológica se situó a 480 metros sobre el nivel del mar, dado que las arcillas y arcillolitas encontradas en los pozos profundos en partes cercanas del Valle del Cauca se consideran materiales impermeables de gran espesor, que pueden aparecer en toda la zona y funcionar como un borde a través del cual no circula el agua subterránea. Esta base hidrogeológica sigue en las laderas la forma del basamento hasta aflorar en superficie por encima de los conos aluviales, dando al modelo una forma de fosa.

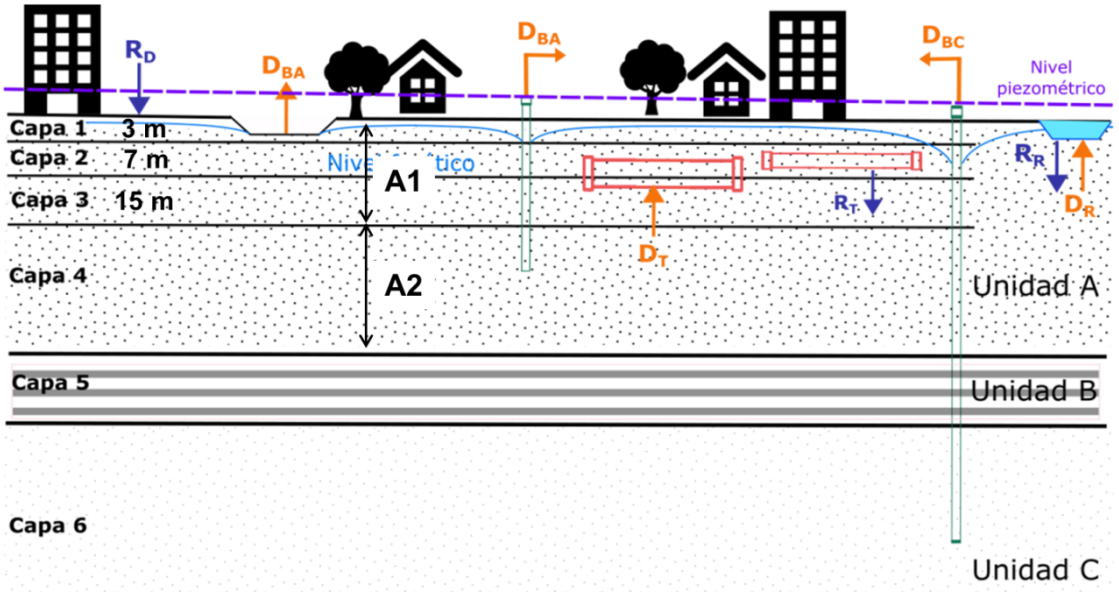


Figura 3-53 Esquematización de las capas del modelo numérico

El modelo se construyó utilizando insumos con diferentes resoluciones según la disponibilidad de los datos. Como se mencionó en la sección 3.3.1, iMOD permite alimentar el modelo con diferentes resoluciones. Durante el preprocesamiento de los insumos previo a la simulación, la interfaz adapta la resolución de la malla de cada insumo a la resolución de simulación.

Para el análisis de los resultados, el modelo se corrió con celdas de 25 metros por 25 metros, mientras que los insumos tienen diferentes resoluciones que se resumen a continuación:

Tabla 3-8 Resolución de los insumos del modelo

Insumo	Resolución
Recarga difusa	250m
Propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento)	25m
Estructuras de drenaje como acequias, quebradas, zanjones, etc.	25m
Río Cauca y principales ríos tributarios del Cauca	Son líneas y por lo tanto independientes de la resolución de la malla

3.3.2.2 *Discretización temporal*

En total se desarrollaron 2 modelos con 2 discretizaciones temporales diferentes:

1) El primer modelo se corrió en estado estacionario utilizando datos promedios del período entre los años 2007 y 2017. Este modelo se calibró como se describe en la sección 3.3.8.
2) Un modelo en estado transitorio con períodos mensuales para los años 2007 a 2017. Los insumos para este modelo son promedios mensuales. Para mejorar la convergencia del modelo, cada mes se dividió en pasos de tiempo que varían de 1 a 15 días. Los resultados que arroja el modelo corresponden a los de los últimos días de cada mes. Este modelo no pudo calibrar porque no se disponía de mediciones mensuales de niveles de agua subterránea, sin embargo, se ha hecho una comparación cualitativa entre la información proporcionada por expertos locales y los resultados del modelo. Por tanto, se espera que aunque el modelo no esté calibrado cuantitativamente, los resultados estén representando de forma aproximada la realidad.

3.3.3 Condiciones de frontera

El modelo representa las condiciones de flujo de agua subterránea en los sedimentos no consolidados y en las formaciones terciarias de Jamundí, Guachinte, Ferreira y Terrón Colorado, mientras que las celdas ubicadas sobre la Formación Volcánica se desactivaron (celdas inactivas). La hipótesis es que la formación volcánica es mayormente impermeable y que el agua que llega a infiltrarse aflora nuevamente pocos metros después en los cauces que bajan de la cordillera hacia la zona plana. Se asume que las formaciones terciarias activas tienen potencial de infiltración y conexión hidráulica con los sedimentos cuaternaríos a través de los sistemas de fallas y diaclasas. Esta simulación es una simplificación de los procesos complejos y aun inciertos sobre la conexión hidráulica que existe entre la cuenca de sedimentos no consolidados y las formaciones rocosas de las cordilleras.

Se definieron fronteras de dos tipos:

- Una frontera de nivel constante en el límite Este del modelo, correspondiente a los niveles tomados del modelo numérico regional de la zona sur del Valle del Cauca.

- Fronteras de no flujo en los límites norte y sur del modelo. La hipótesis es que dichos límites se encuentran suficientemente alejados de la zona de interés, y que el flujo norte-sur es despreciable en comparación con el flujo este-oeste.

Se realizaron pruebas cambiando las condiciones de contorno en estos bordes y forzando flujos de sur a norte. Sin embargo, el gradiente este-oeste es mucho mayor y domina sobre el gradiente sur-norte, de tal forma que el flujo sur-norte queda enmascarado. La zona de interés está a unos kilómetros de los bordes sur y norte del modelo. Se espera que posibles errores que se pudieran generar en los bordes desaparecerían en la zona de interés, por lo que se ha decidido dejar los bordes sur y norte como frontera de “no-flujo”.

Para apoyar la hipótesis de que el flujo sur-norte es despreciable en comparación con el flujo este-oeste, se analizaron los datos hidroquímicos y se ha constatado que a lo largo del río Cauca el agua muestra una señal hidroquímica característica, lo cual indicaría que el agua subterránea fluye hacia la superficie, atravesando el lente arcilloso de la Unidad B, y descarga cerca de o en el mismo río Cauca.

3.3.4 Propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas

La caracterización de las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas se detalla en el modelo conceptual, sección 3.2.3.2. Estos valores son promedios para cada Unidad, mientras que para el modelo numérico se requiere un valor de conductividad hidráulica por celda para cada capa. El procedimiento para obtener estos se detalla a continuación:

1) Se asignaron unos valores de conductividades hidráulicas a cada clase litológica, determinados por expertos.

Tabla 3-9 Conductividades hidráulicas (horizontal y vertical) asignadas a cada clase litológica para el cálculo de las conductividades para cada capa del modelo (fuente propia – tabla creada por expertos locales en hidrogeología)

Clase litológica	Nombre	Kh (m/d)	Kv (m/d)
A	Arena	20	4
A-L	Arena con Limo	3	0.6
A-Ar	Arena con Arcilla	3	0.6
L	Limo	1	0.2
L-A	Limo con Arena	1	0.2
L-Ar	Lino con Arcilla	1	0.2
Ar	Arcilla	10^{-4}	$2x10^{-5}$
Ar-A	Arcilla con Arena	10^{-2}	$2x10^{-3}$
Ar-L	Arcilla con Limo	10^{-3}	$2x10^{-4}$
T	Turba	10^{-4}	$2x10^{-5}$
G	Gravas	55	11
C	Cantos	55	11
B	Basamento	10^{-6}	$2x10^{-7}$
Cal	Caliche	10^{-6}	$2x10^{-7}$
Con	Conglomerados	55	11

2) Se calculó la conductividad hidráulica horizontal (Kh) y vertical (Kv) equivalente para la parte del pozo que corresponde a cada capa del modelo utilizando la información litológica. Para el cálculo de la conductividad hidráulica horizontal se utilizó la siguiente expresión

$$K_{eq} = \frac{\sum b_i Kh_i}{espA}$$

donde b_i es la longitud de cada litología en la porción del pozo que cae dentro de la Unidad A, Kh_i es la conductividad hidráulica horizontal de la clase litológica, espA es el espesor de la Unidad A, y K_{eq} es la conductividad hidráulica equivalente de la Unidad A.

Para el cálculo de la conductividad hidráulica vertical se utilizó:

$$K_{eq} = \frac{L}{\sum \frac{L_i}{Kv_i}}$$

dónde Li es el porcentaje de cada litología en la parte del pozo que cae dentro de cada capa, Kv_i es la conductividad hidráulica vertical de la clase litológica, y K_{eq} es la conductividad hidráulica equivalente para esa parte del pozo que queda dentro de la capa del modelo

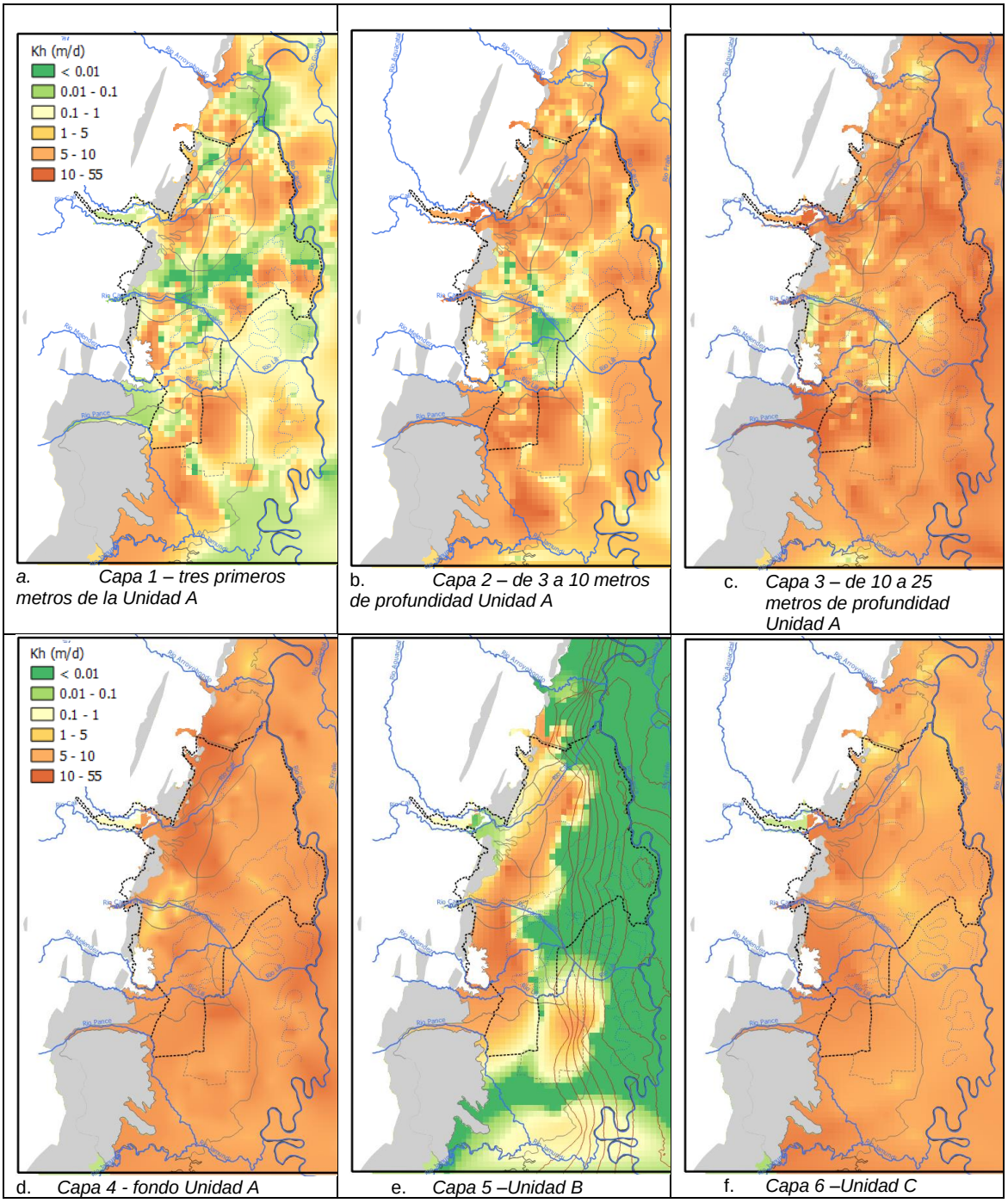
3) Se interpolaron las conductividades hidráulicas equivalentes entre los pozos para cada una de las capas utilizado Kriging.

La Figura 3-54 presenta las conductividades hidráulicas horizontales para las 6 capas del modelo. Para la unidad A, se observa alta heterogeneidad en la primera capa del modelo, correspondiente a los tres primeros metros. Los sedimentos más gruesos de la capa más superficial (Figura 3-54a) se presentan en la parte alta y media del cono aluvial de Pance, y al sur del cono aluvial del río Cali. Los conos aluviales de los ríos Cañaveralejo, Lili y Meléndez presentan heterogeneidad, con grandes variaciones entre materiales finos y gruesos en pequeñas distancias. Esto coincide con lo expresado por los profesionales del departamento de recursos hídricos del DAGMA sobre la alta heterogeneidad de estos conos aluviales. Los depósitos del antiguo cauce del río Cañaveralejo están constituidos principalmente por materiales finos, arcillosos a limo-arcillosos.

Para las otras capas correspondientes a la unidad A, capas 2 a 4 (Figura 3-54 b, c, y d), las conductividades hidráulicas van aumentando progresivamente con la profundidad. Es decir, la cantidad de materiales finos va disminuyendo. Esto resulta a su vez en capas más homogéneas.

La capa 5, correspondiente a la unidad B, tiene conductividades propios de materiales arcillosos a arcillo-limosos en la zona centro-oriental, donde efectivamente la unidad B ocurre con más de 5 metros de espesor, y separa a las Unidades A y C (ver Figura 3-54e). En la parte de los conos aluviales la Unidad B se pincha, y la capa 5 presenta conductividades hidráulicas más altas, indicando una conexión hidráulica entre las 6 capas del modelo, en donde se tendrá una sola unidad hidrogeológica. Finalmente, la capa 6 correspondiente a la Unidad C, es bastante homogénea con conductividades que varían entre los 5 y 55 m/d.

En cuanto a las conductividades hidráulicas verticales (Figura 3-55) se observan patrones muy similares a los de las conductividades hidráulicas horizontales, con mayor heterogeneidad en las capas más superficiales.



a. *Capa 1 – tres primeros metros de la Unidad A*

b. *Capa 2 – de 3 a 10 metros de profundidad Unidad A*

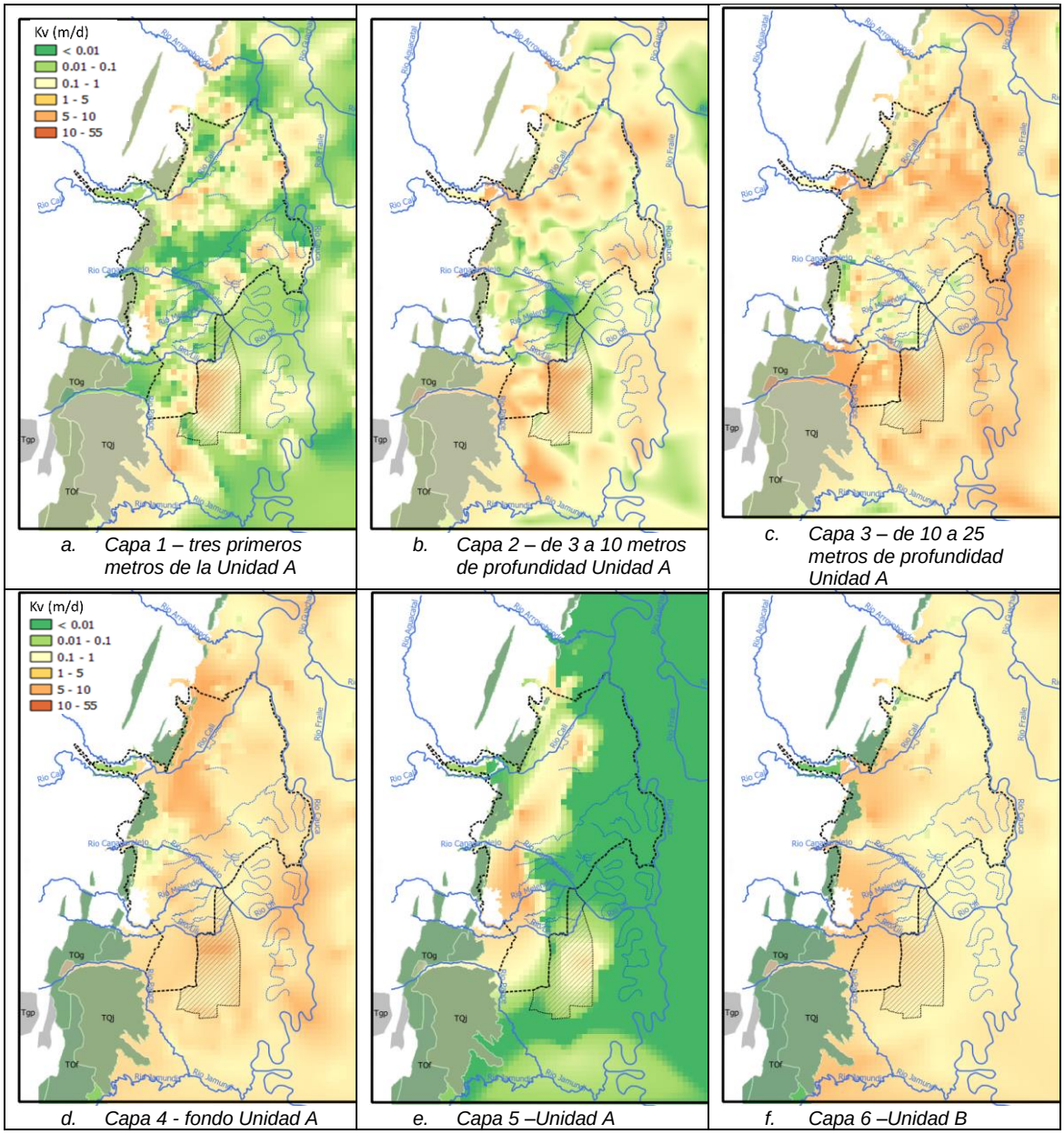
c. *Capa 3 – de 10 a 25 metros de profundidad Unidad A*

d. *Capa 4 - fondo Unidad A*

e. *Capa 5 –Unidad B*

f. *Capa 6 –Unidad C*

Figura 3-54 Conductividades hidráulicas horizontales interpoladas para las capas del modelo a partir de las conductividades equivalentes de las columnas litológicas.



a. *Capa 1 – tres primeros metros de la Unidad A*

b. *Capa 2 – de 3 a 10 metros de profundidad Unidad A*

c. *Capa 3 – de 10 a 25 metros de profundidad Unidad A*

d. *Capa 4 - fondo Unidad A*

e. *Capa 5 –Unidad A*

f. *Capa 6 –Unidad B*

Figura 3-55 Conductividades hidráulicas verticales interpoladas para las capas del modelo a partir de las conductividades equivalentes de las columnas litológicas.

La transmisividad en la zona del modelo varía de 7m2/d en la zona alta de los conos, a casi 900m2/d en la llanura aluvial del río Cauca. La Figura 3-56 muestra las transmisividades calculadas para la Unidad A (una vez calibrado el modelo)

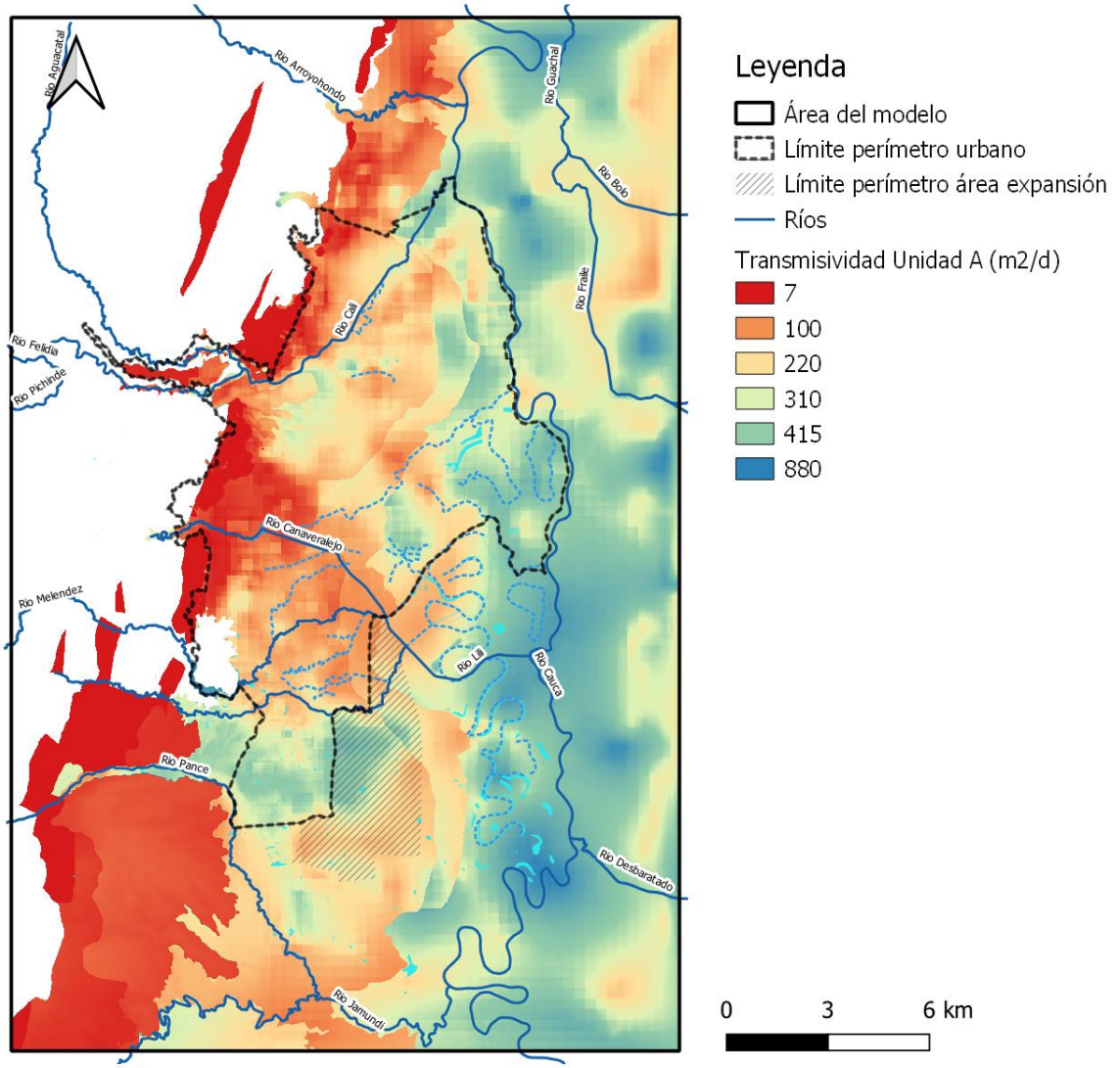


Figura 3-56 Transmisividad Unidad A en m2/d (transmisividad total de las capas 1 a 4 del modelo)

Los coeficientes de almacenamiento asignados a las diferentes capas se ajustaron según el grado de confinamiento de cada capa de acuerdo a la conductividad hidráulica, y a los coefcientes de almacenamiento identificados por la CVC para las diferentes unidades hidrogeológicas en el Valle (CVC, 2016):

Tabla 3-10 Coeficientes de almacenamiento

Unidad	Capa del modelo	Coeficiente de almacenamiento
A	1	0.12
A	2	0.12
A	3	0.0056
A	4	0.0056
B	5	0.00007
C	6	0.00007

3.3.5 Recarga

En la modelación matemática, la recarga difusa entra al modelo como una condición de contorno, mientras que la recarga a través de los cauces superficiales es calculada por el modelo según el nivel de agua en el río, el nivel de agua subterránea, y las características del cauce.

En la sección 3.2.5.1 se explicó en detalle la metodología utilizada para calcular la recarga difusa del acuífero, que finalmente da como resultado un valor diario de recarga. Para el modelo se utilizaron los resultados de ese ejercicio y se calcularon los promedios mensuales multianuales, los promedios mensuales, y el promedio total (Figura 3-30).

3.3.6 Aguas superficiales

Los ríos en el modelo se representan como cuerpos de agua permanentes desde los cuales puede infiltrarse agua hacia el acuífero y/o se puede drenar agua del acuífero.

El río Cauca y los ríos tributarios (Jamundí, Pance, Meléndez, Lili, Cañaveralejo, Cali y Arroyohondo) se pusieron en el modelo en el paquete RIV utilizando la herramienta ISG de iMOD (Figura 3-57). Esta herramienta almacena la información relevante de los cuerpos de agua superficiales que están en conexión directa con el agua subterránea y los transforma en insumos para el paquete RIV. Dentro de los datos del ISG están:

- La trayectoria de los ríos
- Niveles, incluyendo las variaciones en el tiempo que se toman a partir de las mediciones en las estaciones limnigráficas (Figura 3-57).
- Fondo del lecho del río
- Resistencia del lecho del río
- Secciones transversales de los ríos.

En el modelo los ríos están activos desde los bordes del modelo que corresponden a la parte alta de los conos aluviales.

Adicionalmente se incorporaron en el paquete RIV la red de derivaciones/acequias en el sector de Pance, las cuales corresponden a cuerpos de agua superficiales que pueden estar recargando directamente al acuífero (ver Figura 3-57). El resto de los cursos de agua superficial como son quebradas, humedales, zanjones, y acequias o derivaciones se colocaron en el modelo utilizando el paquete DRN.

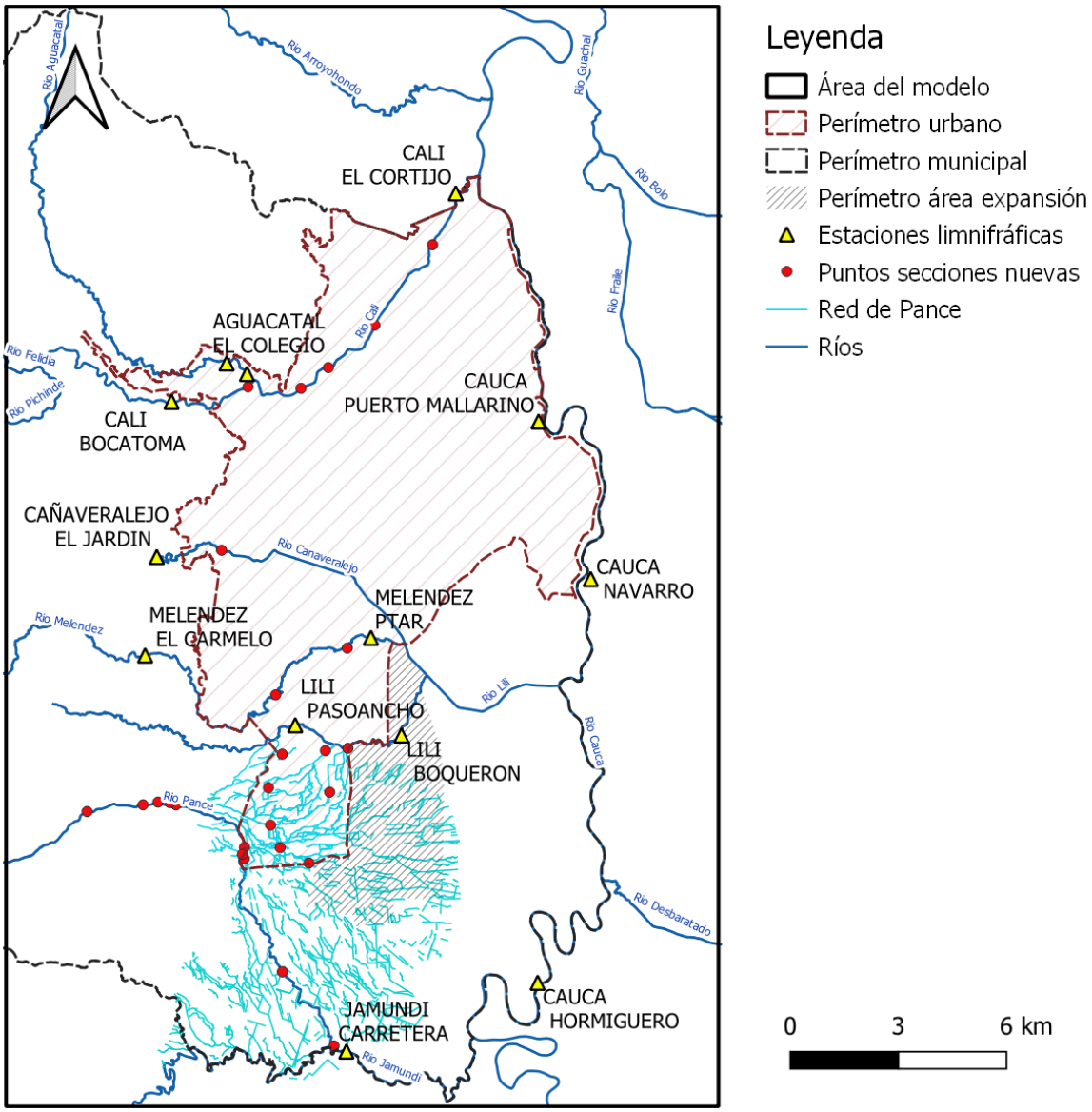


Figura 3-57 Ríos del modelo

3.3.6.1 *Esquematización de los ríos en el paquete RIV*

Río Cauca:

- Batimetría: para la esquematización de la batimetría del Río Cauca se utilizaron cinco secciones transversales del río. Se interpoló entre estas secciones siguiendo el curso del río Cauca.

- Conductancia: al lecho del río se le asignó una resistencia de 1 día (con base a datos de la bibliografía) la cual iMOD utiliza para calcular la conductancia con base al área del lecho del río.

- Niveles: las cinco secciones cuentan con datos diarios de niveles medidos en estaciones limnigráficas. Con los datos diarios se calcularon los promedios mensuales para los años de 2007 a 2017 que se utilizaron para el modelo transitorio y el nivel

promedio multianual para el modelo estacionario. Para asignar un nivel a cada celda del modelo que cruza por el Río Cauca, se hizo una interpolación lineal entre las estaciones con datos medidos.

Ríos tributarios:

- Batimetría: Para representar adecuadamente las secciones transversales de los ríos tributarios se desarrolló una campaña de campo en la que se levantó en ciertos puntos de interés la información de profundidades y anchos en los cauces de los ríos incorporados en el modelo (ver Figura 3-57). A partir de estas secciones y utilizando también las secciones de las estaciones limnigráficas se realizó una interpolación linear, para representar de forma adecuada las variaciones en la sección transversal de los ríos.

- Conductancia: al lecho de los ríos se le ha asignado una resistencia de 1 día que iMOD utilizó para calcular la conductancia con base al área del lecho del río en cada celda.

- Niveles: para los ríos con estación, se utilizaron los niveles medidos en esa estación y se extrapolaron a todo el río tomando como referencia el MDE. Se calcularon los promedios mensuales para los años de 2007 a 2017 para el modelo transitorio, y el nivel promedio multianual para el modelo estacionario.

Red de derivaciones de Pance:

Se tiene muy poca información sobre los niveles y el fondo de estos cauces. Mediante consultas con los especialistas de la unidad de recursos hídricos del DAGMA y mediante visitas de campo se pudo corroborar que estas derivaciones pueden estar recargando al acuífero en el sector del cono aluvial del río Pance. Para representarlas en el modelo se llevó a cabo una campaña de campo para obtener secciones transversales y se tomaron niveles.

Como simplificación, y a falta de datos de mayor resolución, se utilizaron los niveles medidos en la campaña de campo como niveles medios utilizados en el modelo estacionario. Para el modelo transitorio se utilizaron niveles contantes.

- Batimetría: Se utilizaron las secciones levantadas como secciones medias que se extrapolaron a todas las derivaciones.

- Conductancia: al lecho del río se le asignó una resistencia de 1 día, la cual iMOD utilizó para calcular la conductancia con base al área del lecho del río en cada celda.

- Niveles: se utilizaron los niveles medidos en la campaña de campo y se extrapolaron tomando como referencia el MDE.

Los lagos que se encuentran en el sector de Pance están conectados al denso sistema de derivaciones, es decir, están alimentados por las acequias que corren en el sector (Figura 3-58). Estos lagos se incluyeron en el paquete RIV ya que, como las derivaciones, podrían estar recargando al acuífero.

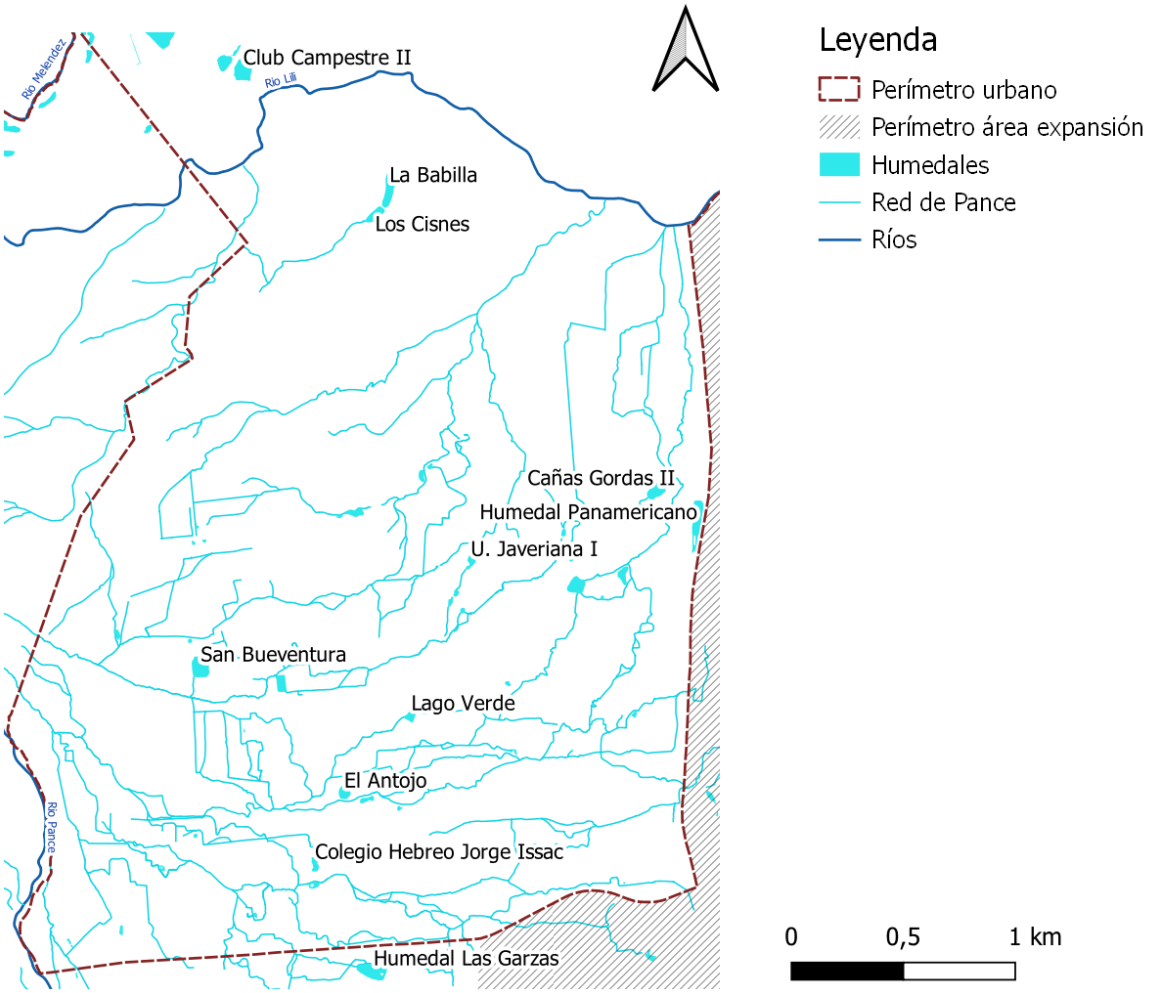


Figura 3-58 Detalle de la red de derivaciones de Pance y de los principales lagos/humedales del sector.

3.3.6.2 *Esquematización del sistema de drenaje en el paquete DRN*

El paquete DRN se utiliza para simular aquellos cauces superficiales que únicamente drenan el acuífero y la escorrentía superficial. Además el paquete DRN se utiliza para simular las filtraciones de agua subterránea a galerías filtrantes, tuberías, y al sistema de alcantarillado.

Los niveles de drenaje de los cauces superficiales son prácticamente desconocidos ya que no se dispone de datos de los cursos individuales, lo que no permite diferenciar entre ellos y hace que sólo se pueda estimar un nivel de drenaje promedio.

Los diferentes tipos de drenaje superficial se dividieron en tres grupos:

- Los drenajes principales que incluyen los zanjones, humedales en la zona de descarga, riachuelos, zanjas, etc. El nivel de drenaje se fijó en 1,5 metros por debajo del MDE. La resistencia al flujo se fijó en 1 día.

- Canales de riego en la zona agrícola. El nivel de drenaje se situó a 1,5 metros por debajo del MDE y la resistencia al flujo en un día. Cabe destacar que estos canales de

riego solamente drenan el acuífero. Toda la infiltración que se produce por el riego está incluida en la recarga difusa (ver sección 3.2.5.1).

- Drenaje a nivel de terreno. Con el fin de simular la escorrentía superficial se crearon drenes en todas las celdas en la misma cota que el MDE con una resistencia de 0,1 días.

En la Figura 3-59 se muestran los ríos y los sistemas de drenaje 1 y 2 incluidos en el modelo:

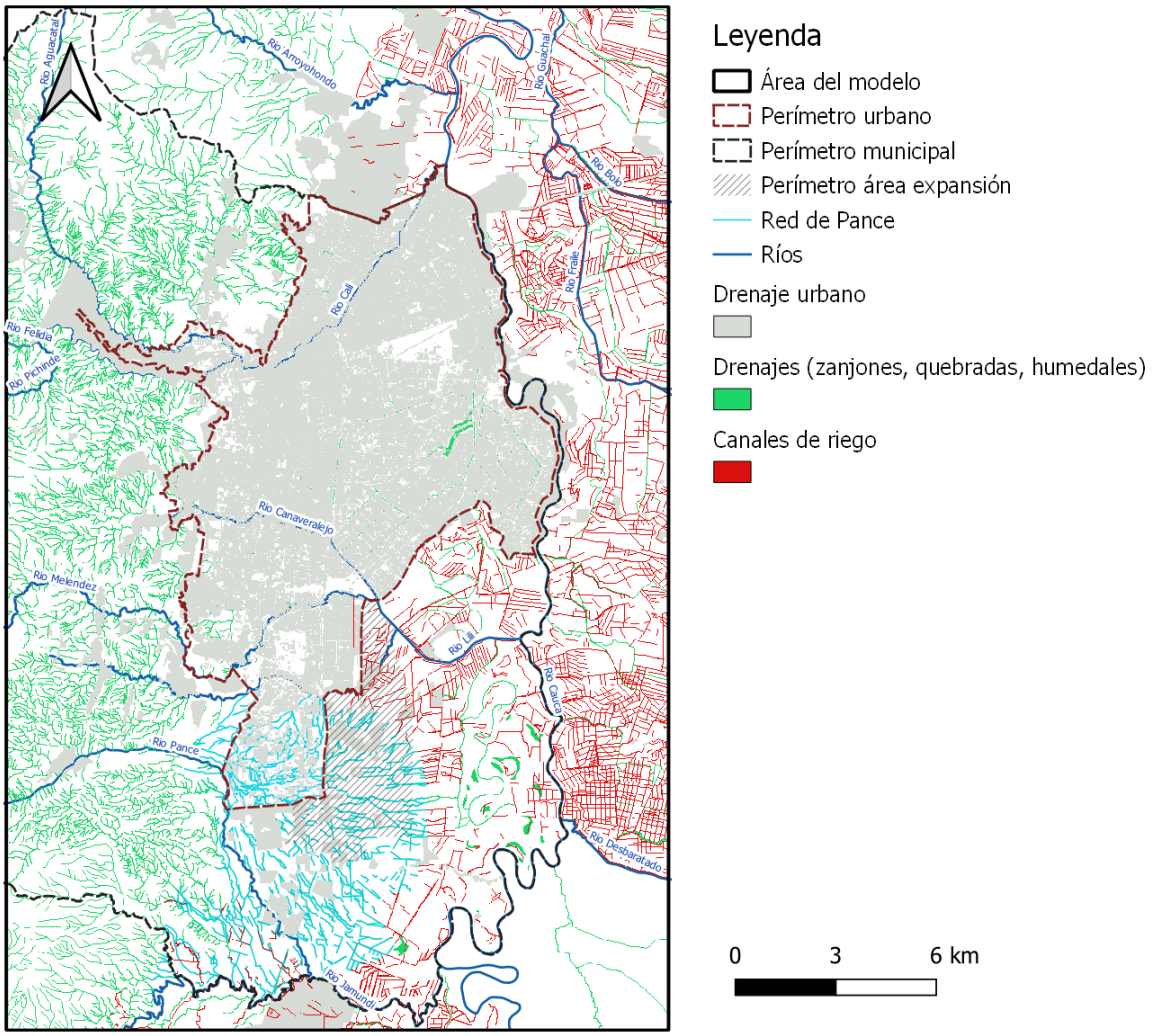


Figura 3-59 Sistema de drenes incorporado en el modelo numérico. Sistema de drenaje 1 (verde) y sistema de drenaje 2 (naranja).

Las filtraciones a tuberías subterráneas, a galerías filtrantes y al sistema de alcantarillado se simularon con un cuarto sistema de drenaje situado dos metros por debajo del nivel del terreno. Este sistema de drenaje se ubicó solamente bajo las zonas urbanizadas y no bajo las zonas rurales o zonas verdes.

3.3.7 Pozos de bombeo

La información de pozos de bombeo para la zona de análisis del modelo numérico se obtuvo de los registros recopilados durante la fase de aprestamiento de los consumos reportados

tanto por el DAGMA en la zona urbana, como por la CVC en las zonas rurales. Esta información corresponde a los volúmenes de facturación entre los años 2007 y 2017, cuya información se encuentra reportada como se indica en la Tabla 3-11.

Tabla 3-11 Datos de volúmenes de bombeo para los diferentes períodos

Corporación	Período	Fuente de la información – volúmenes de bombeo
DAGMA	2007 -2012	Volúmenes anuales reportados por el grupo de recursos hídricos al área de facturación
	2013 - 2017	Desde el 2013 el DAGMA comenzó a instalar medidores en los pozos para regular los consumos y la facturación. Para este período los volúmenes asignados se dividieron dependiendo de si el pozo cuenta o no con medidor: 1. Pozos con medidor: volúmenes medidos 2. Pozos sin medidor: se asignó el volumen anual concesionado.
CVC	2007 - 2017	Consumos facturados de los pozos entre el año 2007 y 2017 (correspondientes a volúmenes semestrales por pozo).

Para el modelo se requiere información de consumos mensuales por pozo (expresados en m^3/día), razón por la cual se realizaron los siguientes procedimientos para ajustar la información de consumos del DAGMA en los períodos requeridos:

1) Se digitalizaron los consumos entre el año 2007 y 2010, reportados por el área de facturación en formato PDF. Durante dicho período el DAGMA realizaba facturaciones semestrales. Para el período de 2008, sólo se logró recopilar y digitalizar información del primer semestre, por lo que para completar el volumen anual, se duplico el consumo del primer semestre para el año 2008. :La información digitalizada se organizó por año en las siguientes columnas: Código pozo, uso, volumen anual.
2) A partir del año 2011 el DAGMA ajustó el ciclo de facturación a períodos anuales. Para los años 2011 y 2012, se obtuvo información por pozo de los volúmenes anuales.
3) A partir del año 2013, el DAGMA cuenta con registros de consumos reportados mensualmente por los usuarios, los volúmenes anuales concesionado e información del uso facturado.
4) Teniendo en cuenta que el modelo requiere información de consumos mensuales se realizó un análisis de consumos entre los períodos 2013 y 2017, por pozo y por uso, con el fin de identificar los porcentajes de explotación por mes.
5) Se identificó por pozo información de: Cuáles tienen medidores, el uso, número de mediciones por año y el establecimiento que hace uso del pozo
6) De acuerdo a los usos identificados durante la fase de aprestamiento, se estandarizó el uso asignado al pozo.
7) Se identificó el número de registros por pozo por año y el total se presenta en la Tabla 3-12:

Tabla 3-12 Número de registros por año según el uso

Usos	2013	2014	2015	2016	2017	Total general de registros
Doméstico	74	78	53	53	53	311
Galería Filtrante			1	1	1	3
Industrial	41	43	42	42	42	210
Lavado de vehículos	232	240	198	198	198	1066
Riego	72	113	79	79	79	422
Total general	419	474	373	373	373	2012

8) Se identificó cuántos pozos tienen registros completos durante los doce meses (Tabla 3-13):

Tabla 3-13 Número de pozos por uso con registro completo durante los 12 meses de cada año

Uso	2013	2014	2015	2016	2017	Total general de pozos con registros completos en el año
Doméstico		1		7	14	22
Industrial	4	6		9	23	42
Lavado de vehículos	2	16	2	45	66	131
Riego		2	2	15	9	28
Total general	6	25	4	76	112	223

9) A partir de la información de los pozos con información de mediciones para todos los meses se calculó el promedio y porcentaje de consumo de cada pozo y luego se calculó el promedio por uso (Tabla 3-14)

Tabla 3-14 Promedio de consumo de un pozo clasificado por uso

USOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Doméstico	10.1	7.2	8.3	8.4	7.7	7.5	8.3	7.7	7.5	7.2	10.1	10.0	100.0
Industrial	11.1	7.1	8.3	8.0	8.3	9.2	8.0	6.6	8.8	7.9	8.7	8.0	100.0
Lavado de vehículos	7.5	9.9	6.8	6.9	11.0	9.5	6.8	16.1	6.0	5.7	5.9	7.8	100.0
Riego	9.1	10.3	7.1	7.4	5.3	6.0	9.1	9.8	9.6	10.4	7.6	8.3	100.0

10) Con la información de los consumos anuales y mensuales por pozo entre los año 2007 y 2017 se organizó un solo documento

11) Se adicionó una columna donde se identificaron los pozos, cuya sumatoria mensual de consumos es igual al volumen anual concesionado, profundidad, techo primer filtro, coordenadas, cota y sumatoria de filtros (obtenida de los diseños de los pozos)

12) Luego, cada pozo se relaciona una columna que permite identificar si el pozo tiene un porcentaje de asignación según el anexo “Porcentaje X Pozo”, en cuyo caso se etiqueta con la letra P. De lo contrario, se asigna la letra U para indicar que se deben manejar los porcentajes según el uso.

13) Por último, teniendo en cuenta si el consumo mensual es igual al facturado anualmente, se mantiene estos consumos mensuales sin aplicar los porcentajes, para los demás casos se trabaja con el volumen anual facturado y se aplican los porcentajes si el pozo tiene datos históricos entre 2013 y 2017, o por el porcentaje según los usos. El resultado de este análisis son los consumos mensuales en m^3/mes.

14) Se ejecuta el script de consumos donde se ajustan los consumos mensuales a m^3/día, dividiendo por el número de días del mes

Para la zona del Departamento del Cauca, de la cual solo se disponía de información sobre la ubicación de los pozos, pero no sobre su diseño o caudales de bombeo, se asumió que los pozos bombean un promedio de 200m^3/d. Estos poszos fueron incluidos en la modelación porque pueden tener influencia en la zona de interés.

Una vez hecho el cálculo de todos los bombeos en la zona de estudio, se observa que el volumen anual promedio extraído por los pozos de bombeo en el área del modelo es de 35 Mm^3.

La Figura 3-60 muestra la ubicación y los caudales de bombeo promedio de los pozos que se usaron para el modelo.

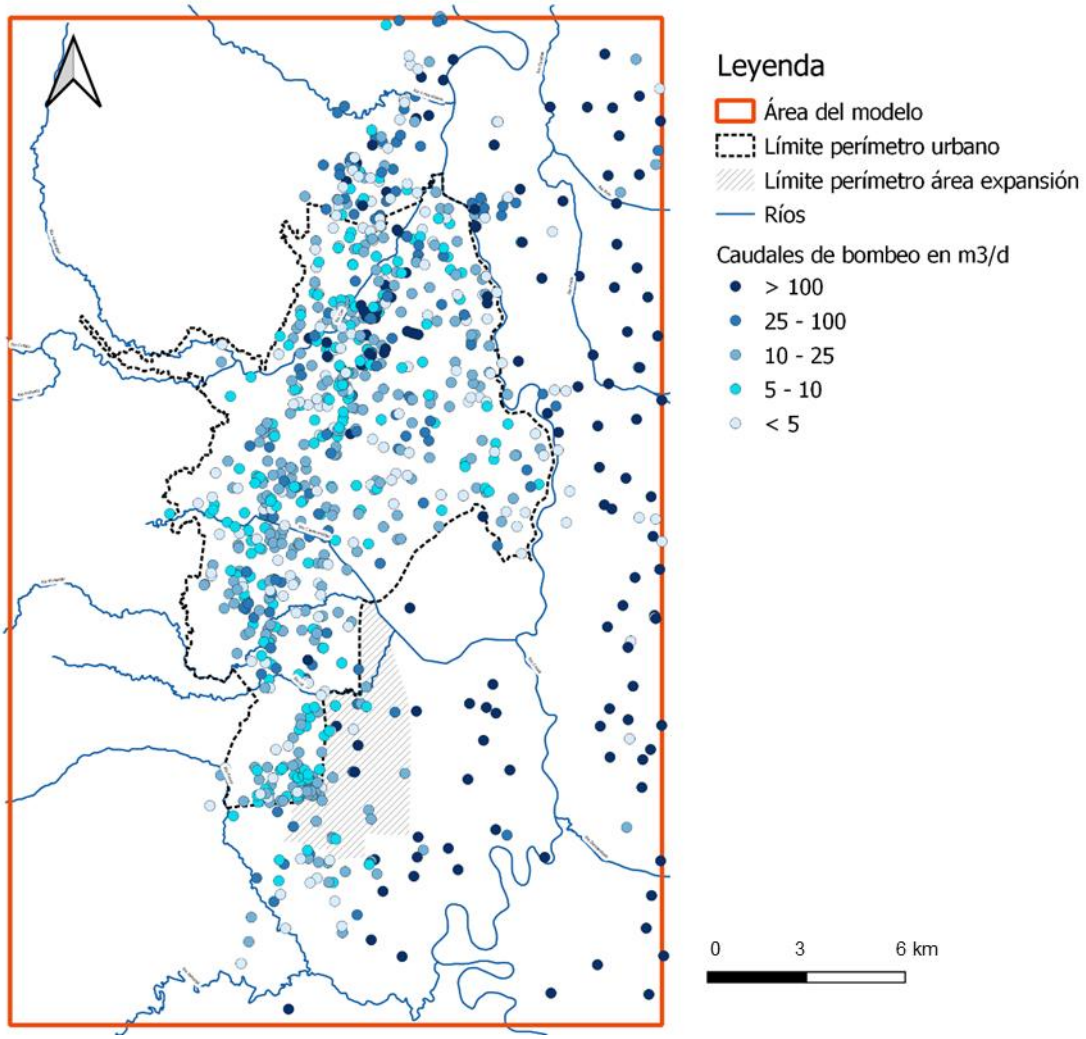


Figura 3-60 Pozos usados en el modelo y sus caudales de bombeo promedios para el período 2007-2017

3.3.8 Calibración del modelo

El modelo se calibró manualmente en régimen estacionario utilizando los niveles observados en la red de monitoreo con la que se obtuvo el mapa de líneas piezométricas. Durante la calibración se modificaron principalmente las conductividades de las unidades hidrogeológicas. La Tabla 4.6 presenta en detalle los cambios realizados al modelo durante la calibración.

Tabla 3-15 Cambios realizados al modelo durante la calibración

Unidad Hidrogeológica	Capas del modelo	Cambio realizado durante la calibración	Rango de parámetros después de la calibración
A	1	Conductividad hidráulica vertical (Kv)	0.2 * Kh
		Drenaje escorrentía superficial	Se localizo a 0.1 m por debajo del MDE. Al contar con un MDE detallado se producen micro-relieves entre celdas que causan flujo por encima del MDE. Esto se corrige con unos drenajes superficiales un poco más bajos al MDE.
	2 - 4	Cambios en los valores de conductividad hidráulica horizontal	Valores de conductividades promedio resultantes: • Conos aluviales - 2 m/d • Zona de transición – 1 m/d • Terrón colorado – 1 m/d • Aluvial del Cauca – 5m/d • Guachinte y Jamundí – 0.4 m/d •
		Conductividad hidráulica vertical (Kv)	0.2 * Kh
B	5	Cambios en los valores de conductividad hidráulica horizontal	Los valores se cambiaron a un valor constante de 0.01m/d
C	6	Conductividad hidráulica vertical (Kv)	0.2 * Kh

Los cambios principales se realizaron en los parámetros de la unidad A, donde se cuenta con mayor información y conocimiento del sistema. Los parámetros de la Unidad C no se cambiaron significativamente al contar con muy poca información de pozos con filtros únicamente en esta unidad.

3.3.9 Resultados del modelo estacionario

Los resultados obtenidos después de la calibración del modelo estacionario son niveles de agua subterránea de las diferentes capas del modelo, flujos de agua subterránea en las 3 dimensiones, incluyendo el intercambio de agua con los ríos, y el balance hídrico de cada una de las capas y de toda el área modelada.

Niveles de agua subterránea

La profundidad del agua subterránea calculada por el modelo (Figura 3-61) muestra que en casi toda la zona urbana los niveles freáticos se encuentran a entre 3 y 5 metros de profundidad, aunque en algunas zonas, como la parte alta de los conos aluviales de los ríos Pance, Cali, Lili y Meléndez, la profundidad del agua puede alcanzar más de 15 metros de profundidad, y en otras zonas, como en la parte distal del cono de los ríos Lili y Pance, los

niveles están muy cercanos a la superficie. En algunas partes de la ciudad, sobre todo coincidiendo con zonas verdes bajo las cuales se asumió que no hay drenajes, los niveles freáticos también se acercan a la superficie.

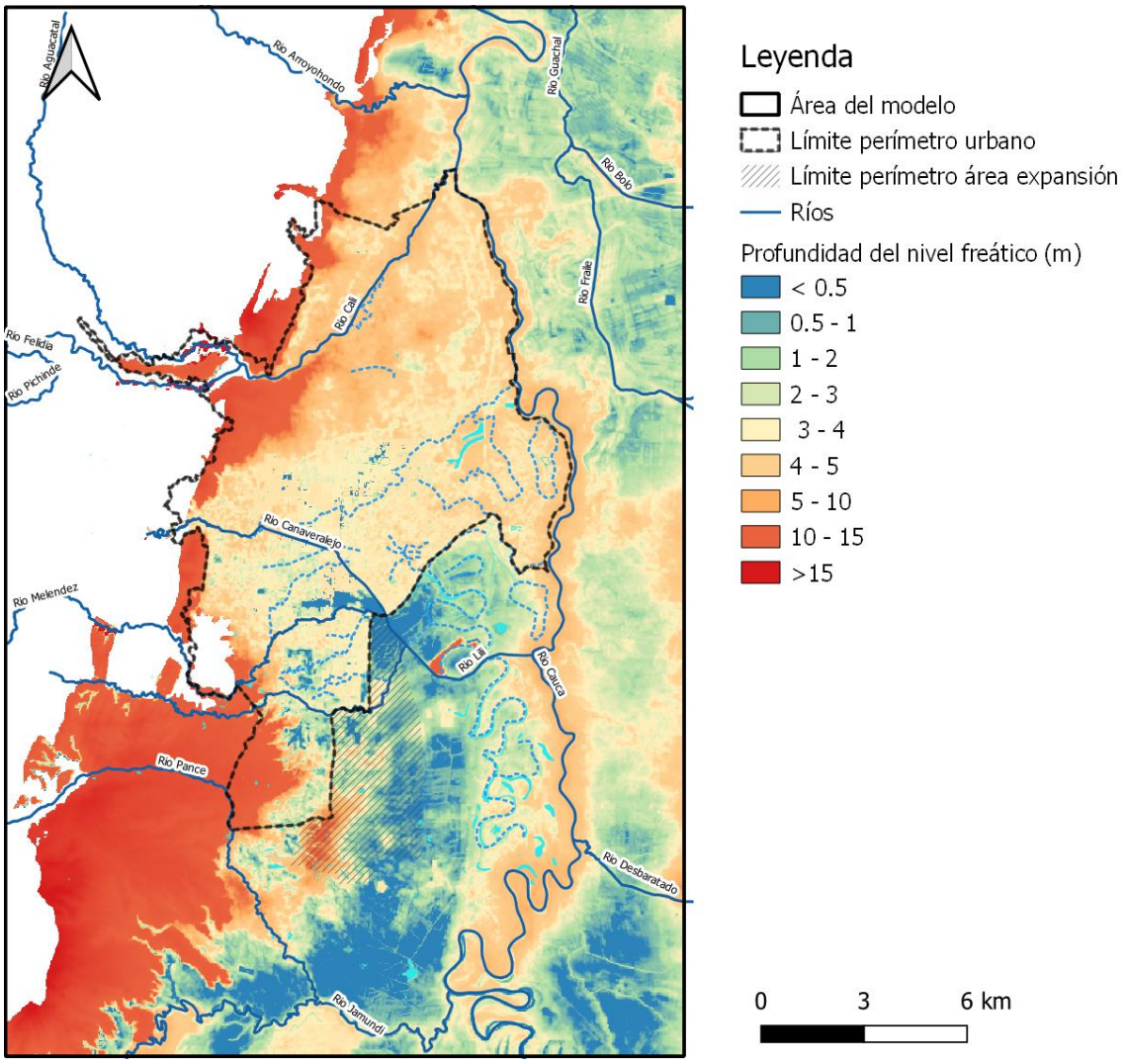


Figura 3-61 Niveles freáticos calculados por el modelo (Estos valores se obtuvieron substrayendo los niveles calculados en la capa A1 del MDE suavizado)

La Figura 3-62 muestra los niveles simulados por el modelo y los niveles observados en los pozos de monitoreo seleccionados, y la Figura 3-63 muestra las diferencias entre los niveles simulados y los observados. Se puede observar que el modelo consigue reproducir los niveles de forma aproximada en gran parte del área modelada, principalmente en las partes medias y distales de los conos aluviales las diferencias entre niveles simulados y observados son menores a 1 metro, mientras que en las partes altas de los conos aluviales los errores del modelo son en general mayores. No existe un claro sesgo en los niveles simulados, sino que a veces son demasiado altos y a veces demasiado bajos, sin que haya un patrón claro. Las diferencias entre los niveles observados y los simulados podrían deberse a particularidades de la morfología o de las propiedades hidráulicas del acuífero en los diferentes puntos, que no se captaron correctamente en los insumos del modelo.

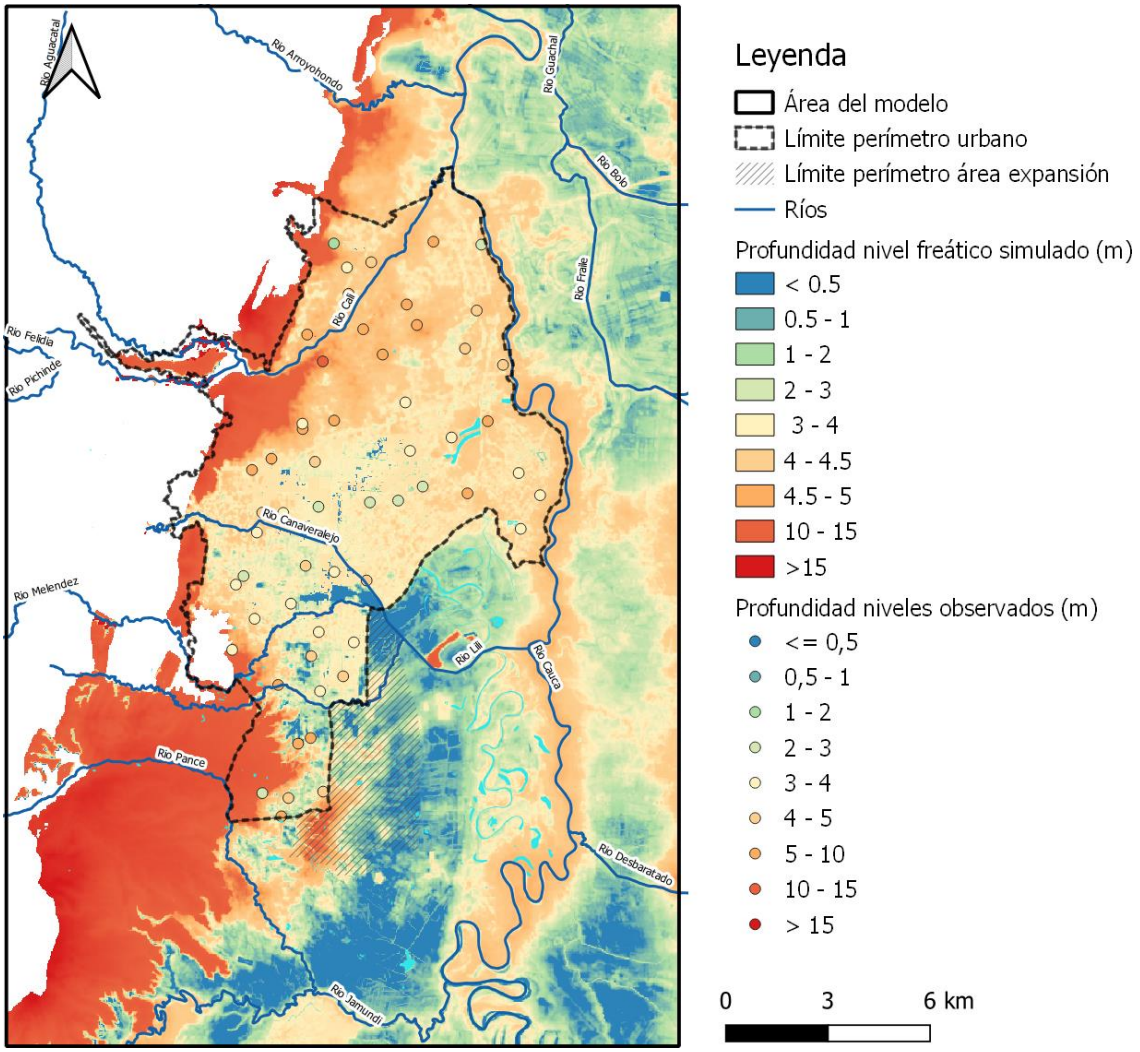


Figura 3-62 Comparación entre la profundidad del nivel freático promedio observado en la red de monitoreo del DAGMA y la profundidad del nivel freático simulado por el modelo.

Este mapa muestra que hay algunas partes de la zona urbana de la ciudad que no tienen pozo de monitoreo y para las que no se puede evaluar los resultados del modelo. Se trata de las partes altas de los conos, cercanas a las laderas. Tampoco se tienen piezómetros en la zona de expansión y en los paleocanales del río Cauca.

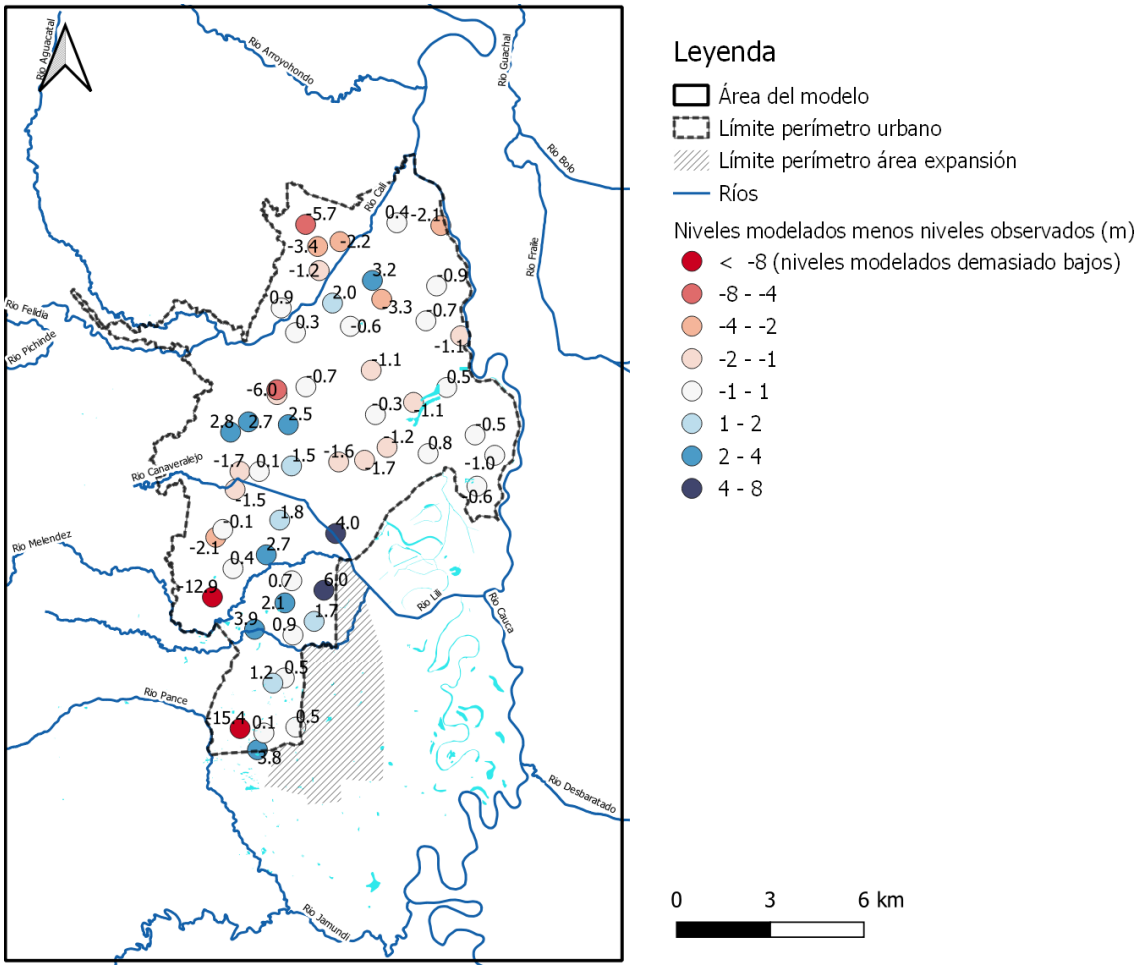


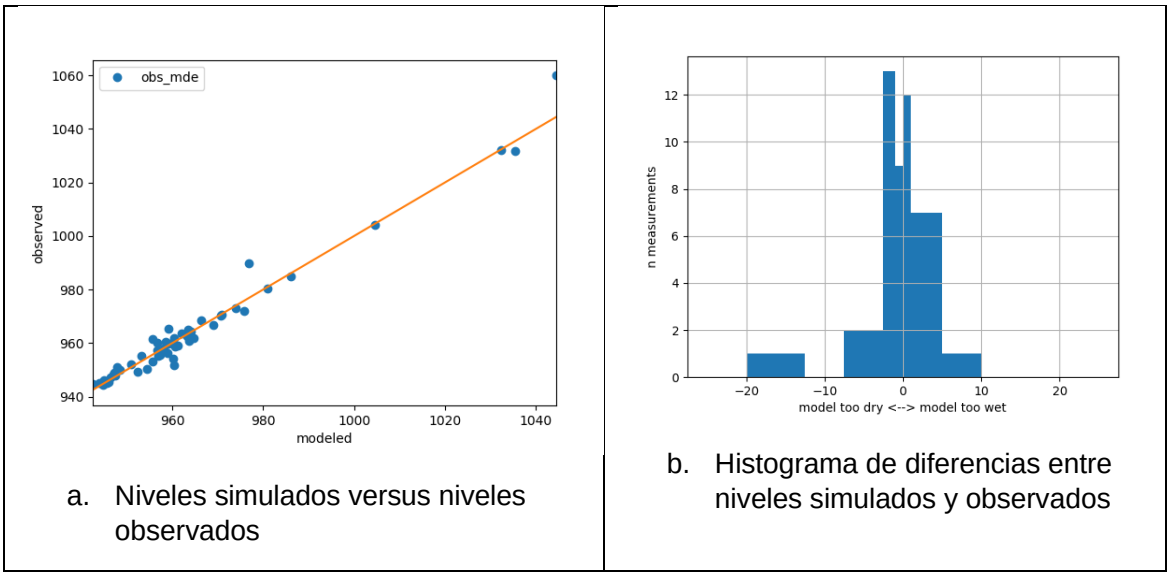
Figura 3-63 Diferencia entre el nivel freático promedio observado en la red de monitoreo del DAGMA y el nivel freático simulado por el modelo.

Como puede verse en la Figura 3-63, hay dos puntos cercanos a las laderas de la parte sur de la zona urbana, en los que el modelo no consigue reproducir bien los niveles, simulando niveles hasta 16 m más profundos que los observados. Esto puede deberse a la cercanía de estos puntos a la frontera del modelo, y a que la morfología del basamento hidrogeológico no se estimó correctamente, y se supuso más profunda de lo que es, o demasiado vertical. Para poder calibrar mejor los niveles en las zonas de ladera, se requerirían más pozos de observación.

El histograma de la diferencia entre los niveles observados y los simulados (Figura 3-64) indica que la gran mayoría de los niveles simulados se encuentran en el rango de -2.5 a 1 metro de diferencia con los niveles observados. Estos valores son aceptables para la escala de trabajo del modelo numérico. No obstante, se ha mencionado que en la zona urbana, la mayoría de los niveles están entre 3 y 5 metros de profundidad, y un error de 1 a 2.5 metros puede ser importante para determinar la relación entre el nivel del agua subterránea y las infraestructuras urbanas como alcantarillado, tuberías, etc.. Por lo anterior, se recomienda usar el modelo de forma orientativa si lo que se pretende es evaluar el nivel de agua subterránea en un punto específico del mapa.

Como se ha mencionado anteriormente, hay algunos puntos cercanos a la ladera con errores

altos, y por lo tanto el error cuadrático medio (RECM) es de 3,69 metros y el Error Medio Absoluto (EMA) es de 2 metros.



a. Niveles simulados versus niveles observados

b. Histograma de diferencias entre niveles simulados y observados

Figura 3-64 Gráfico de niveles observados vs niveles modelados (a) e histograma de diferencias entre niveles simulados y observados (b).

Los niveles simulados expresados en cota (Figura 3-65), muestran un gradiente claro desde la cordillera hacia el río Cauca. Los conos principales, o de mayor recarga, corresponden al cono de Pance y en menor grado al cono del río Cali. La parte alta de estas formaciones tienen en promedio gradientes hidráulicos de 2.2%, mientras que en las llanuras aluviales próximas al río Cauca el gradiente hidráulico disminuye a 0.2% en promedio.

Las isopiezas resultantes son muy parecidas a las determinadas a partir de la red de monitoreo (CVC y DAGMA) con datos medios multianuales.

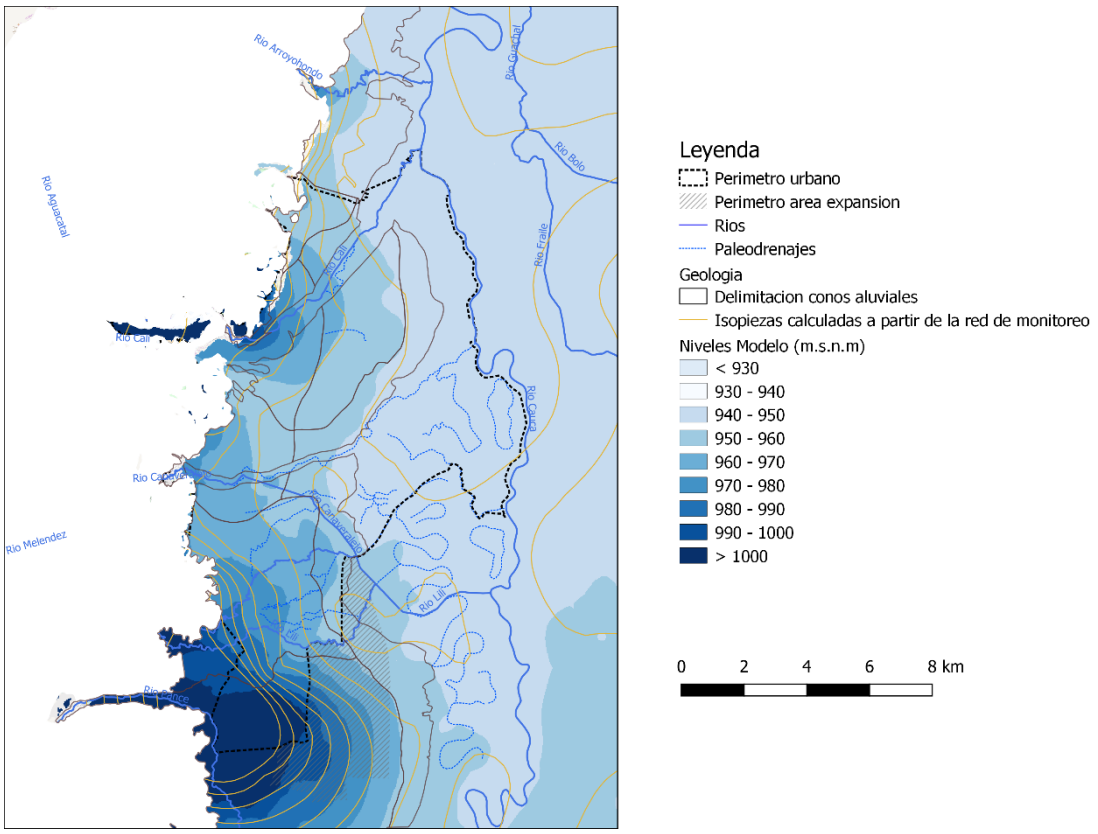


Figura 3-65 Comparación niveles calculados por el modelo y las isopiezas trazadas con datos de campo correspondientes a la Unidad A

Como se ha mencionado en el apartado de la discretización espacial, el modelo tiene 6 capas. La primera capa tiene 3 metros de espesor y está pensada para representar los procesos más someros y que tienen interacción con la superficie del terreno, aguas superficiales e infraestructuras poco profundas como sótanos y galerías filtrantes. La cuarta capa, inicia los 25 metros de profundidad y está pensada para representar los procesos que ocurren en la parte menos intervenida del acuífero (aparte de pozos, a esta profundidad ya no se encuentran otras estructuras). Si se comparan los niveles de la primera y cuarta capa del modelo, se observa que el comportamiento es similar en ambas capas, pero que para la primera capa, los sistemas superficiales como ríos o humedales, y los subsuperficiales, como drenajes subterráneos, tienen más influencia y causan un patrón más pixelado de los niveles. En la cuarta capa, las isopiezas son más sinuosas y menos pixeladas.

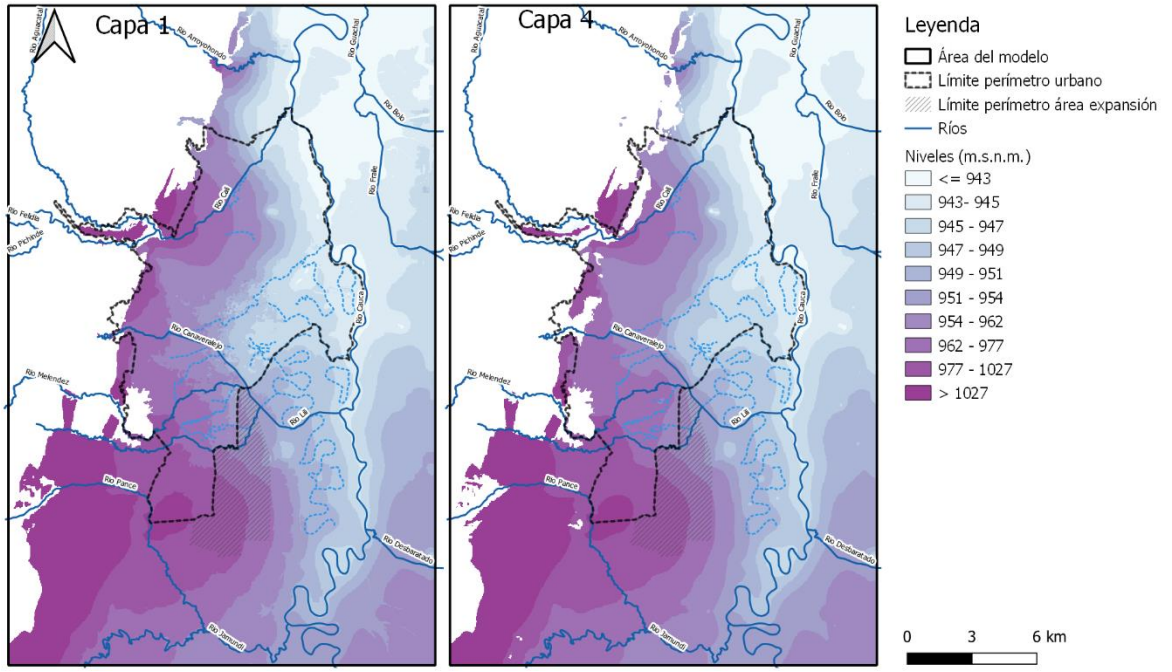


Figura 3-66 Nivel de agua subterránea calculado por el modelo para la Capa 1 (izquierda) y la Capa 4 (derecha).

Interacción río-acuífero

La Figura 3-67 muestra el comportamiento de los flujos de agua en el sistema de ríos, cuantificando el flujo simulado y permitiendo evaluar la interacción río-acuífero. El color morado representa valores de flujos negativos, lo que indica flujo de agua del acuífero al río (es decir, río que gana). Asimismo, los colores naranjas representan valores positivos y una dirección de flujo del río al acuífero (es decir, río que pierde).

Se observa que, en las zonas de los conos aluviales, los ríos recargan al acuífero (perdiendo agua) debido a la naturaleza no confinada de este último en esta área y de la alta permeabilidad de los sedimentos. Asimismo, este efecto se ve favorecido por el gradiente topográfico correspondiente a la zona de piedemonte. Por otro lado, las llanuras aluviales representan zonas de descarga del acuífero, aportando agua hacia los ríos tributarios del río Cauca y al mismo río Cauca. A lo de prácticamente todo el recorrido del río Cauca dentro del área modelada, el río está drenando el acuífero tal y como se ha planteado en el modelo hidrogeológico conceptual. No obstante, para validar este comportamiento, se requieren de estudios de hidrogeoquimica y redes piezométricas específicas.

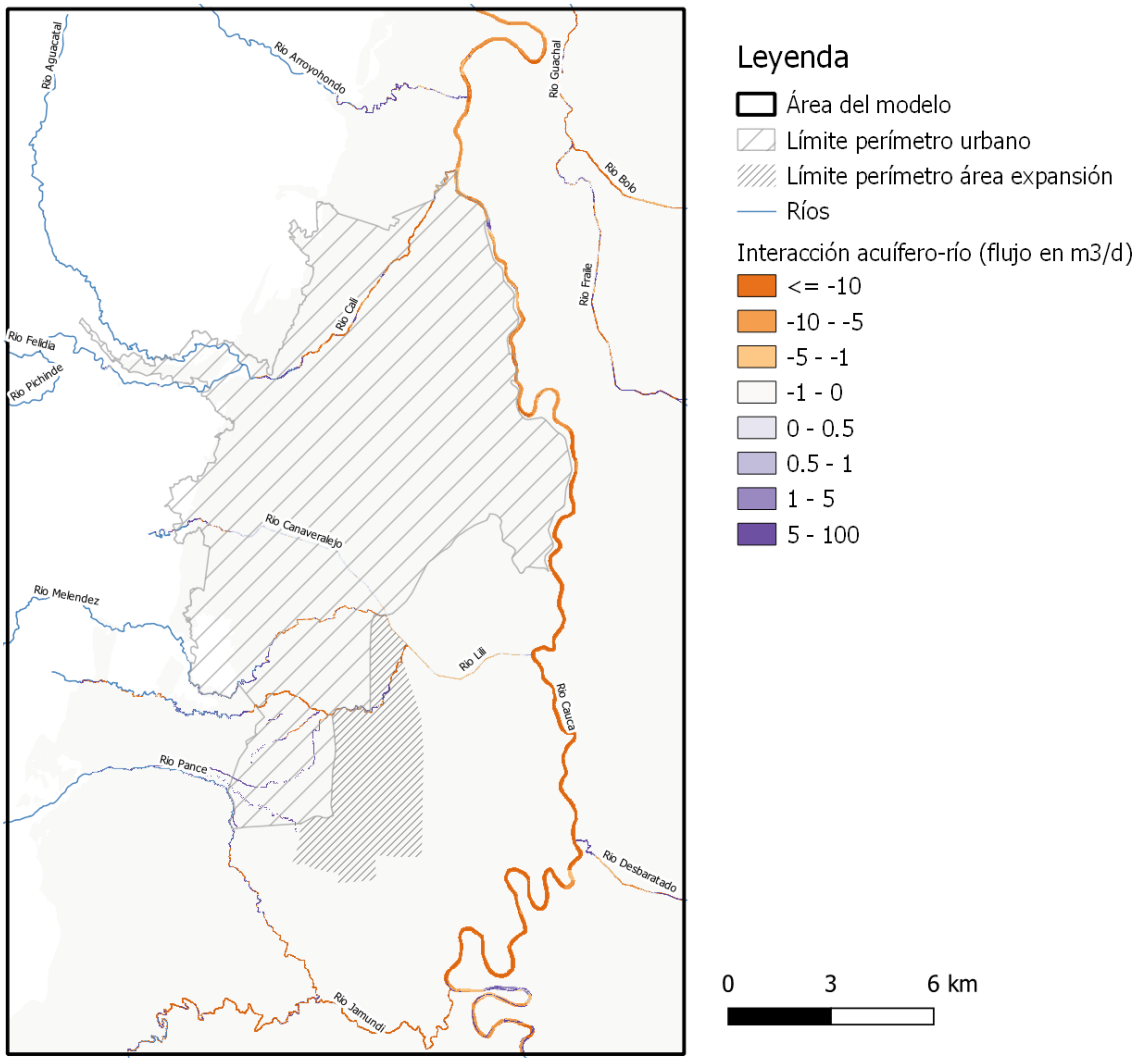


Figura 3-67 Flujos desde y hacia los ríos

En las siguientes figuras (Figura 3-68, Figura 3-69, y Figura 3-70) se presenta cada uno de los ríos de más cerca:

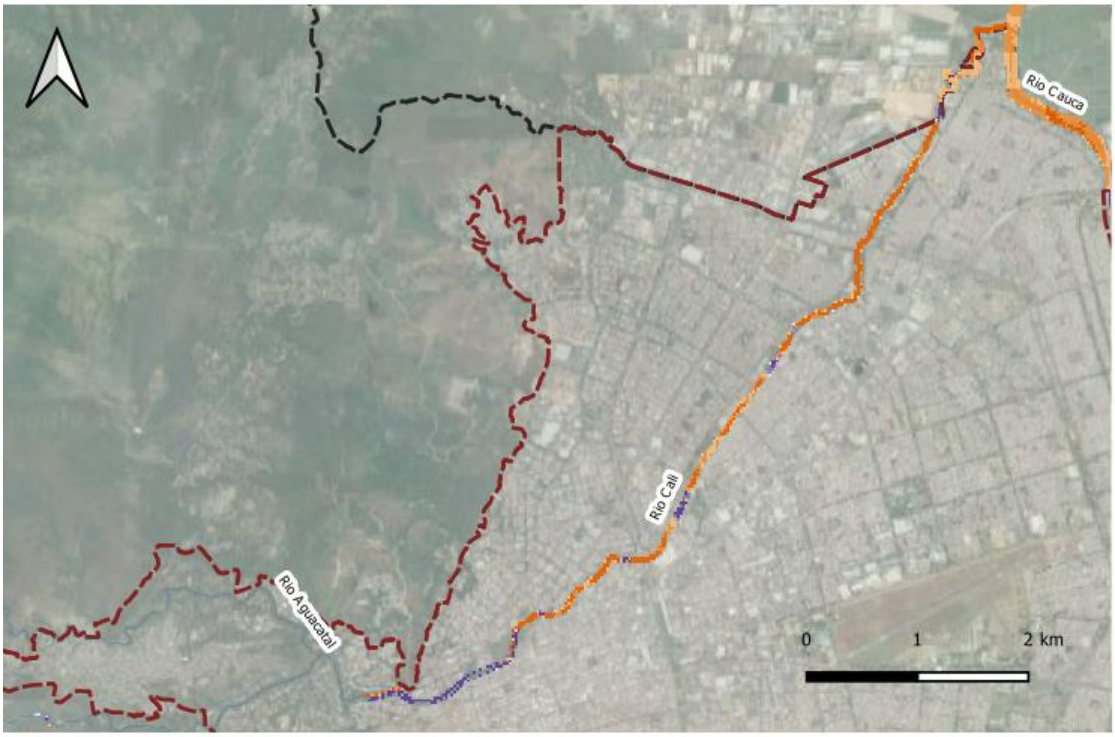


Figura 3-68 Flujos desde y hacia el río Cali ver leyenda en Figura 3-67

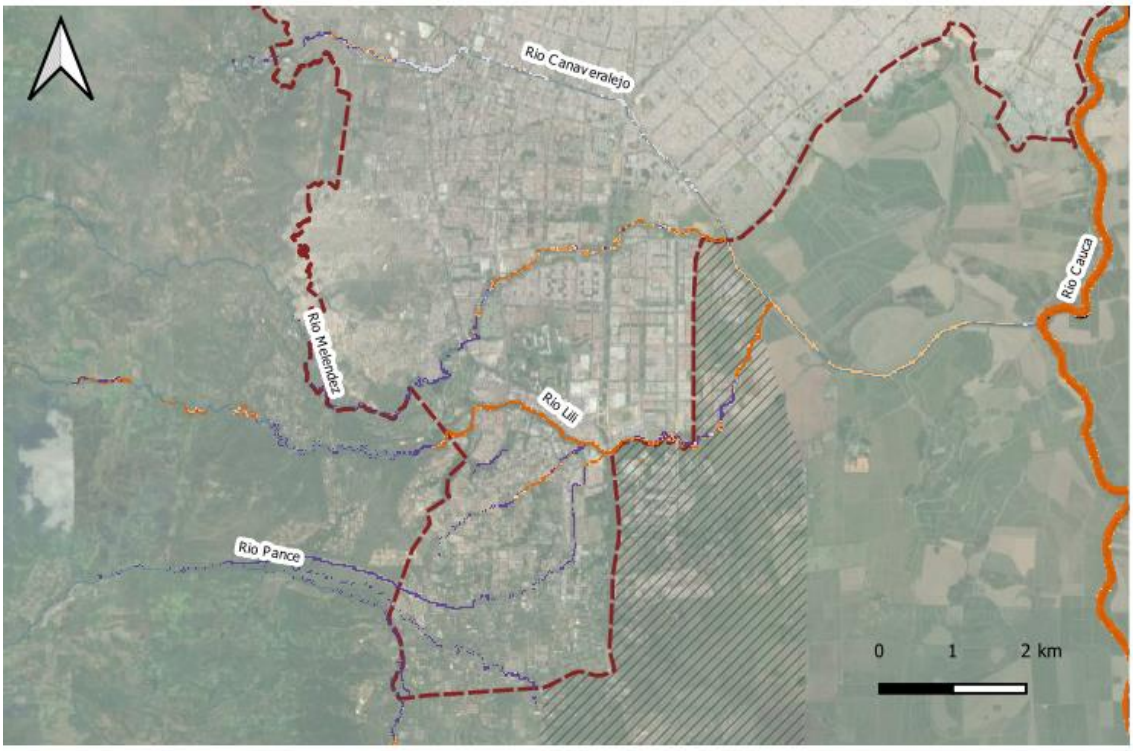


Figura 3-69 Flujos desde y hacia los ríos Lili, Meléndez, Cañaveralejo y Pance ver leyenda en Figura 3-67

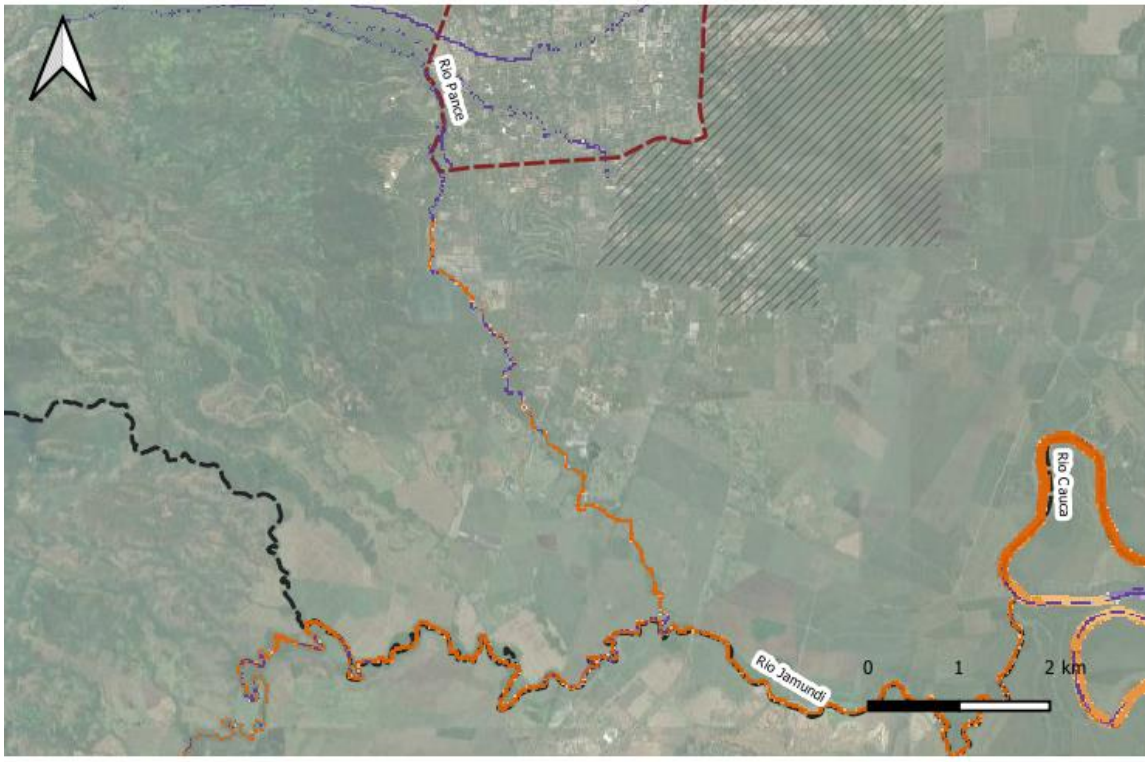


Figura 3-70 Flujos desde y hacia los ríos Pance y Jamundí ver leyenda en Figura 3-67

Zonas de recarga y de descarga

La siguiente figura (Figura 3-71) representa las áreas de recarga y descarga del acuífero. Este mapa se ha obtenido mediante el flujo de agua entre las capas del modelo 3 y 4, es decir, a 25 metros de profundidad.

El agua que fluye de la capa 3 a la capa 4, recargando el acuífero se representa por tasas de flujo negativas y se muestra en azules. Asimismo, las áreas de descarga, donde el agua va de la capa 4 a la capa 3 tiene valores positivos y se muestra en naranja. Este mapa es consecuente con la conceptualización hidrogeológica que indica alta recarga en las zonas montañosas, sobre todo en la zona del cono del río Pance; y la descarga en el cono del río Cañaveralejo, y en el río Cauca y alrededores. Cabe mencionar que la llanura aluvial ubicada en la margen derecha del río Cauca, es una zona de recarga a causa del efecto de los sistemas de riego del cultivo de caña de azúcar que se da en la zona.

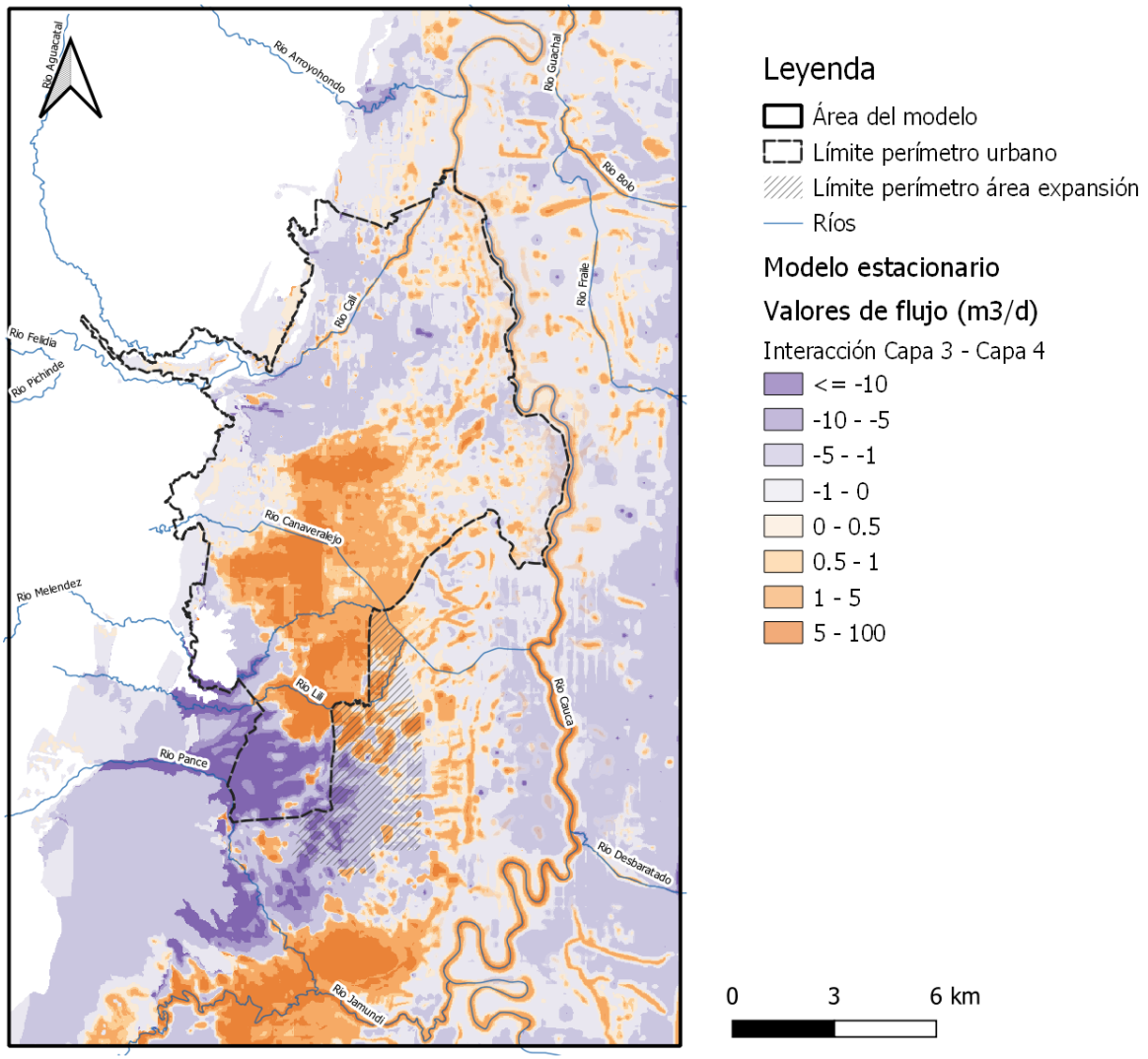


Figura 3-71 Zonas de recarga y de descarga (flujo entre las capas 3 y 4)

Balance hídrico

Un análisis del balance hídrico de todo el modelo (Figura 3-72) indica que el ingreso de agua al sistema se da principalmente a través de los ríos (50%), seguido de la recarga por precipitación y tuberías (47%) y en menor proporción a través del flujo regional (3%) que entra a través de los bordes del modelo. En relación con las salidas de agua del modelo, el sistema de drenaje es la principal salida de agua, representando el 54% del agua que sale del modelo. Los sistemas por los que también sale el agua, pero en menor proporción, son los ríos (25%), los bordes del modelo (15%) y los pozos (8%).

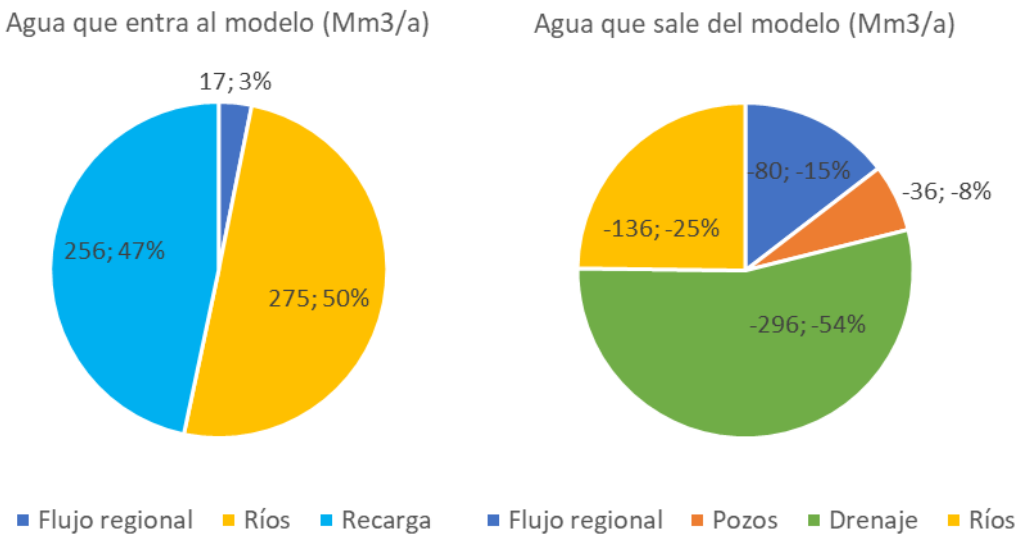


Figura 3-72 Balance hídrico para toda el área modelada

De manera particular, del volumen total de agua que interactúa en el subsistema ríos, el 67% es agua que aportan los ríos al acuífero, mientras que el 33% es drenado del acuífero por los ríos (Figura 3-73).

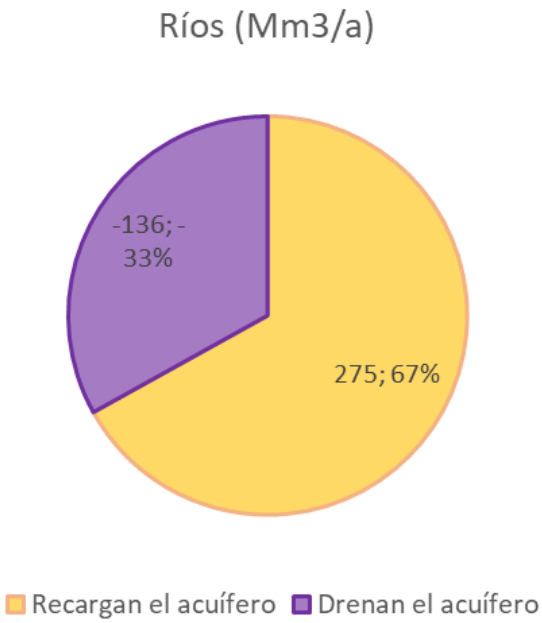


Figura 3-73 Balance hídrico de los ríos en porcentaje y en m3/d

Además del balance para toda el área modelada, también se ha evaluado el balance hídrico por cuenca hidrográfica dentro del área de estudio, las cuales son Cali, Jamundí y Lili-Meléndez-Cañaveralejo. A continuación, se presentan los balances hídricos por cada una de ellas, utilizando el área que se muestra en la Figura 3-74.

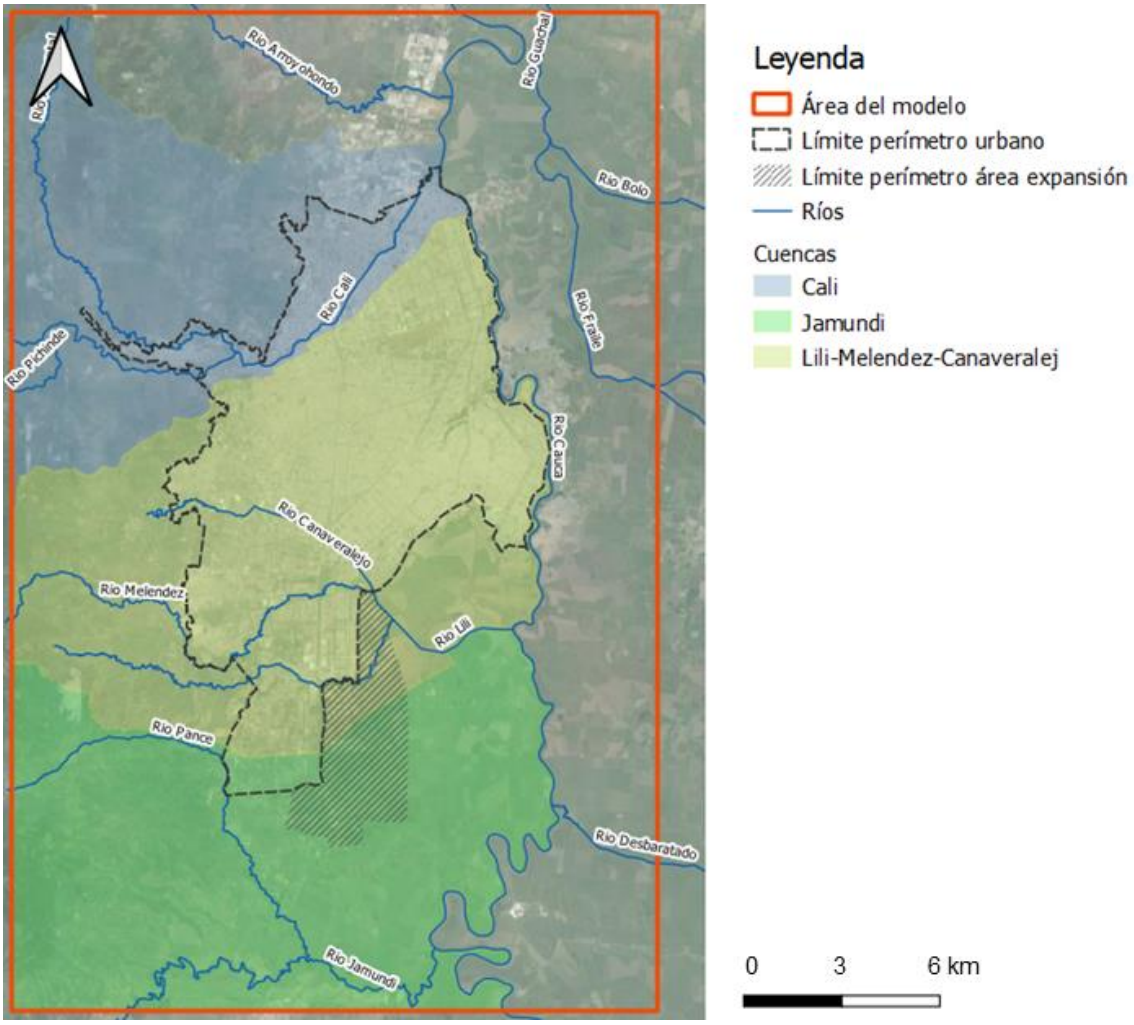


Figura 3-74 Cuencas hidrográficas en el área del modelo

Balance hídrico - Cuenca del río Cali

El balance hídrico de la cuenca del río Cali indica que el mayor porcentaje de agua que ingresa al modelo es a través de la recarga (78%, 12.2Mm^3/a), mientras que el resto es a través de los ríos (22%, 3.4Mm^3/a). Por otro lado, el agua que sale del modelo es a través del drenaje (39%, 4.2Mm^3/a), los ríos (39%, 4.2Mm^3/a) y los pozos de bombeo (22%, 2.4Mm^3/a).

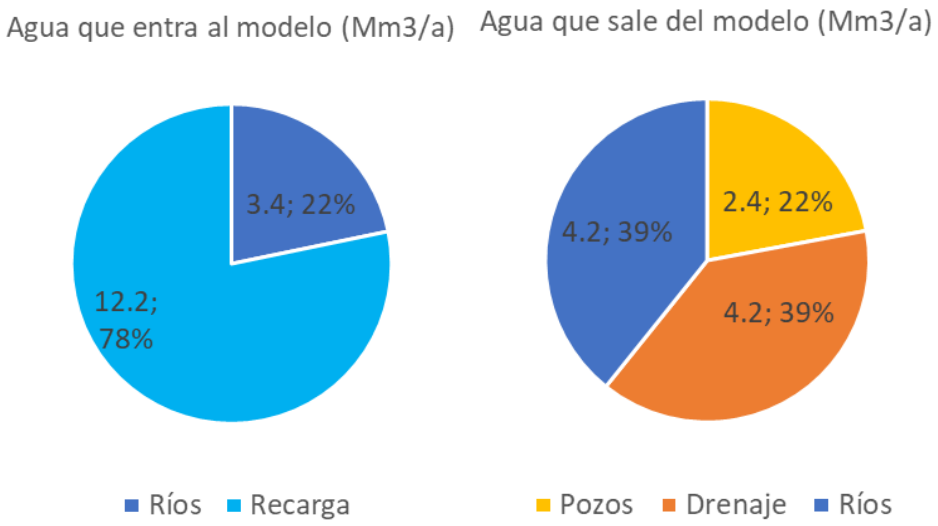


Figura 3-75 Balance hídrico para la cuenca del río Cali

Balance hídrico - Cuenca de los ríos Lili-Meléndez-Cañaveralejo

En la cuenca Lili-Meléndez-Cañaveralejo, la entrada de agua al modelo se da casi en igual proporción a través de la recarga y la infiltración en los ríos (54% o 88.3Mm^3/a recarga y 46% o 73.8Mm^3/aríos). El sistema de drenaje representa el 86% (163.4Mm^3/a) de salidas de agua del sistema. En menor proporción, el 9% (17.7Mm^3/a) del agua deja el modelo a través del sistema de ríos, y un 5% a través de los pozos. El porcentaje de descarga tan elevado a través de los drenes se debe a que en esta cuenca se encuentra la mayor zona de descarga del acuífero, y aquí convergen las líneas de flujo provenientes de los conos de los ríos Cali y Pance.

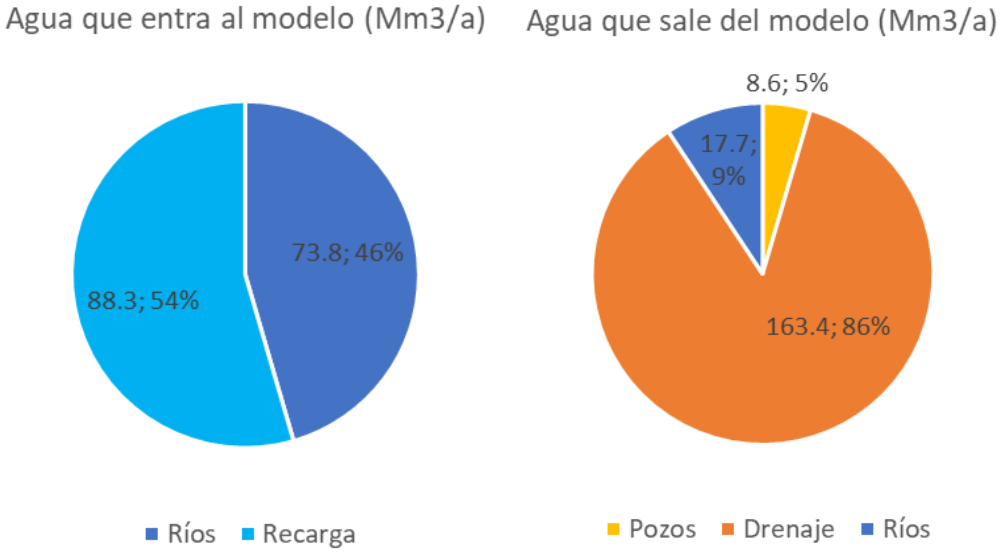


Figura 3-76 Balance hídrico para la cuenca de los ríos Lili-Meléndez-Cañaveralejo

Balance hídrico - Cuenca del río Jamundí

En el caso de la cuenca del río Jamundí, el ingreso de agua al modelo se da por los ríos (68%, 187.7Mm^3/a) y por la recarga (32%, 90.1Mm^3/a). La mayor salida de agua es a través del sistema de drenaje (56%, 104.9Mm^3/a), seguida por los ríos (41%, 78.3Mm^3/a) y, en una menor proporción, por los pozos de bombeo (3%, 5.8Mm^3/a).

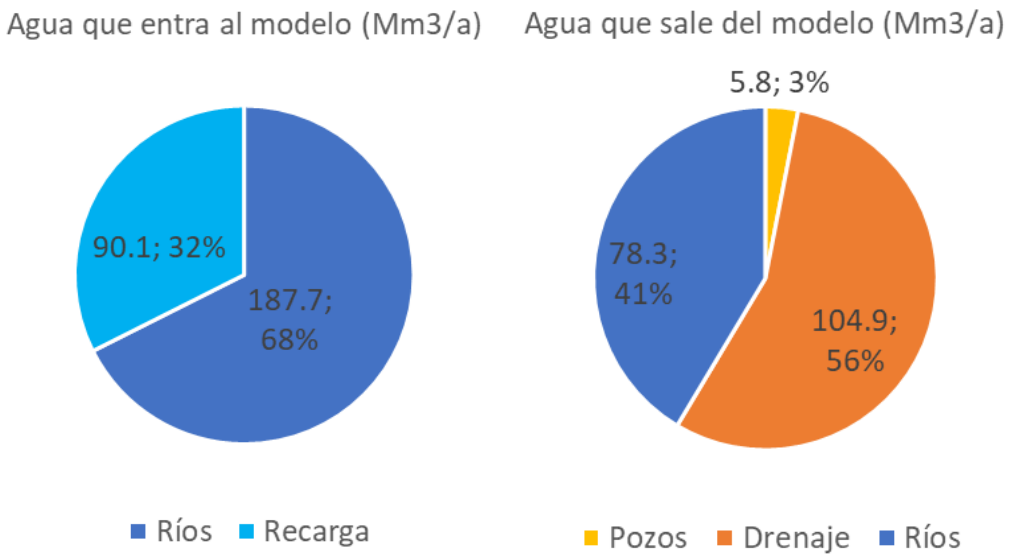


Figura 3-77 Balance hídrico para la cuenca del río Jamundí

Tiempos de residencia del agua

Mediante la herramienta de transporte de partículas de iMOD, se ha podido identificar las direcciones de flujo y la edad del agua subterránea en el área del modelo.

En la primera simulación (Figura 3-79) se liberaron partículas ubicadas a distancias iguales entre ellas con un espaciamiento de 500 m por 500 m. Estas empezaron su recorrido desde el nivel de agua subterránea calculado en la capa 1 y en dirección “hacia adelante”. Esta simulación permitió conocer hacia qué zonas del modelo se desplazan las partículas. Los resultados muestran que las partículas se mueven desde las zonas de recarga (en el lado Oeste del modelo) hacia el cono del río Cañaveralejo y hacia el río Cauca. Dado que hay pozos profundos al este del río Cauca, se observa que algunos flujos continúan su trayectoria hacia la frontera del modelo. El tiempo de residencia del agua es de 700 a 1000 años para los flujos que descagan en el cono del río Cañaveralejo y en el río Cauca, pero se observan tiempos de residencia de hasta 30.000 años en algunos flujos más profundos de la parte norte del área, los cuales inician en los conos de los ríos Cali y Pance (Figura 3-79) y continúan por la Unidad C hacia los bordes del modelo.

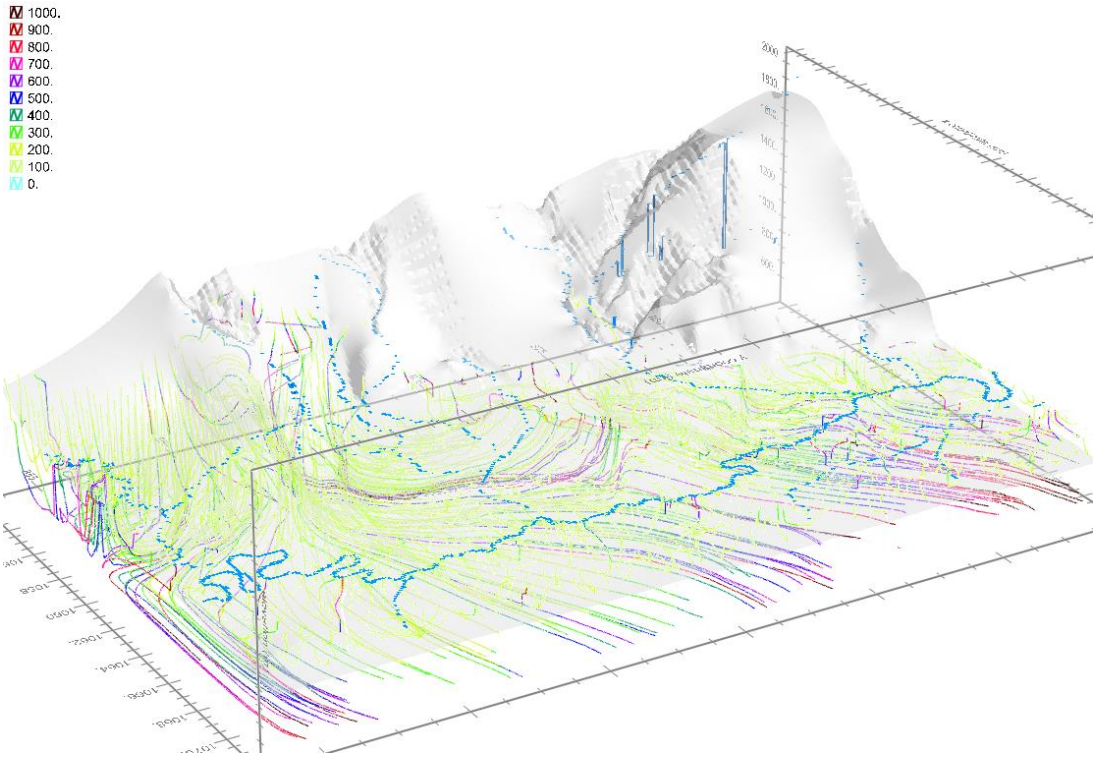


Figura 3-78 Trayectoria de partículas "hacia adelante" desde el nivel de agua subterránea calculado por el modelo. Tiempo en años. En gris, el nivel superior de la capa 6 que simula la Unidad C.

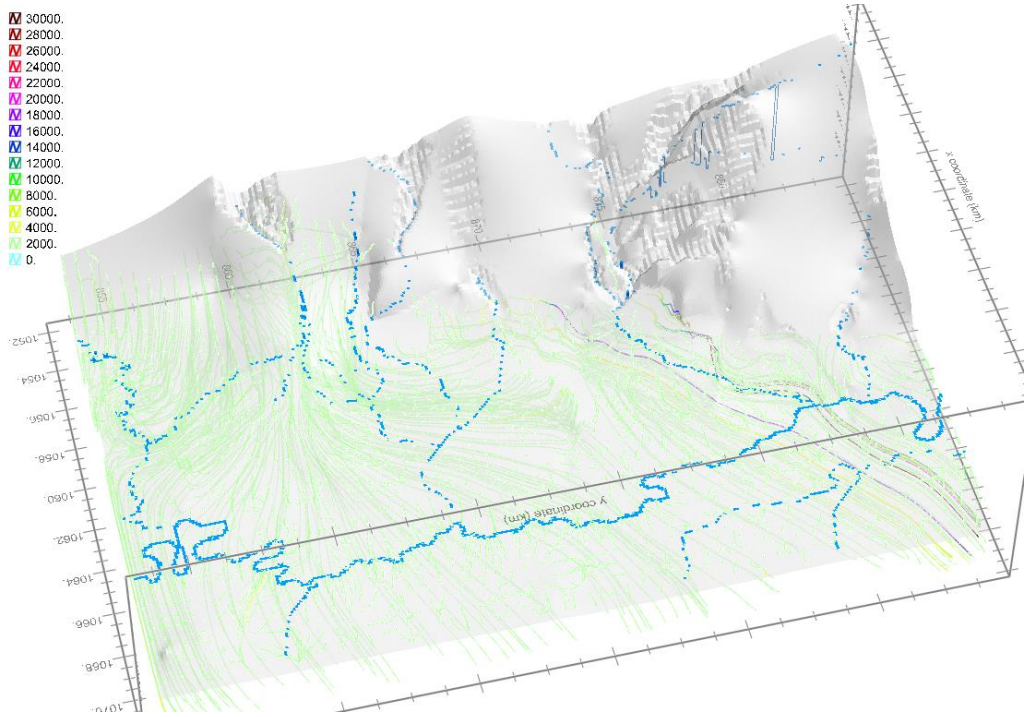


Figura 3-79 Trayectoria de partículas "hacia adelante" desde el nivel de agua subterránea calculado por el modelo. Tiempo en años (escala hasta 30.000 años). En gris, el nivel superior de la capa 6 que simula la Unidad C.

Asimismo, se simuló la trayectoria de partículas en modo “hacia atrás” desde el río Cauca (Figura 3-80), considerando la elevación del nivel de agua y partículas cada 500 m entre ellas. Esta configuración permitió conocer el origen de los flujos que descargan hacia el río Cauca. Se observa que, en la zona sur, el agua que recibe el río proviene del cono de los ríos Pance y Cali. Estas aguas tienen una edad de 800 a 1600 años. Además, existen flujos locales que descargan en esta zona con una edad de alrededor de 150 años.

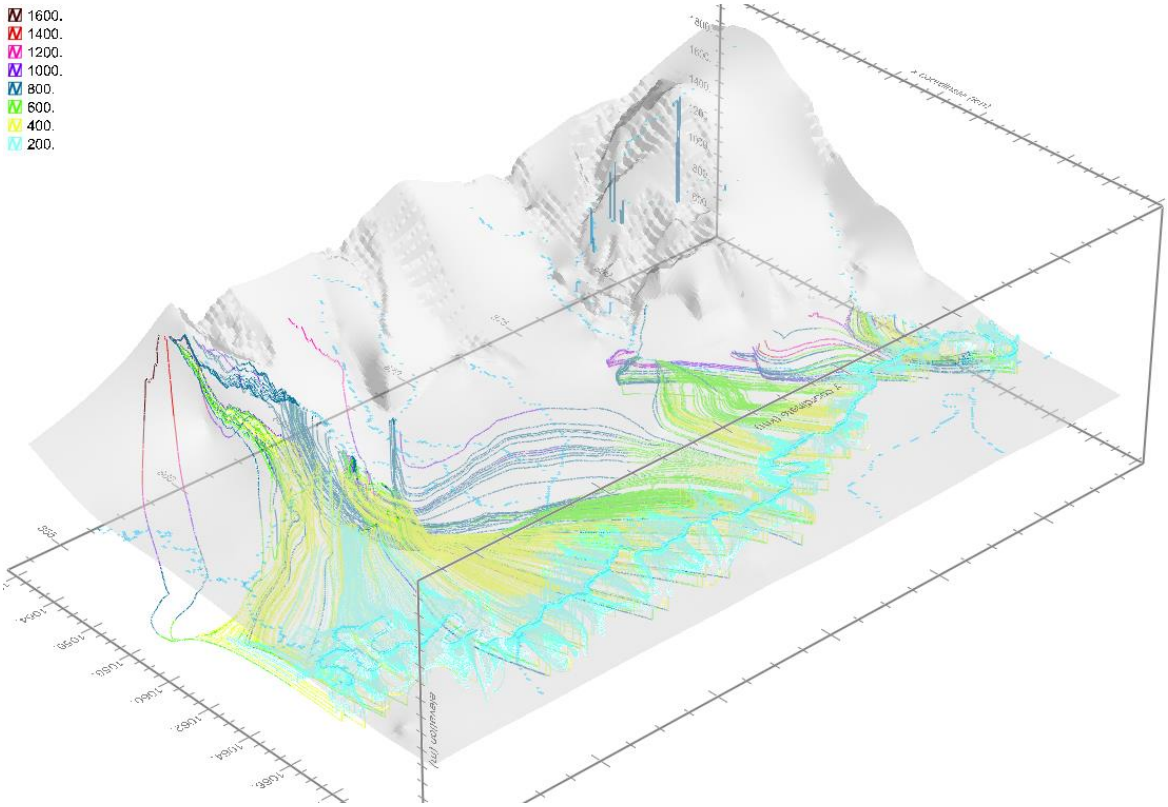


Figura 3-80 Trayectoria de partículas “hacia atrás” desde el nivel de agua en el río Cauca. Tiempo en años. En gris, la topografía del modelo.

En el Anexo digital “Vídeos líneas de flujo” se presentan algunos vídeos que muestran las líneas de flujo.

Según los resultados isotópicos del estudio de recarga a través de las formaciones rocosas (ver Anexo 3), el agua en los pozos monitoreados tiene entre 400 años (pozos menos profundos) y 30.000 años de edad (pozos más profundos cercanos al río Cauca); edades del mismo orden de magnitud que las calculadas por el modelo numérico.

3.3.10 Resultados del modelo transitorio

Los resultados del modelo transitorio son promedios mensuales del período modelado, es decir desde enero de 2007 hasta diciembre de 2017, de niveles de agua subterránea, flujos en las tres dimensiones, y balances hídricos.

Con los resultados mensuales, se han evaluado las áreas donde se espera un mayor cambio en los niveles de agua subterránea a lo largo del período de simulación. Dado que los niveles

en la ciudad están muy condicionados por la presencia de estructuras de drenaje subterráneo, estos resultados muestran sobre todo la influencia de las áreas verdes, y la influencia de la variación de los caudales de los pozos. Las variaciones de niveles que se presentan a continuación, se han calculado como la diferencia entre el percentil 10 y el percentil 90 de los niveles de agua subterránea. Para determinar si hay una variación en profundidad dada por las propiedades hidráulicas de cada capa del modelo, o por los pozos, se evaluaron los resultados en la capa 1 y en la capa 4, igual que se hizo en el modelo estacionario. El resultado es que, aunque el porcentaje de sedimentos permeables aumenta en profundidad (ver Figura 3-54), y los pozos tienen profundidades variadas, el comportamiento general de la capa 1 y la capa 4 es bastante parecido. No obstante, en la capa 1 se puede apreciar mucho más detalle que principalmente se debe a las zonas verdes, a los cuerpos de agua superficial, a la presencia de drenajes subterráneos, y a la variación de las propiedades hidráulicas dentro de la capa, mientras que en la capa 4 no se ve la influencia de estos elementos.

En la Figura 3-81 se observa que, en la zona central (corresponde a la zona urbana de la ciudad de Cali) muestra las menores variaciones de niveles a lo largo del tiempo, encontrándose estas diferencias absolutas entre 0.2 y 0.5 m en promedio. Sin embargo, se pueden destacar algunas áreas en las que las variaciones son mayores. Por ejemplo en la margen norte del río Cali y en la zona de la comuna 5 en la margen sur del río Cali, los niveles varían hasta 6 metros durante el período modelado. Esto se debe principalmente a pozos (la mayoría de uso industrial) que durante el período modelado han tenido caudales de bombeo muy variados. Por ejemplo, los pozos Vc-764 y Vc-16 han tenido períodos con bombeos inferiores a 1l/s, y períodos con bombeos de 20 o 40l/s.

Las variaciones de niveles de 1 metro que se ven en algunas partes de la ciudad, pueden deberse a la existencia de zonas verdes cercanas que propician la recarga y en las que no hay drenaje subterráneo y por lo tanto la tabla de agua se mueve de forma más natural. También puede deberse a la cercanía de un río, y a los pozos de bombeo de la zona que pueden haber variado su caudal a lo largo del período simulado. Esto se ve, por ejemplo, al norte de la calle 5 a la altura del estadio, dónde la presencia de zonas verdes y algunos pozos que empezaron a bombear a partir del año 2012, causan las variaciones de niveles que observamos.

Otra zona a destacar es la parte alta del cono del río Pance, y las formaciones terciarias al oeste de la zona urbana. Aquí las variaciones también llegan a ser de 3 metros por el carácter permeable y de recarga de estas zonas. Las pequeñas diferencias que se ven en el resto de la ciudad, pueden deberse a la característica impermeable de esta área, representada por valores mínimos de recarga. En la zona de expansión y entre la zona de expansión y el río Cauca, las variaciones son más importantes; en la capa 1, las variaciones están claramente influenciadas por los drenajes y los pozos, mientras que en la capa 4, las mayores variaciones están asociadas a pozos.

En la zona agrícola, las variaciones se deben a los regímenes de bombeo asociados a los pozos para riego.

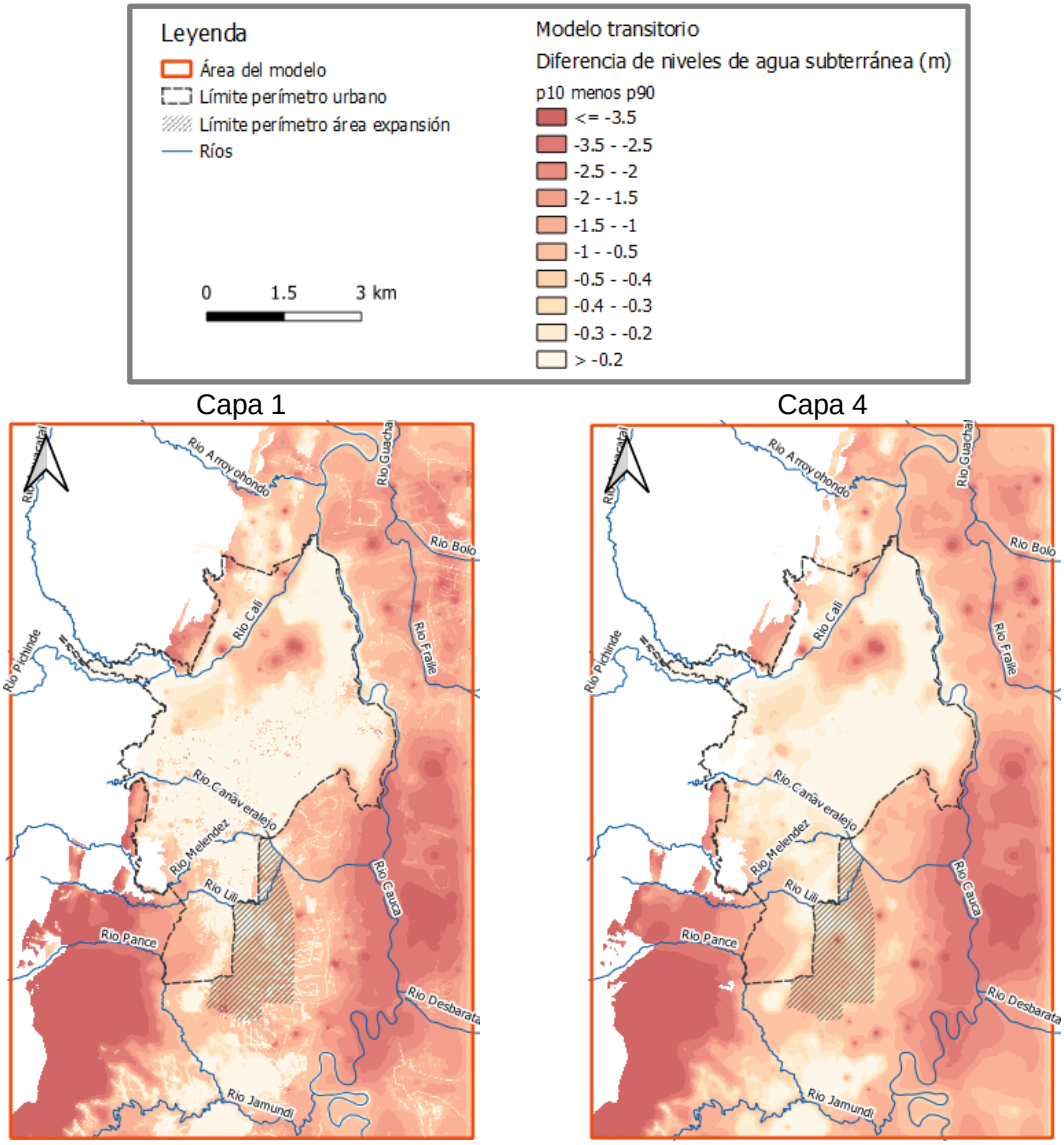


Figura 3-81 Variación de los niveles a lo largo del período simulado calculado como la diferencia entre el percentil 10 y el percentil 90.

Variaciones estacionales de niveles de agua subterránea

Las variaciones estacionales de niveles de agua subterránea (Figura 3-82) son mínimos bajo la zona urbana (menos de 5cm), excepto en algunas áreas cercanas al río Cali, dónde hay zonas verdes, o cerca del río Cauca, dónde los niveles en la época lluviosa son unos 25cm más altos que en la época seca. Fuera del perímetro urbano, las variaciones son de 25cm a 1.5, sobre todo dominadas por la infiltración de los ríos y derivaciones en el cono del río Pance. Los valores más altos (de hasta 1.5m) se encuentran en los conos aluviales y en las cercanías del río Cauca. Ya valores superiores a 1.5m corresponden a pozos de bombeo para la agricultura, que extraen más en la época seca que en la lluviosa.

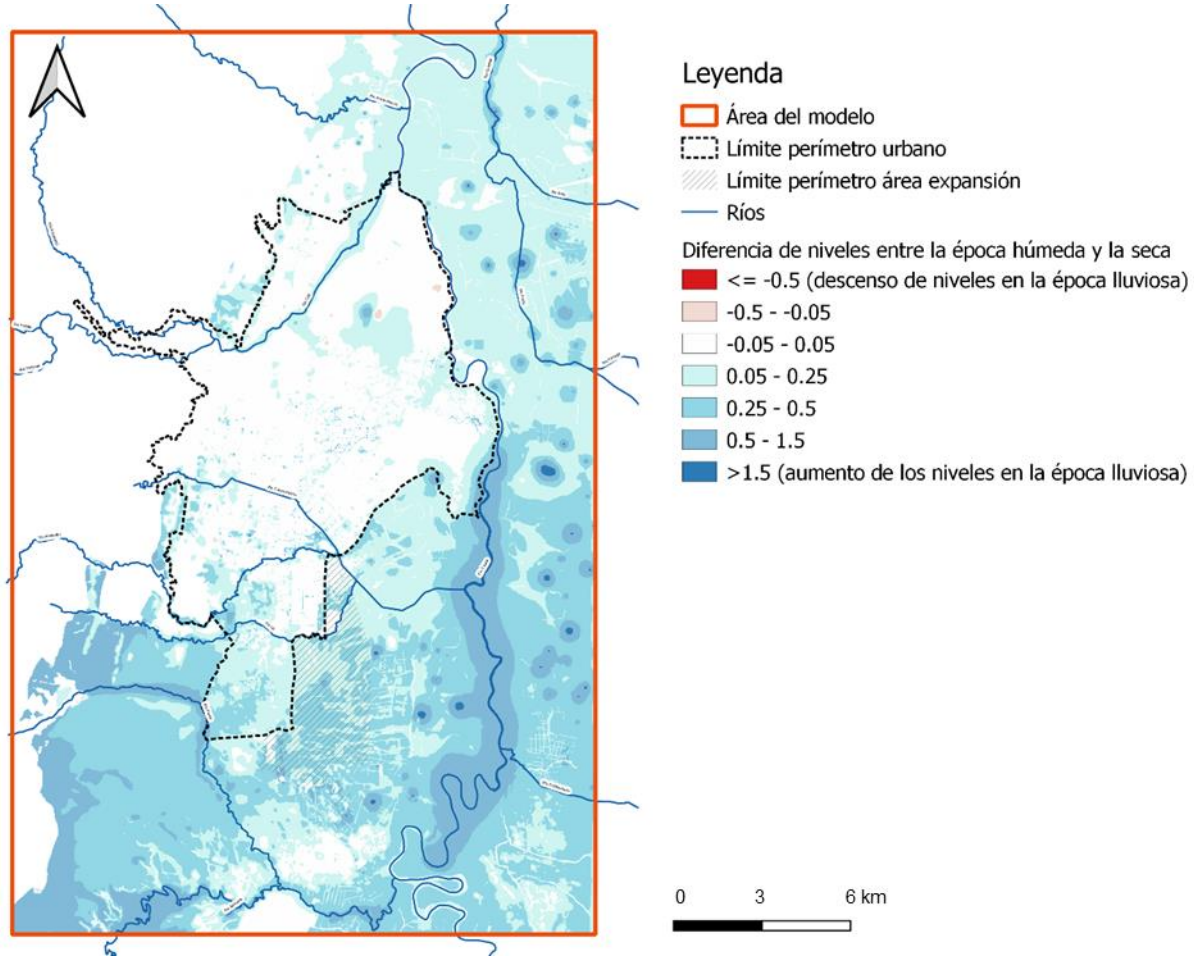


Figura 3-82 Variaciones estacionales de los niveles de agua subterránea

Análisis temporal de los niveles de agua subterránea

Para la evaluación a lo largo del tiempo de la variación de los niveles modelados, se han seleccionado cinco puntos ubicados a lo largo del área de estudio, en zonas que se comportan de forma distinta hidráulicamente (Figura 3-83):

1) Cono de Pance
2) Llanura aluvial del río Cauca
3) Parte alta del cono aluvial del río Cali
4) Llanura aluvial del río Cauca en la ciudad de Cali
5) Área de expansión

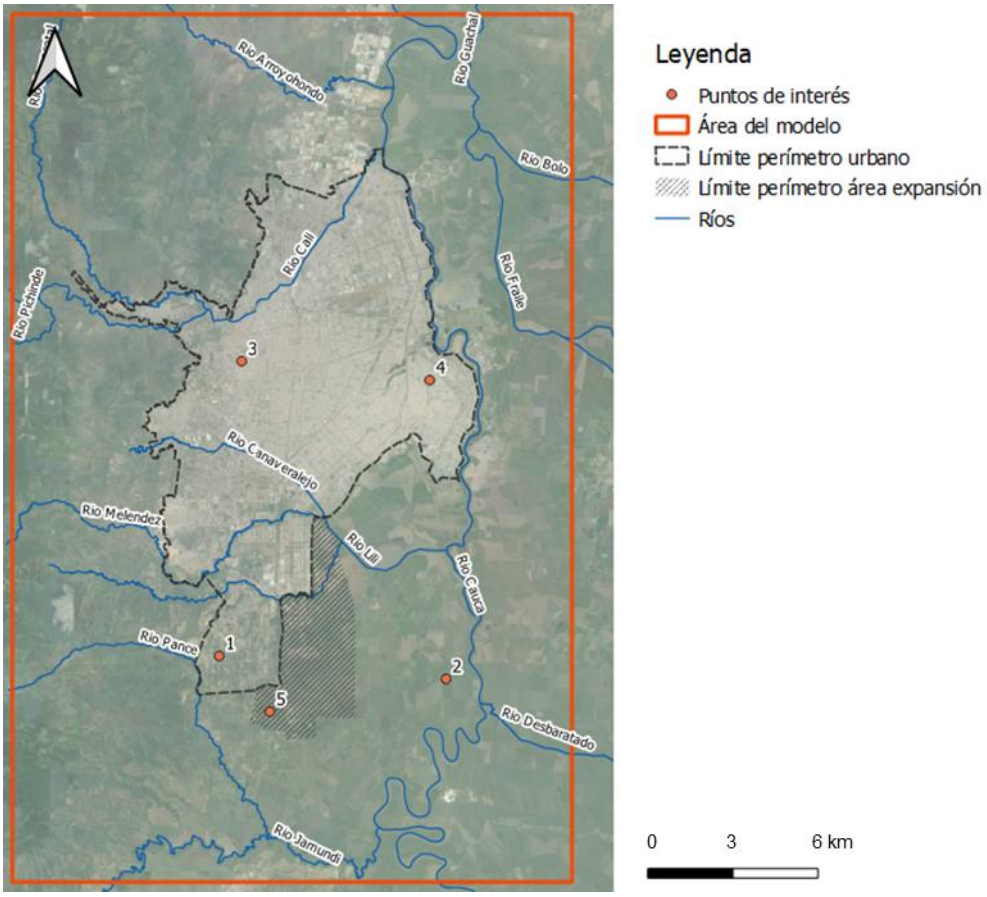


Figura 3-83 Puntos de evaluación de los niveles de agua subterránea

A continuación, se presentan las variaciones de las cargas hidráulicas en el tiempo para los puntos de evaluación.

En el caso del punto ubicado en el Cono de Pance (1) se puede ver que los niveles de agua subterránea en la capa 1 son mayores que los de la capa 4 con una diferencia de alrededor de 7 metros en promedio. Como el gradiente hidráulico indica, el flujo en esta zona es de la capa 1 hacia la 4, indicando que se trata de una zona de recarga.

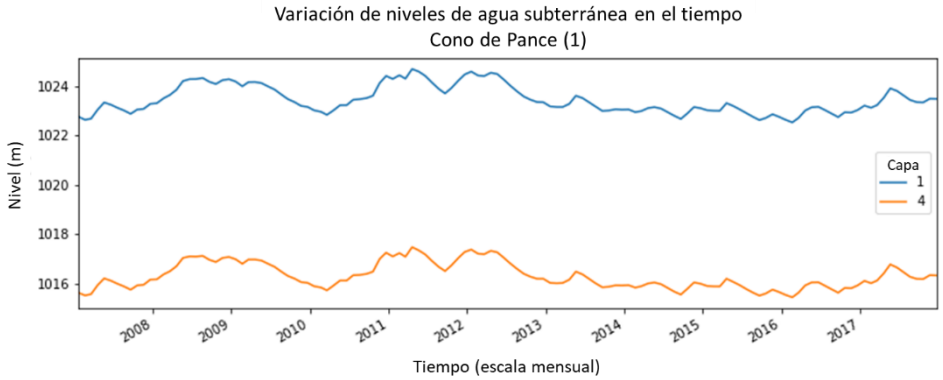


Figura 3-84 Variación de niveles modelados de agua subterránea en el tiempo en el cono de Pance

En la llanura aluvial (2), los valores de los niveles de agua subterránea en ambas capas son casi iguales, por lo que en esta ubicación el flujo vertical es mínimo, representando una potencial zona de transición. Se puede observar que en este punto los niveles han ido bajando

con el tiempo, sobre todo sufrieron un descenso en año 2010 de unos 3 metros, después se recuperaron, bajaron otra vez en el año 2013 y hasta diciembre de 2017 todavía no se habían recuperado.

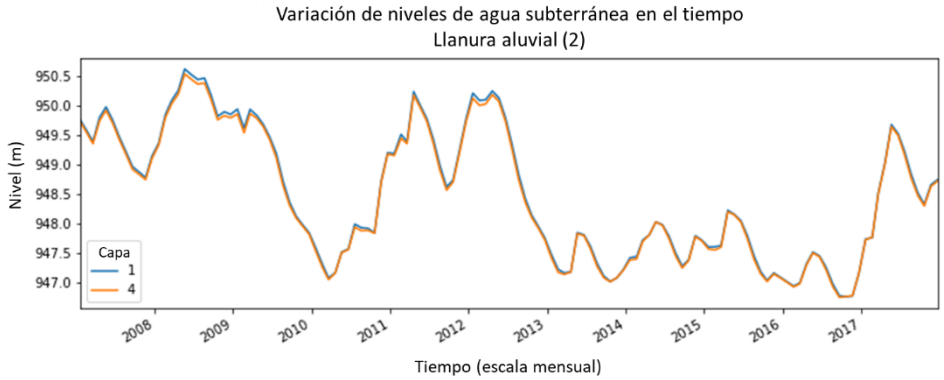


Figura 3-85 Variación de niveles modelados de agua subterránea en el tiempo en la llanura aluvial del río Cauca aguas arriba

El punto 3 caracteriza el cono aluvial formado por el río Cali, ubicado dentro de la zona urbana de la ciudad. Se observa que, al igual que en el punto 1, los niveles de agua subterránea de la capa 1 son mayores que los de la capa 4, indicando que se trata de una potencial zona de recarga. Sin embargo, la variación de los niveles de agua subterránea en este caso es de 20 cm en promedio. Esta diferencia entre el punto 1 y el punto 3 radica en las distintas tasas de recarga que hay en ambos. En este punto también se observa el descenso de niveles a partir del año 2013 (muy ligero, de unos 30cm) y una recuperación en el año 2017 pero que no ha sido suficiente para llegar a los niveles del año 2011 (Figura 3-86).

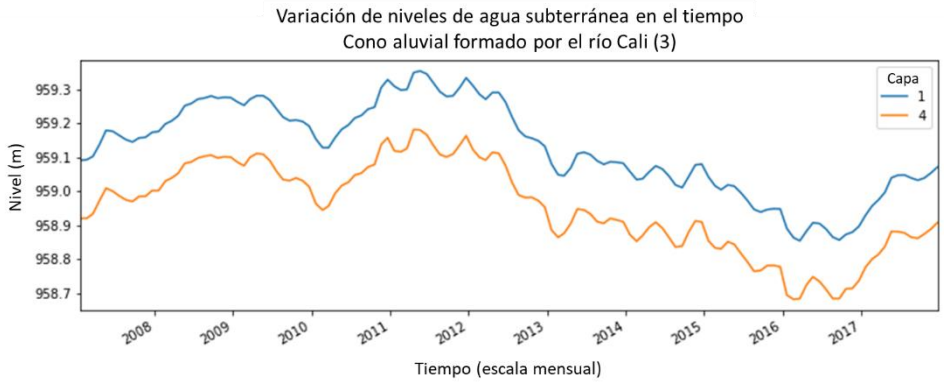


Figura 3-86 Variación de niveles modelados de agua subterránea en el tiempo en la parte alta del cono del río Cali

En la llanura aluvial ubicada dentro de los límites de la ciudad de Cali (4), los niveles de agua subterránea de la capa 4 son ligeramente mayores (40 cm en promedio) que en la capa 1. Este comportamiento hidrogeológico sugiere una mínima interacción de flujo vertical entre ambas capas, representando una zona de descarga (Figura 3-87).

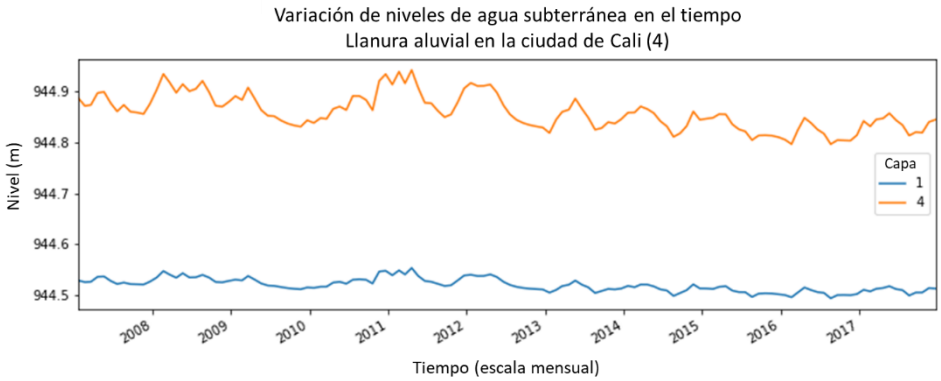


Figura 3-87 Variación de niveles modelados de agua subterránea en el tiempo en la llanura aluvial del río Cauca en la ciudad de Cali

Finalmente, el punto número 5 que representa el área de expansión de la ciudad de Cali, la cual se encuentra principalmente ubicada sobre el cono de Pance. En esta área, los niveles de agua subterránea de la capa 1 son mayores que las de la capa 4, con una diferencia promedio de 1.5 m, siendo una zona de recarga influenciada por las variaciones estacionales de la precipitación. Igual que en el cono de Pance, en el área de expansión los niveles bajaron unos 3 metros y todavía no se han recuperado (Figura 3-88).

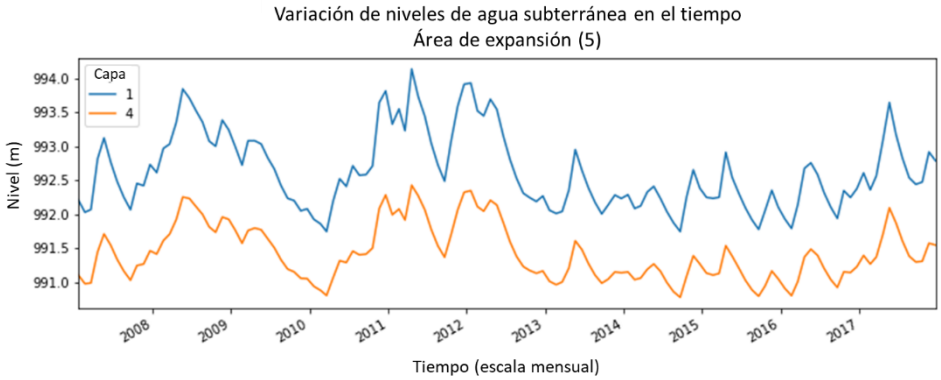
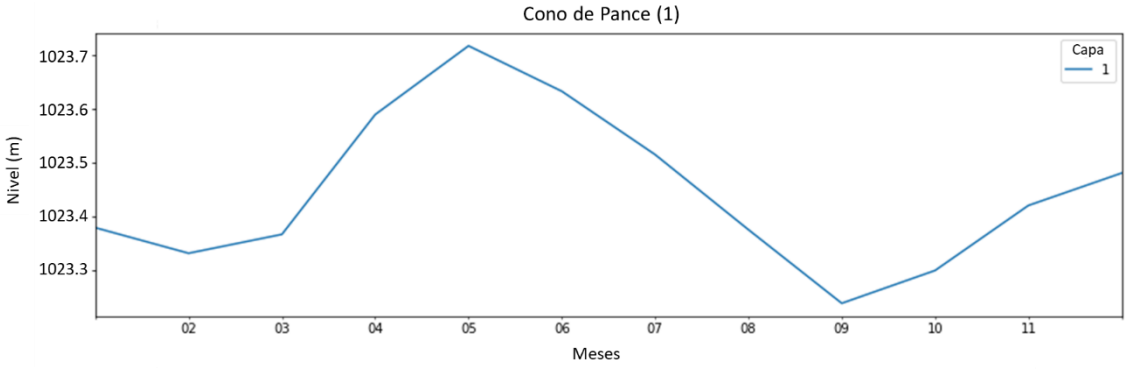
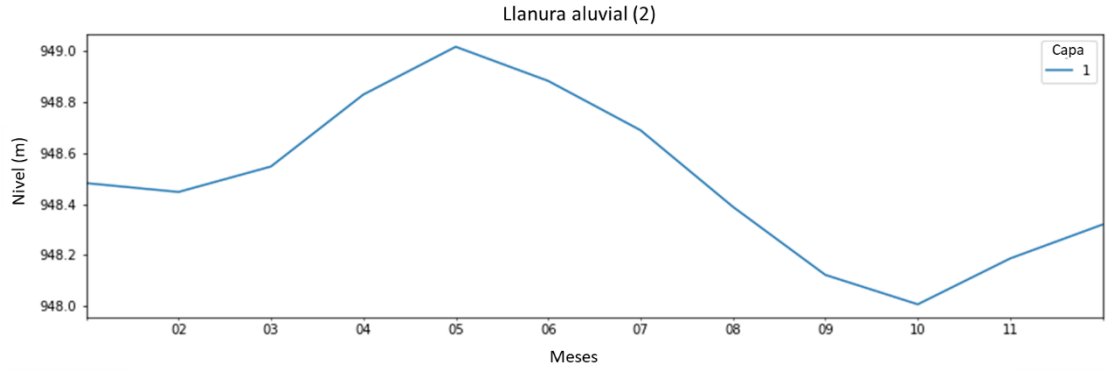
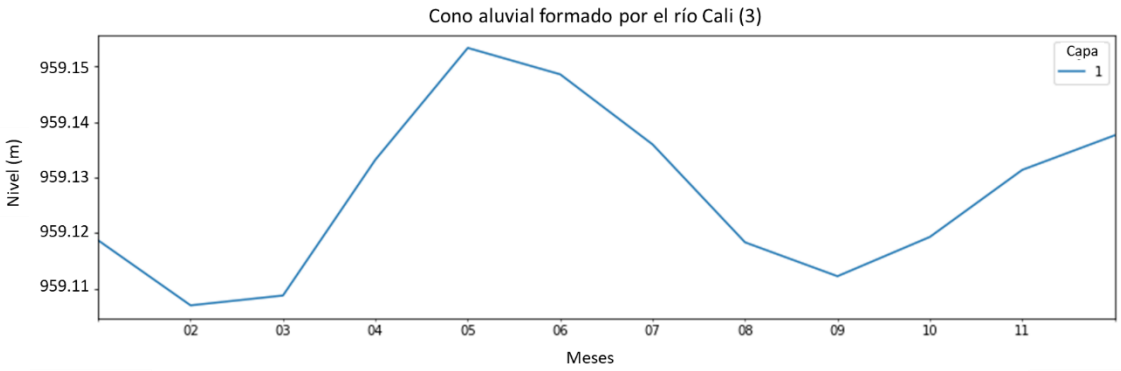


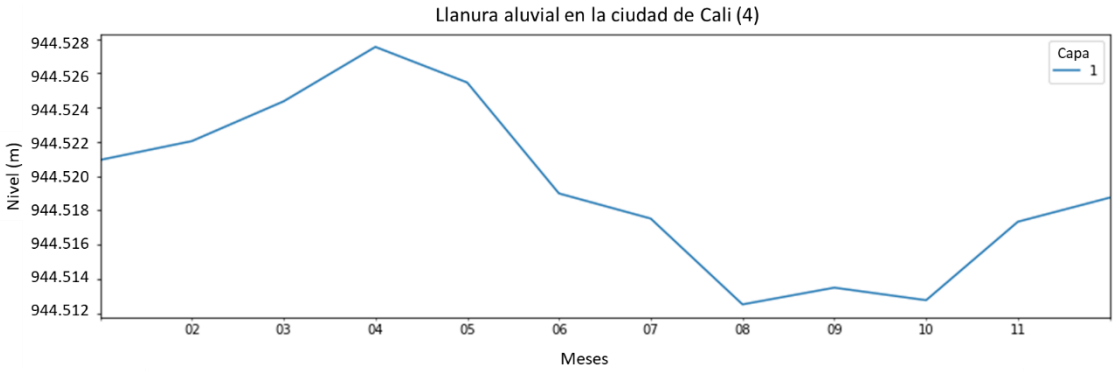
Figura 3-88 Variación de niveles modelados de agua subterránea en el tiempo en el área de expansión

Las siguientes figuras (Figura 3-89) muestran el promedio mensual multianual de los niveles de agua subterránea para cada uno de los puntos de evaluación. Si bien en los cuatro casos se puede observar una clara respuesta estacional del sistema hidrogeológico (dos épocas húmedas, dos épocas secas), esta variación resulta mínima (en la escala de centímetros). Además, se identifica que los conos aluviales tienen un mayor descenso de la capa freática en la temporada seca de diciembre a marzo, a comparación de las llanuras aluviales debido a la alta conductividad hidráulica de las formaciones. No obstante, en las siguientes temporadas se puede observar que todas siguen un mismo patrón. En cuanto al punto 2, la llanura aluvial aguas arriba del río Cauca, la variación estacional es mayor que en los otros puntos de evaluación en cuanto esta es un área agrícola, la cual se ve influenciada por los bombeos para riego. Adicionalmente, en el punto 4 (llanura aluvial aguas abajo, en la ciudad de Cali), se observa que el sistema hidrogeológico tiene una respuesta de un mes antes en comparación a los demás puntos, esto puede deberse a la conexión hidráulica con el río Cauca.


Cono de Pance (1)
Capa
1
Nivel (m)
1023.7
1023.6
1023.5
1023.4
1023.3
02
03
04
05
06
07
08
09
10
11
Meses


Llanura aluvial (2)
Capa
1
Nivel (m)
949.0
948.8
948.6
948.4
948.2
948.0
02
03
04
05
06
07
08
09
10
11
Meses


Cono aluvial formado por el río Cali (3)
Capa
1
Nivel (m)
959.15
959.14
959.13
959.12
959.11
02
03
04
05
06
07
08
09
10
11
Meses


Llanura aluvial en la ciudad de Cali (4)
Capa
1
Nivel (m)
944.528
944.526
944.524
944.522
944.520
944.518
944.516
944.514
944.512
02
03
04
05
06
07
08
09
10
11
Meses

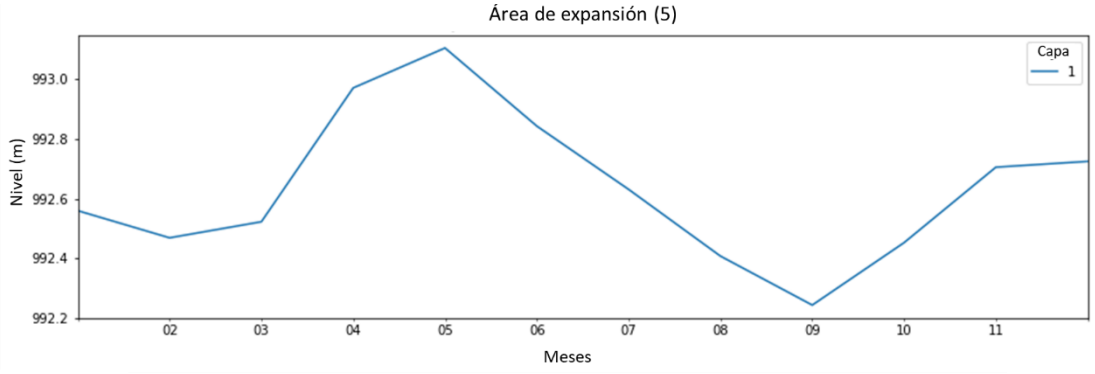


Figura 3-89 Variación mensual promedio de niveles de agua subterránea en los 5 puntos evaluados.

3.3.11 Incertidumbre del modelo

Las mayores incertidumbres relacionadas con el modelo numérico están relacionadas con:

- Pérdidas de acueducto
- Descarga en el sistema de alcantarillado, sótanos y galerías filtrantes
- Intercambio de agua con los ríos
- Morfología de la base hidrogeológica
- Recarga lateral

Pérdidas de acueducto
Las pérdidas del sistema de acueducto se han estimado como el 82% de la recarga total que llega al acuífero en la zona urbana. Actualmente estas pérdidas se han estimado con base a los datos proporcionados por EMCALI, pero existen varias suposiciones a la hora de determinar el valor total de las pérdidas, que podrían llevar a que los valores calculados no sean los reales. Además, a falta de más información sobre su ubicación, las pérdidas se han distribuido por toda el área urbana de forma homogénea, y se ha asumido que el agua llega a la zona saturada.

Descarga en el sistema de alcantarillado, sótanos, galerías filtrantes y otros
Este es el principal mecanismo de descarga del agua subterránea en el modelo. Sin embargo, este volumen no se ha podido validar porque no se tienen mediciones de caudales en los diferentes sistemas de drenaje urbano incluyendo el sistema de alcantarillado, las galerías filtrantes, los drenajes pluviales, los sótanos, etc. En cuanto a su distribución y profundidad en el modelo, a falta de más información, se han distribuido de forma homogénea por todas las áreas pavimentadas de la ciudad.

Intercambio de agua con los ríos
Este flujo es complicado de estimar porque depende de la conductancia de los ríos. En el caso del modelo numérico para Cali, algunos ríos están revestidos en los laterales y otros no. Se han adjudicados valores de conductancia diferente para estos ríos, basados en valores conocidos o estándares utilizados en modelación, pero no se conocen de forma cierta. Los valores de conductancia de los ríos tienen gran influencia en la cantidad de agua que se infiltra desde los ríos hacia el acuífero o que se drena desde el acuífero hasta el río. Un análisis de sensibilidad de esta parámetro podría indicar su relevancia en el modelo numérico para Cali.

Morfología de la base hidrogeológica
La profundidad y geometría de la base hidrogeológica se ha estimado usando las columnas litológicas, el mapa geológico, cortes geológicos, y un estudio de gravimetría (ver sección 3.2.3). Sin embargo, los resultados del modelo muestran que el modelo simula unos niveles de agua subterráneos demasiado bajos en la zona cercana a las laderas. Esto podría deberse a que en estas zonas la base hidrogeológica se ha estimado demasiado vertical o demasiado profunda. Más información sobre la geometría de la base sería de gran utilidad para mejorar los resultados del modelo en esta zona, que además es una zona importante de recarga.

Recarga lateral
Como se ha mencionado anteriormente, el modelo conceptual para el acuífero bajo la zona urbana, asume que la recarga lateral a través de la zona rocosa es negligible. Dentro de este PMAA se han realizado unos primeros estudios para evaluar si la suposición del modelo conceptual es correcta, pero los estudios no son concluyentes (ver Anexo 3). Si bien este término es incierto, estudios en otras zonas del Valle (Osorio, 2018), han demostrado que la recarga a través del a zona rocosa es muy baja, y por lo tanto no se espera que tenga un impacto muy elevado en los resultados del modelo.

3.3.12 Escenarios de cambio climático

Para desarrollar un mejor entendimiento entre la relación del cambio climático y los niveles de agua subterránea, se implementaron dos escenarios climáticos dentro del modelo estacionario de aguas subterráneas.

Para estimar la recarga difusa en un clima futuro, se utilizó un estudio recientemente completado sobre el cambio climático en la región del Valle (CIAT, 2017). En este estudio se consideran escenarios climáticos globales y se han desarrollado proyecciones de variables climáticas clave para la estimación de los recursos hídricos en una escala adecuada para la región del Valle del Cauca. El procedimiento que se ha seguido para establecer estos escenarios se describe en detalle en el CIAT (2017).

Las proyecciones de cambio climático fueron seleccionadas para dos escenarios, el primero es el escenario de línea base, basado en los resultados del Proyecto de Inter-compraración de modelos Acoplados de 5ta generación (CMIP5) para los años 1981-2010, con el año 1995 como año de referencia. El segundo es el escenario RCP 4.5, siendo el año proyectado el 2040 y basado en los resultados del CMIP5 para el período 2026-2055. El año proyectado de 2040 en el escenario RCP4.5 es congruente con los escenarios de cambio climático considerados en el Plan Nacional de Desarrollo en Colombia.

3.3.12.1 *Metodología*

En el estudio llevado a cabo por CIAT (2017), los datos de precipitación y temperatura de los Modelos Climáticos Globales se redujeron a la escala de la región del Valle del Cauca según las estadísticas de las estaciones de precipitación y temperatura observadas en la región. La metodología seguida se detalla en CIAT (2017). Como síntesis de la metodología enfoque, se destaca que se tomaron las proyecciones de las variables climáticas mensuales de los GCM, promediándose luego los valores de los 14 GCM sobre la región. Luego, se volvieron a muestrear a la escala de tiempo diaria utilizando un enfoque de reducción de escala estadística (Marksim), que preserva la distribución de días secos y húmedos en un mes. Los valores así obtenidos se volvieron a muestrear a una cuadrícula de resolución de 100x100m en áreas seleccionadas con cobertura de tierra específica, lo que resulta en 609891 puntos en toda la

región del Valle del Cauca en los que se generaron series temporales diarias. Para proporcionar una estimación de la incertidumbre, la estrategia de muestreo se aplicó 99 veces, dando como resultado 99 series temporales de datos diarios, ya sea para el año de referencia o para el año proyectado (2040). La duración de cada "año" es, por lo tanto, de 365 días (366 para los años bisiestos). La cantidad total de datos generados asciende a $22x10^9$ valores.

La recarga para el modelo numérico de Cali, está basada en la recarga calculada para todo el Valle del Cauca (modelo regional). Nótese que para la calibración histórica del modelo de agua subterránea construido para el acuífero del Valle del Cauca en el marco del PMAA, se interpolaron datos observados de 2000 a 2017 en unas 107 estaciones de precipitaciones en todo el Valle. La interpolación de los datos de temperatura utiliza menos puntos debido a la poca disponibilidad de estaciones con datos de temperatura confiables para calcular los valores de evaporación. Para utilizar el mismo soporte espacial en la interpolación de las proyecciones climáticas (tanto para el escenario base como para el escenario RCP4.5), se tomaron muestras de las 609891 series de tiempo disponibles en las estaciones más cercanas (por distancia) a las estaciones físicas utilizadas para la interpolación de los datos observados en el modelo numérico del acuífero del Valle del Cauca.

Como resultado, se obtuvieron 107 series de precipitación diaria para los 99 años que se utilizaron en la interpolación, utilizando la misma metodología de ponderación de distancia inversa estandarizado que se utiliza con los datos observados durante la estimación de la recarga difusa en la Sección 3.2.5. Para las series de temperatura, también se muestran las mismas estaciones utilizadas que en la interpolación de la temperatura observada, debido a que la altura de las estaciones (necesaria para la interpolación) es conocida en muy pocos casos.

En la interpolación de las 99 series diarias para cada estación (temperatura y precipitación), los datos se consideran como series de tiempo diarias continuas del 01-01-2001 a 31-12-2099. Esto permite importar los datos en FEWS ESCACES disponibles en CVC y posteriormente interpolar una serie temporal continua de 99 años de lluvia y temperatura diarias interpoladas espacialmente (mínimo, medio, máximo), con lo cual se puede calcular valores de evaporación diaria. Se debe tener en cuenta que las simulaciones climáticas sólo incluyen la temperatura diaria máxima y mínima. En base a datos históricos, se derivó una regresión simple entre el mínimo y el máximo diarios y la temperatura media, tal que:

$$T_{med} = aT_{max} + b$$

Donde T_{max} es la temperatura máxima diaria y T_{med} la temperatura media diaria. Los coeficientes $a = 0.44$ y $b = 10.51$ se han derivado utilizando los datos observados (Estación Alfonso Bonilla) disponibles para el período de 2000-2017.

3.3.12.2 *Cálculo de la recarga para los escenarios de referencia y RCP4.5*

Con el mismo enfoque que fue aplicado para estimar la recarga con los datos históricos en la Sección 3.2.5., se calculó la recarga en los escenarios de referencia y de *RCP4.5*. Al igual que en la simulación histórica para el modelo de agua subterránea, se consideró que:

- En las celdas en donde hay cultivos con riego, se considera que el riego se aplica durante 180 días al año, con una dosis de 7,5 mm por día, ponderada por la precipitación anual promedio en esa celda. Suponemos por simplicidad

que la precipitación anual promedio en el Valle no varía significativamente en los dos escenarios.

- Las tasas de bombeo se consideran iguales a las observadas para el promedio de los años 2000 a 2017.

La siguiente tabla presenta los valores de recarga promedio anual para los dos escenarios de cambio climático (escenario base y RCP 4.5), tomando en cuenta el área activa del modelo. Se observa que en el caso del RCP 4.5, se ha modelado una disminución de la recarga a comparación del escenario base de 28.6 Mm^3, en promedio.

Tabla 3-16 Diferencias en valores de recarga para el área del modelo entre el escenario climático y el escenario de referencia

Área activa del modelo (m^2)		**454 125 000**
Baseline	Recarga promedio anual (mm/d)	1.11
	Recarga promedio anual (m^3/y)	184 509 164
	Recarga promedio anual (Mm^3/y)	184.5
RCP 4.5	Recarga promedio anual (mm/d)	0.94
	Recarga promedio anual (m^3/y)	155 881 052
	Recarga promedio anual (Mm^3/y)	155.9

La Figura 3-90 presenta la diferencia espacial del promedio anual de recarga entre el escenario base y el escenario RCP 4.5. Los colores azules muestran una recarga mayor en el escenario de referencia que en el RCP4.5, y los colores rojos muestran una recarga mayor en el escenario RCP4.5 que en el de referencia. Se observa que, en el área urbana, estas diferencias son mínimas en comparación a lo que ocurre en las zonas aledañas a causa de la cobertura impermeable en la ciudad de Cali. Por otro lado, en las zonas agrícolas hacia el noreste, circundantes al río Cali, se espera que ante el escenario RCP 4.5 la recarga se vea disminuida. Al contrario, en las áreas al sur se espera un aumento de la recarga ante este escenario.

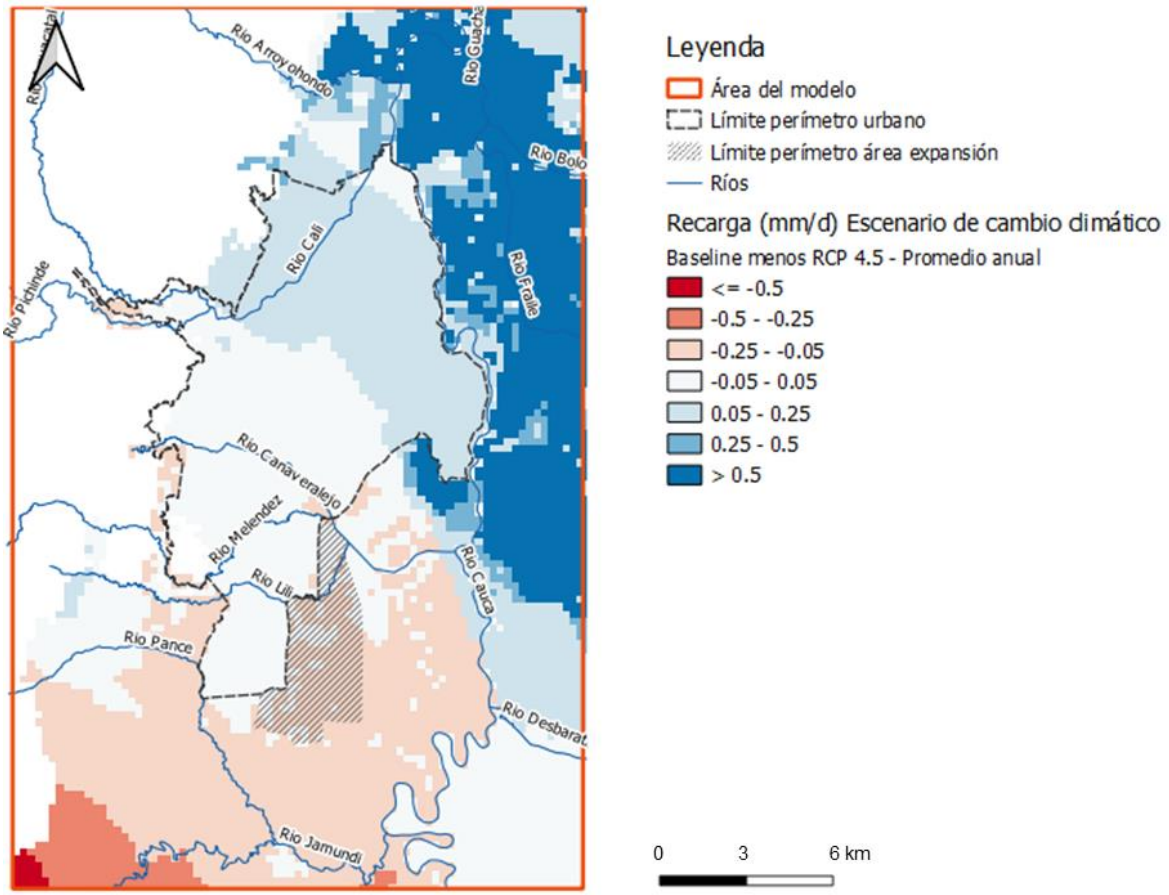


Figura 3-90 Diferencia entre la recarga del escenario de referencia y el escenario RCP4.5.

La pequeña diferencia entre la recarga de ambos escenarios se debe a que la variable que más cambia entre los dos escenarios es la temperatura. Dado que la mayor parte de la ciudad de Cali está impermeabilizada, y que la recarga se da en la parte alta de los conos dónde el nivel de agua subterránea está muy profundo, y a través de los ríos que no ven alterado su caudal con la simulación de la recarga, el proceso de evapotranspiración no se ve afectado por el escenario climático, y el cambio que se observa en la recarga viene dado por el cambio en precipitación, que en este escenario no es significativo.

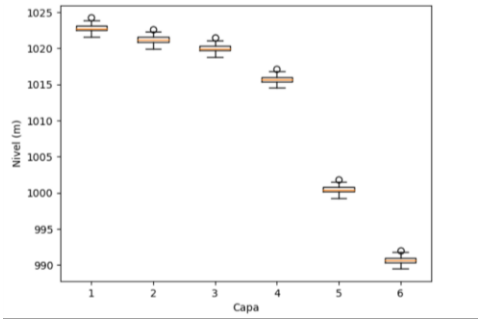
3.3.12.3 *Impactos del cambio climático sobre los niveles de agua subterránea*

Para evaluar los impactos del escenario climático RCP4.5 sobre los niveles del acuífero, se evaluaron las variaciones de niveles en el tiempo en los mismos puntos que se consideraron anteriormente para el análisis del modelo transitorio.

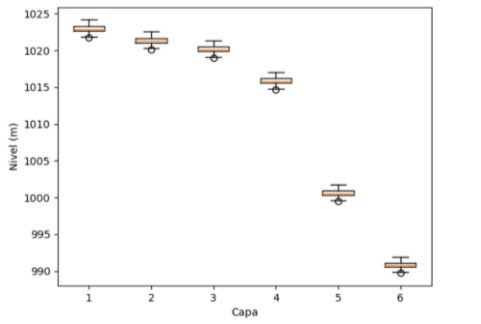
Los siguientes diagramas de cajas (Figura 3-91) presentan la comparación de los niveles de agua subterránea simulados para cada una de las capas del modelo a lo largo del intervalo de tiempo de evaluación y para el escenario base (izquierda) y el RCP 4.5 (derecha). En términos generales, la diferencia entre ambos escenarios no es significativa, tratándose de variaciones de niveles en la escala de pocos centímetros (< 20cm). De acuerdo a ello, se puede concluir que las variaciones estimadas de recarga en base al cambio climático estimado no afectarán en gran medida la dinámica hidrogeológica del área de estudio. Cabe mencionar que en este estudio no se ha evaluado el impacto del escenario climático sobre los caudales de los ríos.

Dado que los ríos son importantes para la recarga del acuífero, se recomienda en estudios futuros incluir el cambio en los caudales de los ríos y acoplarlo al modelo numérico subterráneo.

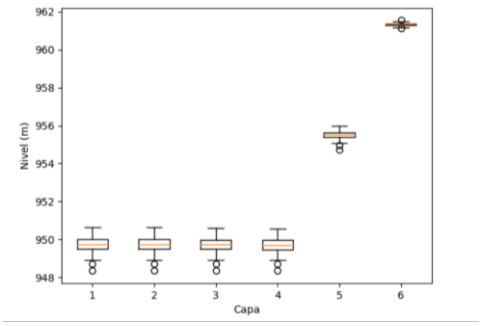
Cono de Pance



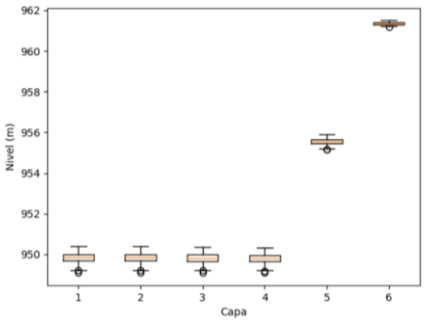
Cono de Pance RCP4.5



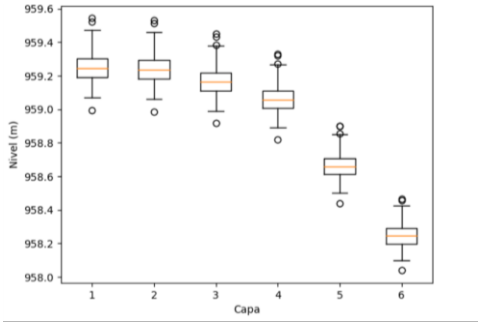
Llanura aluvial



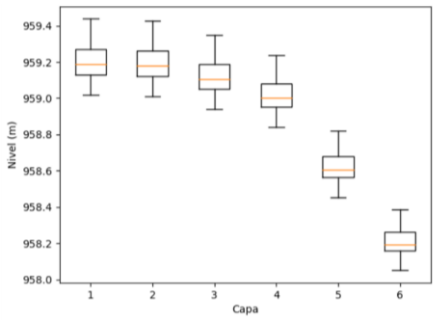
Llanura aluvial RCP4.5



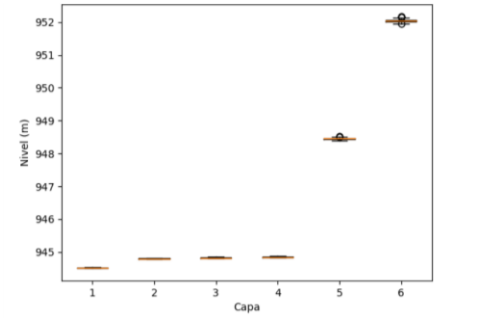
Cono aluvial río Cali



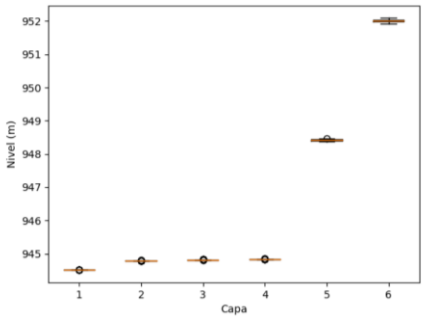
Cono aluvial río Cali RCP4.5



Llanura aluvial Cali



Llanura aluvial Cali RCP4.5



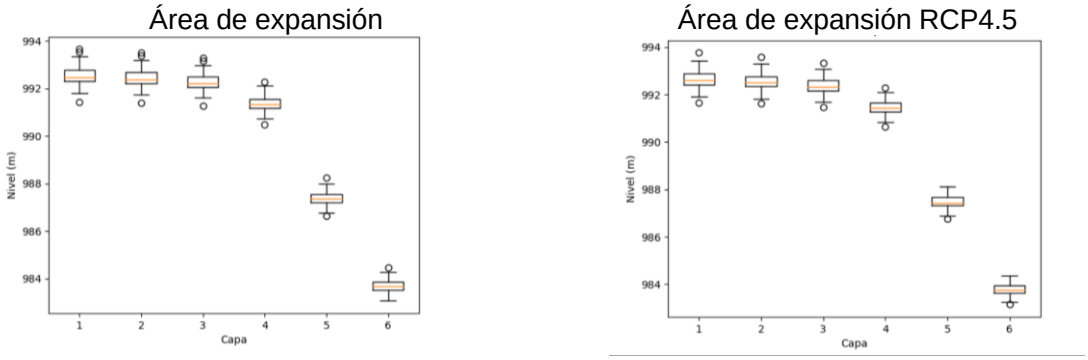


Figura 3-91 Comparación de los niveles de agua subterránea simulados para cada una de las capas del modelo a lo largo del intervalo de tiempo de evaluación y para el escenario base (izquierda) y el RCP 4.5 (derecha)

3.3.13 Escenario de cambio de uso de suelo

Este escenario busca evaluar las variaciones en el flujo de agua subterránea ante el posible efecto de urbanización en ciertas zonas del municipio de Cali. Para ello, el DAGMA ha definido 5 áreas donde la municipalidad tiene planes de construcción y que se encuentran sobre el área del acuífero.

- Zona 1: Zona de Expansión urbana corredor Cali-Jamundí que cuenta con planes parciales
- Zona 2: Zona de Llanos de Pance y El Embudo para la cual también existen planes parciales entre la zona urbana y la rural
- Zona 3: Zona La Riverita para la que se propone determinar la totalidad de la zona como suelo suburbano y para la cual se cuenta con un plan zonal
- Zona 4: Macroproyecto Ecociudad Navarro para el cual se tiene un plan zonal
- Zona 5: Comuna 22, que, si bien ya forma parte de la zona urbana del municipio, hay planes para densificar la urbanización

Este cambio de uso de suelo afectará la recarga actual que se da en estas zonas, por lo que este será el parámetro a variar en la nueva simulación. Para ello, se han calculado factores de multiplicación, los cuales se han aplicado a la recarga original utilizada en el modelo estacionario de manera que representen los cambios esperados.

Para este escenario se ha considerado que las nuevas áreas tendrán un porcentaje de área impermeable igual a 78.7%, el cual es el porcentaje actual de área impermeable en la zona urbana sin incluir Zona 5 - comuna 22. Para la definición de los factores a aplicar a la recarga (Tabla 3-17) se siguieron los siguientes pasos:

1. Estimación de la recarga promedio para el área impermeable de cada zona.
2. Estimación de la recarga promedio para el área permeable de cada zona.
3. Cálculo de la recarga actual promedio por zona usando los valores anteriores y el % de área permeable/impermeable actual.
4. Recálculo de la recarga promedio por zona si se utilizara el nuevo porcentaje de área impermeable considerado.
5. Cálculo del factor que debe ser aplicado a la recarga actual en todas las celdas de cada polígono: división de (4) entre (3).

Tabla 3-17 Resultados intermedios y factores finalmente calculados en el cálculo de la recarga es escenario de cambios de usos del suelo.

Zonas	% Área impermeable actual	% Área permeable actual	Recarga promedio actual en áreas impermeables (mm/d)	Recarga promedio actual en áreas permeables (mm/d)	Recarga actual promedio (mm/d)	Nueva recarga promedio (mm/d)*	Factor aplicado a la tasa de recarga actual
Zona 1 - Zona de expansión	15.6	84.4	0.08	1.50	1.28	0.38	0.30
Zona 2	42.5	57.5	0.20	2.20	1.35	0.63	0.46
Zona 3	0.1	99.9	0.18	1.80	1.80	0.53	0.29
Zona 4	3.6	96.4	0.06	1.20	1.16	0.30	0.26
Zona 5	45.8	54.2	0.10	2.00	1.13	0.51	0.45

* Considerando 78.7% de área impermeable.

La Figura 3-92 presenta la ubicación de los polígonos que delimitan las zonas en evaluación, así como los factores de multiplicación a ser considerados en este escenario para cada una de ellas.

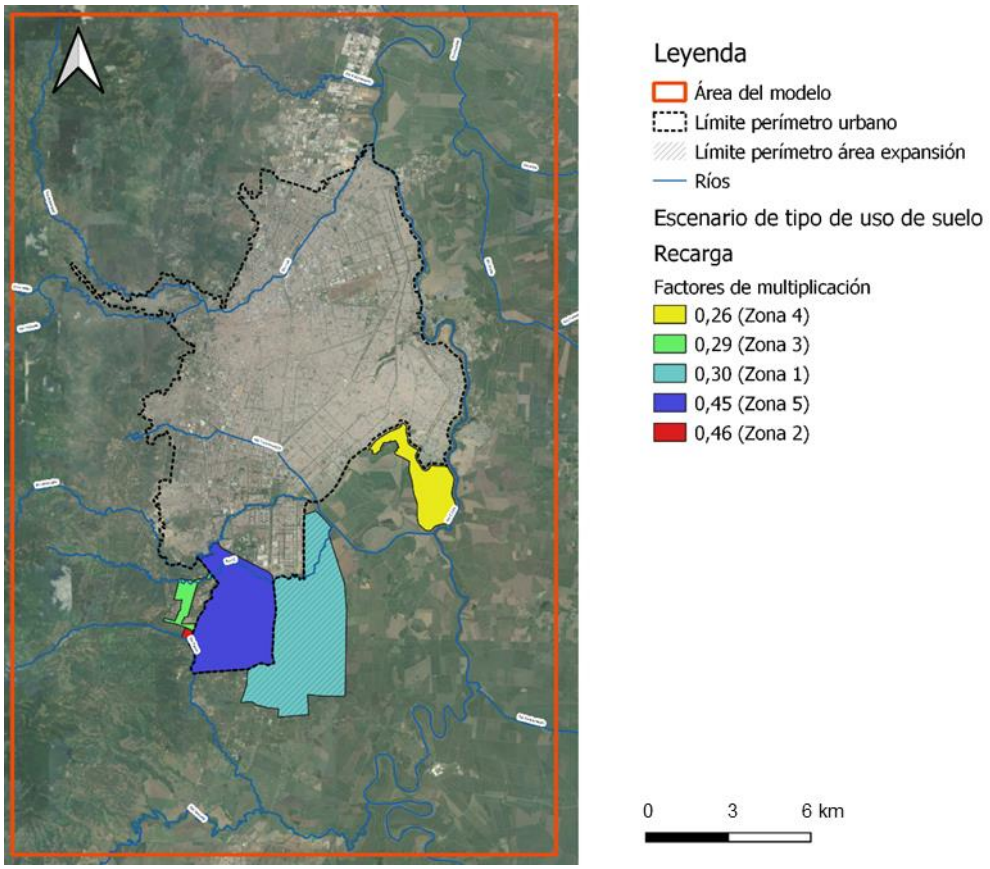


Figura 3-92 Ubicación de los polígonos que delimitan las zonas en evaluación y factores de multiplicación para la recarga

La Figura 3-93 muestra un acercamiento al área donde ha ocurrido la variación de la recarga y la comparación entre las tasas de recarga originales y las modificadas luego de aplicar los

factores de multiplicación. Se puede observar la disminución de la recarga debido a las condiciones impermeables consideradas en el nuevo escenario, como es esperado.

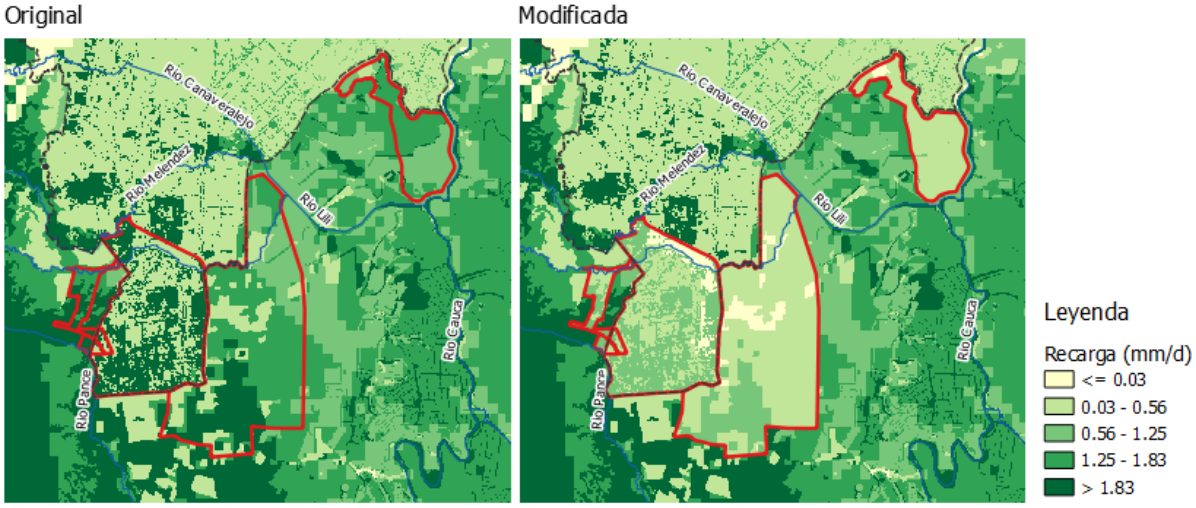


Figura 3-93 Comparación entre la recarga del modelo de referencia i la del escenario de cambio de uso del suelo

En cuanto al descenso de niveles provocado por la impermeabilización y consecuente disminución de la recarga (Figura 3-94), se espera que sea de entre unos pocos centímetros y hasta casi 2 metros. En las zonas 2 y 3, el descenso es de 25cm a 75cm. Si bien esto no se espera que tenga un impacto importante en la condición de recarga o descarga del acuífero porque aquí el nivel del agua ya es muy profundo y es una zona de recarga clara, la recarga total se verá disminuida entre un 50% o 75% en estas dos zonas. En la parte sureste de la Comuna 22 (Zona 5), y en la parte sureste de la zona de expansión (Zona 1) los descensos llegan a 1.5 en algún punto. En la zona de Ecociudad Navarro (Zona 4) llegan a 75cm. En estas zonas, además, el descenso de niveles y el cambio de condición de recarga del suelo, puede tener un impacto sobre los humedales que dependen de las aguas subterráneas. Estudios específicos sobre las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas podrían concluir la importancia de las aguas subterráneas para la preservación de los humedales.

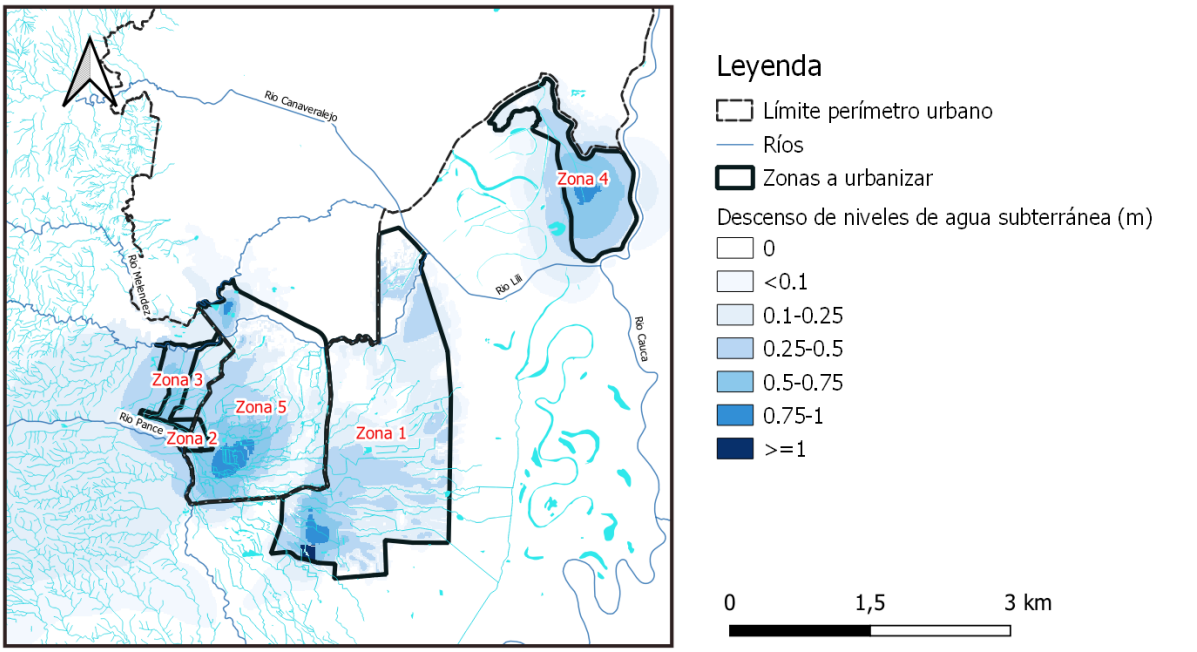


Figura 3-94 Descenso de los niveles por el cambio de usos del suelo

En relación con los flujos a 25 metros de profundidad (Figura 3-95) los colores morados representan zonas de recarga, mientras que los anaranjados muestran las zonas de descarga. Comparando el modelo original y el escenario, las diferencias son mínimas entre ellos. Sin embargo, se observa que el área al noreste de la Zona 1, en la margen derecha del río Lili, ha cambiado ligeramente su patrón original de zona de recarga a zona de descarga. Por otro lado, en la Zona 4, los flujos de recarga a 25 metros de profundidad han disminuido, de forma que en la zona noroeste de la misma se muestra un cambio en el sentido de flujo vertical del agua subterránea (de recarga a descarga).

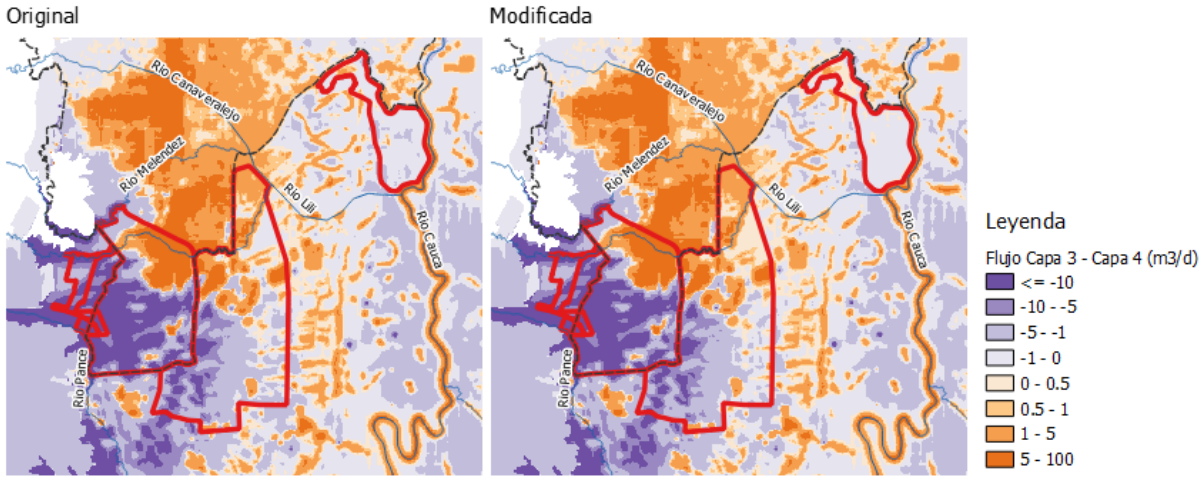


Figura 3-95 Flujos de recarga y descarga a 25 metros de profundidad en el modelo estacionario de referencia y en el escenario de usos del suelo

3.4 Resultados del balance hídrico, volumen almacenado, e IEAS

3.4.1 Balance hídrico

Los resultados que se presentan para el balance hídrico, provienen de diferentes secciones del diagnóstico. Los términos analizados son los pertenecientes al balance de la Unidad A en la zona urbana y en la zona de expansión y son el resultado del periodo enero de 2007 a diciembre de 2017. Se recomienda ir actualizando el balance hídrico a medida que se disponga de datos, y sobre todo, después de que ocurran años Niño, que pueden alterar el balance de forma sustancial.

Zona urbana

En la zona urbana el balance hídrico está formado por los componentes que se mencionan a continuación. También se describe la metodología de cálculo para cada uno de los términos.

Entradas:

RR → La recarga a través de los ríos es un resultado del modelo numérico estacionario

RD → La recarga difusa por precipitación o retorno de riego se ha calculado como se describe en la Sección 3.2.5.

RT → La recarga de acueducto y sistemas de alcantarillado se calculó como se describe en la sección 3.2.5.

RL → La potencial recarga lateral de las formaciones rocosas – no se cuantificó. Se propone su cuantificación en uno de los proyectos (ver sección 6.4.1)

FR → El flujo subterráneo regional que entra en la zona urbana es un resultado del modelo numérico estacionario

Salidas:

DBA → Descarga por bombeo Unidad A. Se calculó para todo el acuífero como se describe en la sección 3.2.7., y el volumen que se bombea solamente de la Unidad A, es un resultado del modelo numérico estacionario

DR y DH → Descarga en ríos y humedales, es un resultado del modelo numérico estacionario

DG y DT → La descarga hacia galerías filtrantes y sótanos, y la descarga hacia el sistema de alcantarillado se han estimado juntos y son un resultado del modelo numérico estacionario. También hay drenaje hacia acequias u otros sistemas superficiales.

FR → El flujo subterráneo regional que sale de la zona de estudio es un resultado del modelo numérico estacionario

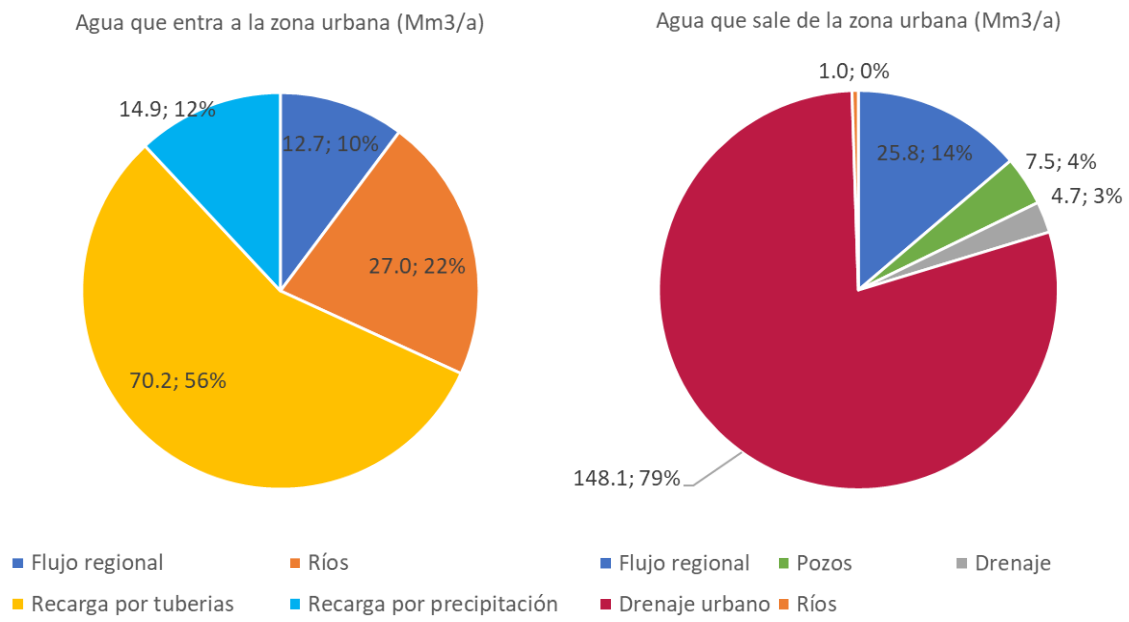


Figura 3-96 Entradas y salidas de agua en la zona urbana y la Unidad A

Como muestran las figuras, la principal entrada de agua en la zona urbana se da a través de las pérdidas de acueducto (56% equivalente a 70.2Mm^3/a). Las otras entradas son el agua infiltrada por los ríos (22% equivalente a 27Mm^3/a), el flujo regional (10% equivalente a 12.7Mm^3/a), y la recarga por precipitación (12% equivalente a 14.9Mm^3/a). La principal salida es la que se da a través de los sistemas de drenaje urbano, ya sea el alcantarillado y los sistemas pluviales principalmente, y los sótanos o galerías filtrantes en menor medida (79% equivalente a 148.1Mm3/a), seguida por el flujo regional (14% o 25.8Mm^3/a), los pozos (4% o 7.5Mm^3/a), el drenaje hacia acequias (3% o 4.7Mm^3/a), y los ríos (1Mm^3/a).

Además de los componentes mostrados en los gráficos, está el flujo entre las unidades A y C. Según los resultados del modelo, el balance neto entre la Unidad A y la Unidad C es de 38.6Mm^3/año desde la Unidad C a la Unidad A, por lo tanto también es un flujo de entrada a la Unidad A de suma importancia.

La oferta renovable de agua subterránea para la zona urbana se puede considerar como la suma de la recarga difusa y el agua infiltrada por los ríos, es decir, 112.2Mm^3/año

Zona de expansión

Para la zona de expansión el balance hídrico tiene los mismos componentes que para la zona urbana, excepto que la recarga por tuberías no se consideró para esta área y se estimó que toda ocurría bajo la zona urbana. Si bien la zona está en desarrollo y el sistema de drenaje urbano está en construcción, se consideró que en las zonas ya impermeabilizadas, ya hay un sistema de drenaje.

En la zona de expansión, los ríos y las derivaciones de Pance son los que más recargan el acuífero (52% o 24.9Mm^3/a), seguidos del flujo regional (32% o 15.4Mm^3/a), y la recarga por precipitación (16% o 7.5Mm^3/a), El drenaje hacia los sitemas urbanos de drenaje representa la principal salida de agua de la zona (53% o 17.5Mm^3/a), seguido del flujo regional (25% o 8.2Mm^3/a), drenaje hacia acequias y sistemas de riego (11% o 3.5Mm^3/a), los ríos (9% o 3.1Mm^3/a), y los pozos (2% o 0.7Mm^3/a).

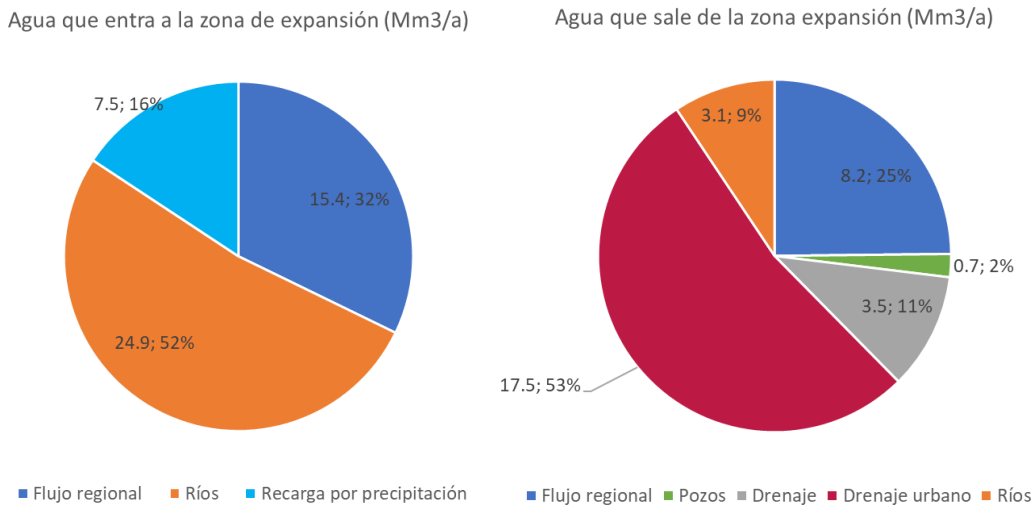


Figura 3-97 Balance hídrico para la zona de expansión y la Unidad A

3.4.2 Volumen almacenado

El volumen de agua almacenado en la Unidad A se define como el volumen de agua que se encuentra en los poros de los sedimentos que conforman la Unidad A, y se calcula siguiendo la metodología publicada por Gleeson (2015) utilizando el espesor saturado de la Unidad A (diferencia entre el nivel freático y la profundidad de la Unidad A), y la porosidad de los sedimentos. La porosidad asignada es un promedio para sedimentos silicatados y se ha estimado en 20% (Gleeson, 2015). El espesor promedio de la Unidad A según las capas utilizadas es de 50 metros con una desviación estándar de 17 metros.

Con esta metodología se estima el agua almacenada en al acuífero que no es equivalente al agua disponible para extracción, ya que parte de esta agua se encuentra atrapada en los poros de los sedimentos con menor permeabilidad (arcillas y limos).

La fórmula aplicada para obtener el valor del volumen almacenado es:

$$Vol\ alm = \sum (nf - profA) * \emptyset * Ac$$

dónde:
nf es el nivel freático calculado por el modelo en la capa 1
profA es la profundidad de la capa del modelo que representa la base de la Unidad A (capa 4)
$\emptyset$ es la porosidad
Ac es el área de una celda (25x25m)

Según estos cálculos, el volumen almacenado en la Unidad A bajo la zona urbana de Cali es de unos 1120Mm^3.

Una incertidubmre a tener en cuenta es que cerca de los conos, la Unidad A se junta con la C, lo que en las capas del modelo se traduce en que la Unidad A se acuña (ver los cortes en la sección 3.2.3.1) y prácticamente desaparece. El cálculo anterior da un resultado por lo tanto nulo en esas zonas y se espera que se esté subestimando con unos 100 Mm^3 el volumen total calculado.

3.4.3 Índice de Extracción de las Aguas Subterráneas

El Índice de Extracción de las Aguas Subterráneas (IEAS) se define como el cociente entre la extracción de agua subterránea y los recursos renovables. El IEAS se ha calculado para la zona urbana y para cada una de las subcuencas hidrográficas, en toda su área que queda dentro del área del modelo (es decir, se incluye parte que queda fuera de la zona urbana). Los datos usados son los promedios de recarga y bombeos para el periodo enero de 2007 a diciembre de 2017.

El IEAS se ha calculado como:

$$\frac{Volúmenes\ consumidos\ promedio\ del\ periodo\ 2007-2017\ por\ cuenca}{Recarga\ difusa\ por\ cuenca\ promedio\ para\ el\ periodo\ 2007-2017}$$

Los resultados se presentan en la Tabla 3-18:

Tabla 3-18 IEAS por Cuenca utilizando la recarga por precipitación y por pérdidas de acueducto

Cuenca	Bombeos (m^3/d)	Recarga difusa incluyendo precipitación y pérdidas de acueducto (m^3/d)	IEAS incluyendo precipitación y pérdidas de acueducto (%)
Zona urbana	20490	233325	9
Cali	6500	33300	20
Lili-Meléndez-Cañaveralejo	23600	242000	10
Jamundí (río Pance)	15900	247000	6

A este análisis faltaría sumarle los bombeos de pozos no registrados. En el momento de la formulación del PMAA no se tiene información del volumen que están bombeando estos pozos no registrados .

Si el IEAS se calcula utilizando solamente la recarga por precipitación (sin incluir las pérdidas de acueducto), los valores son los siguientes (Tabla 3-19):

Tabla 3-19 IEAS por Cuenca utilizando la recarga por precipitación

Cuenca	Bombeos (m^3/d)	Recarga difusa considerando solamente la precipitación (m^3/d)	IEAS considerando solamente la precipitación (%)
Cali	6500	5350	128
Lili-Meléndez-Cañaveralejo	23500	83000	28
Jamundí (río Pance)	15900	241200	7

Para le estimación del IEAS en la zona urbana de Santiago de Cali se ha tenido en cuenta la siguiente información:

1. Un promedio anual de 9.7 Mm^3 de extracciones de agua subterránea, estimado a partir de los registros históricos de demanda de agua en la zona urbana de Santiago de Cali (Tabla 3-7) este valor es muy similar a los consumos registrados en el año 2017 de 9.8 Mm^3.
2. La oferta disponible calculada a partir los registros de recarga difusa por precipitación (14.9 Mm^3/a), recarga por ríos (30.4 Mm^3/a) y recarga por perdidas de agua en el acueducto (70 Mm^3/a).

Los valores de IEAS para la zona urbana de Cali se presentan en la Tabla 3-20.

Tabla 3-20 IEAS para la zona urbana

Oferta disponible	Mm3/a	Demanda anual promedio Mm^3	IEAS %
Recarga por precipitación	14.9	9.7	65
Recarga por los ríos	27	9.7	36
Recarga por precipitación + pérdidas de agua en el acueducto	85.1	9.7	11
Recarga precipitación + recarga por ríos	41.9	9.7	23
Todas las recargas	112.1	9.7	9

El volumen máximo extraíble se considera en otras zonas como el 30 o 50% de la recarga difusa (precipitación más pérdidas en el acueducto). Para estas cuencas, el volumen máximo extraíble siendo conservativos (es decir, considerando el 30% de la recarga), pero incluyendo las pérdidas por tuberías se presenta en la Tabla 3-21.

Tabla 3-21 Volúmen máximo extraible

Cuenca	Volumen máximo extraíble (m^3/d)	Volumen máximo extraíble (Mm^3/a)
Zona urbana	70000	25.5
Cali	9900	3.6
Lili-Meléndez-Cañaveralejo	72600	26.5
Jamundí (río Pance)	74100	27

3.5 Análisis y recomendaciones para la red de monitoreo de la cantidad y calidad del agua subterránea

El DAGMA cuenta con una red de monitoreo de 56 piezómetros construidos entre el 2010 y 2014 (García & Molano, 2015). La red está distribuida en las diferentes unidades hidrogeológicas de la zona urbana del municipio de Cali, con piezómetros entre 10 y 30 metros de profundidad (ver Figura 3-98).

El DAGMA realiza mediciones sobre la red de monitoreo, para evaluar las variaciones de los niveles piezométricos y la calidad del agua subterránea. Para el diagnóstico del PMAA se realizó un análisis de la red existente y de las mejoras al monitoreo del sistema de aguas subterráneas en la zona urbana del Municipio de Cali.

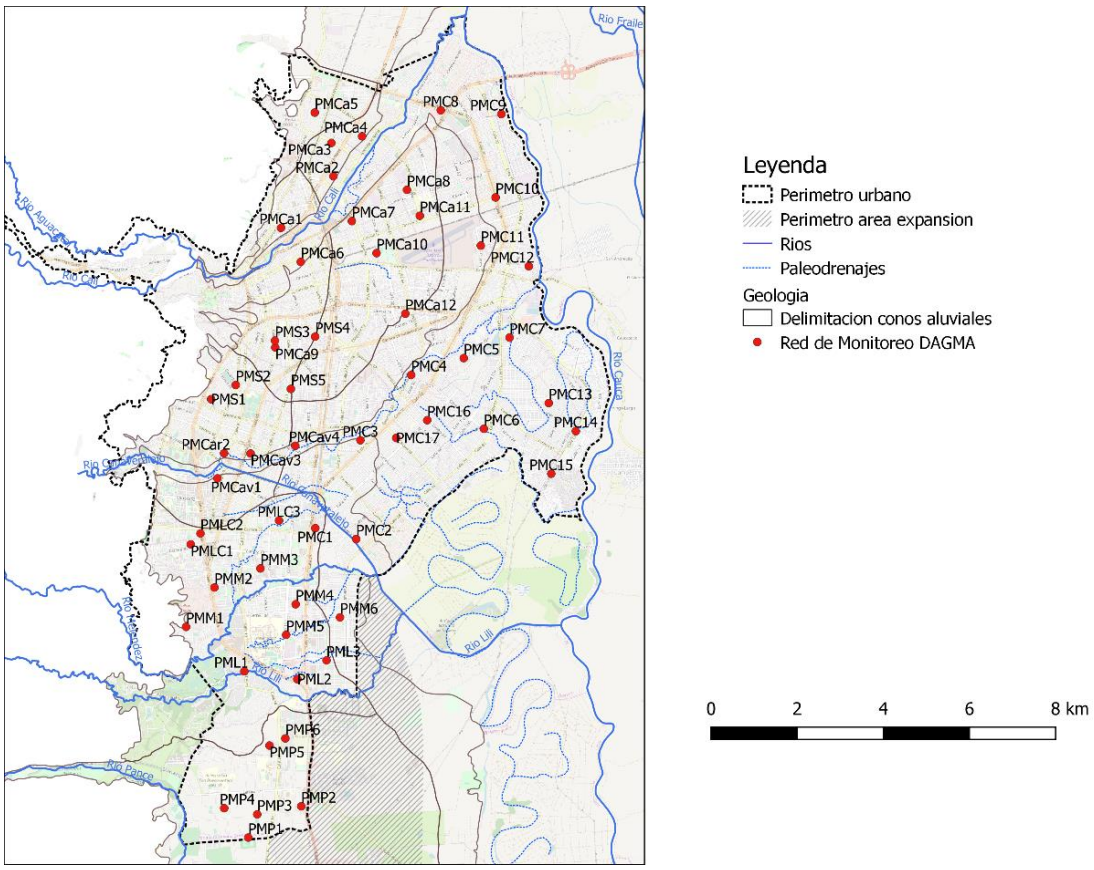


Figura 3-98 Localización de la red de monitoreo del DAGMA

Objetivo de la red de monitoreo:

La red de monitoreo existente puede ser utilizada para conocer el comportamiento y variaciones a escala urbana de los niveles, caracterización hidro geoquímica y de potenciales procesos de contaminación difusa y/o regional (i.e. contaminación por fugas en tuberías de aguas residuales, las cuales se encuentran distribuidas por toda la ciudad).

Procesos de contaminación puntuales, como fugas en tanques de estaciones de servicios, no pueden ser correctamente monitoreados con la red de monitoreo del municipio, ya que estos son procesos muy puntuales que requieren redes de monitoreo específicas con una densidad de puntos de monitoreo mucho más alta.

Distribución de la red:

Como se observa en la Figura 3-98 los pozos están distribuidos sobre los cuatro conos aluviales, la zona de transición y los depósitos aluviales del Cauca. La densidad de puntos de la red se estableció siguiendo las recomendaciones del IDEAM para redes de monitoreo locales, con un punto cada km^2, aunque puede observarse que esta distribución no se aplicó para toda la ciudad. De todas maneras, dado el gradiente hidráulico en las diferentes zonas de la ciudad, y los sistemas de flujo identificados (ver sección 3.2.6), se considera que la densidad de puntos es suficiente. Además, si se compara el mapa de isopiezas elaborado a partir de la red y el elaborado con los resultados del modelo numérico que tiene una resolución mucho mayor (un valor cada

25m), se ve que el mapa elaborado con los niveles observados, es en líneas generales muy parecido al del modelo, lo que indica que con los niveles observados se pueden captar los diferentes gradientes hidráulicos en la ciudad, y las direcciones de los flujos subterráneos. Por tal motivo se concluye que de forma general en la zona urbana hay suficiente cantidad de puntos de monitoreo para conocer el comportamiento a escala urbana de los niveles y de potenciales procesos de contaminación difusa y/o regional.

Con la distribución actual de la red de monitoreo se pueden monitorear tanto zonas de recarga, como las zonas de descarga. Sin embargo, la parte alta de los conos, cerca del contacto con las formaciones terciarias y con las formaciones volcánicas, no queda bien monitoreada. En esta zona faltan puntos de monitoreo, idealmente que lleguen a tocar el basamento, y con la misma densidad que se ha usado para el resto de la red. Estos puntos podrían servir para validar los resultados del modelo numérico en esas zonas cercanas a los bordes del modelo, y también podrían ser útiles para futuros estudios sobre la potencial recarga lateral a través de las formaciones rocosas.

Dados los planes de desarrollo de la ciudad sobre la zona de expansión, y el desarrollo de otras posibles zonas en las inmediaciones de la ciudad, se recomienda aunar esfuerzos con la CVC para extender la red de monitoreo, con una distribución espacial similar a la existente en la zona urbana, desde el piedemonte hasta el río Cauca a la altura de los conos de Pance y Lili-Meléndez. Esto permitirá tener una visión general del sistema en este sector, donde diferentes actividades convergen, como la localización del botadero Navarro, la posible expansión de la ciudad, y el potencial para utilizar el acuífero para suministro de agua para la ciudad, mediante infiltración del lecho del río y/o pozos profundos.

Nivelación de la red de monitoreo:

A partir del análisis de los niveles de agua subterránea de la red de monitoreo se encontró que existen grandes inconsistencias en la nivelación topográfica de los pozos. La comparación de las cotas de los pozos se hizo con el Modelo Digital de Elevación detallado (25 m x 25m). Se encontraron diferencias de hasta 36 metros entre la cota de topografía, utilizada por el DAGMA para el análisis del sistema de flujo, y la cota del MDE.

Esto genera grandes errores cuando se realiza el análisis e interpretación de la dirección de flujo de agua subterránea. Se recomienda realizar una única campaña de nivelación topográfica y verificar la nivelación resultante con el MDE de detalle, para garantizar que no se cometen errores que inducen a malas interpretaciones sobre la dirección de flujo y los probables impactos del uso de agua subterránea.

Red de monitoreo para calidad

El análisis realizado de la calidad del agua, pone de manifiesto la necesidad de realizar el monitoreo a todos los puntos de la red de monitoreo de agua subterránea, para aquellos parámetros que son indicadores principales de contaminación como la conductividad eléctrica, los nitratos, los coliformes totales y los coliformes fecales (DQO, DBO y COT). Además, se recomienda realizar el monitoreo de otros parámetros para la zona urbana que, de acuerdo con las amenazas identificadas (ver sección 0), podrían dar información sobre procesos de contaminación relacionados con las estaciones de servicio, los cementerios y otras potenciales actividades contaminantes.

Se trata de los siguientes parámetros: ph, cloruros, nitritos, hidrocarburos aromáticos e hidrocarburos totales.

En cuanto a la frecuencia, se recomienda realizar anualmente estos análisis por lo menos dos veces al año. Con los parámetros seleccionados y la frecuencia propuesta, se podría determinar si existen zonas con tendencias al aumento en la contaminación

3.6 Zonas de recarga y descarga del acuífero

La recarga difusa por precipitación representa el agua que infiltra en el suelo y que alcanza la tabla de agua en el acuífero, sin embargo se reconoce que existen tres sistemas básicos de flujo de agua subterránea: local, intermedio y regional. Estos quedan definidos por la distancia y profundidad de recorrido del agua que lo forma, es decir, respecto al lugar específico, a la profundidad a la que el agua penetró en el acuífero, la distancia que recorrió y su punto de descarga final (Alconada et al., 2008). Así, puede ser que un sistema responda directamente a la lluvia ocurrida en el sitio específico (sistema local) o a la lluvia ocurrida en otro sitio (sistemas intermedios y regionales). Por esto, en sistemas locales el agua que se infiltra puede descargar a la superficie a distancias cortas de su origen (Figura 3-99).

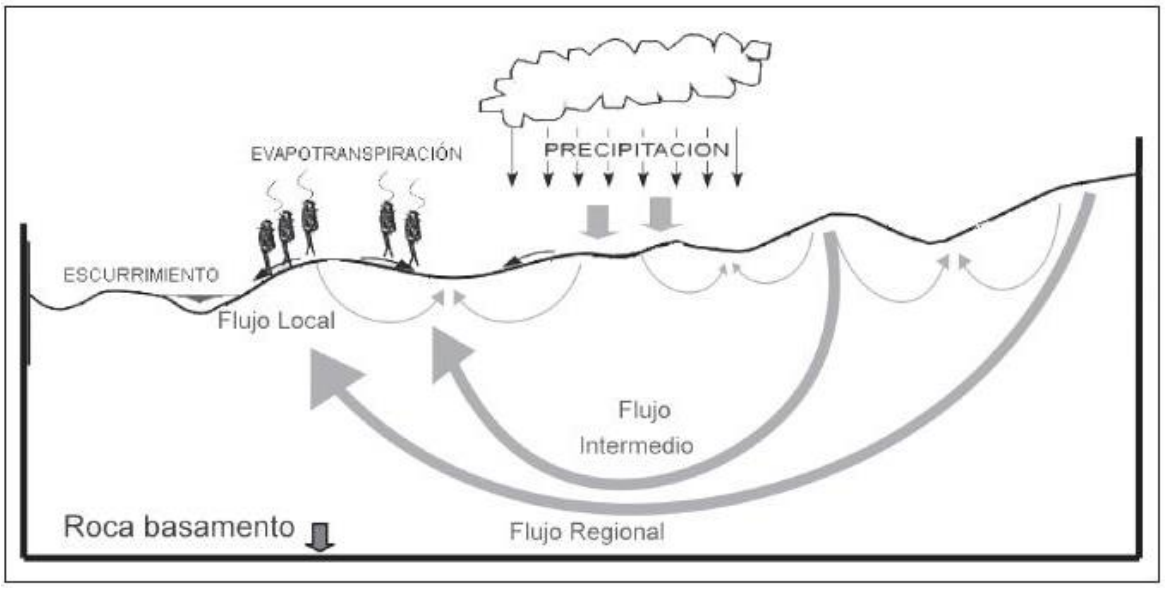


Figura 3-99 Sistemas de flujo subterráneo básicos: local, intermedio y regional. Fuente: Alconada et al., 2008.

Para la ciudad de Cali, se analizaron los flujos del agua en el acuífero a los 25 metros de profundidad, con base en la modelación numérica desarrollada y teniendo en cuenta que los niveles de agua subterránea en la ciudad están a menores profundidades en todo el acuífero. Esto permite tener una visión general del comportamiento intermedio y regional de las aguas subterráneas y así visualizar aquellas zonas donde el flujo es descendente a los 25 m de profundidad, lo que representa áreas en donde el agua se profundiza en el acuífero y entra a hacer parte de un sistema de flujo que se conecta con otras áreas de la ciudad de acuerdo a las isopiezas y direcciones de flujo.

La discretización del modelo numérico representa los primeros 25 metros de profundidad en sus tres primeras capas (Figura 3-53), flujos descendentes a esta profundidad representan

zonas de recarga del acuífero y flujos ascendentes representan zonas de descarga. La importancia de las áreas se define de acuerdo a la magnitud del flujo que se presenta.

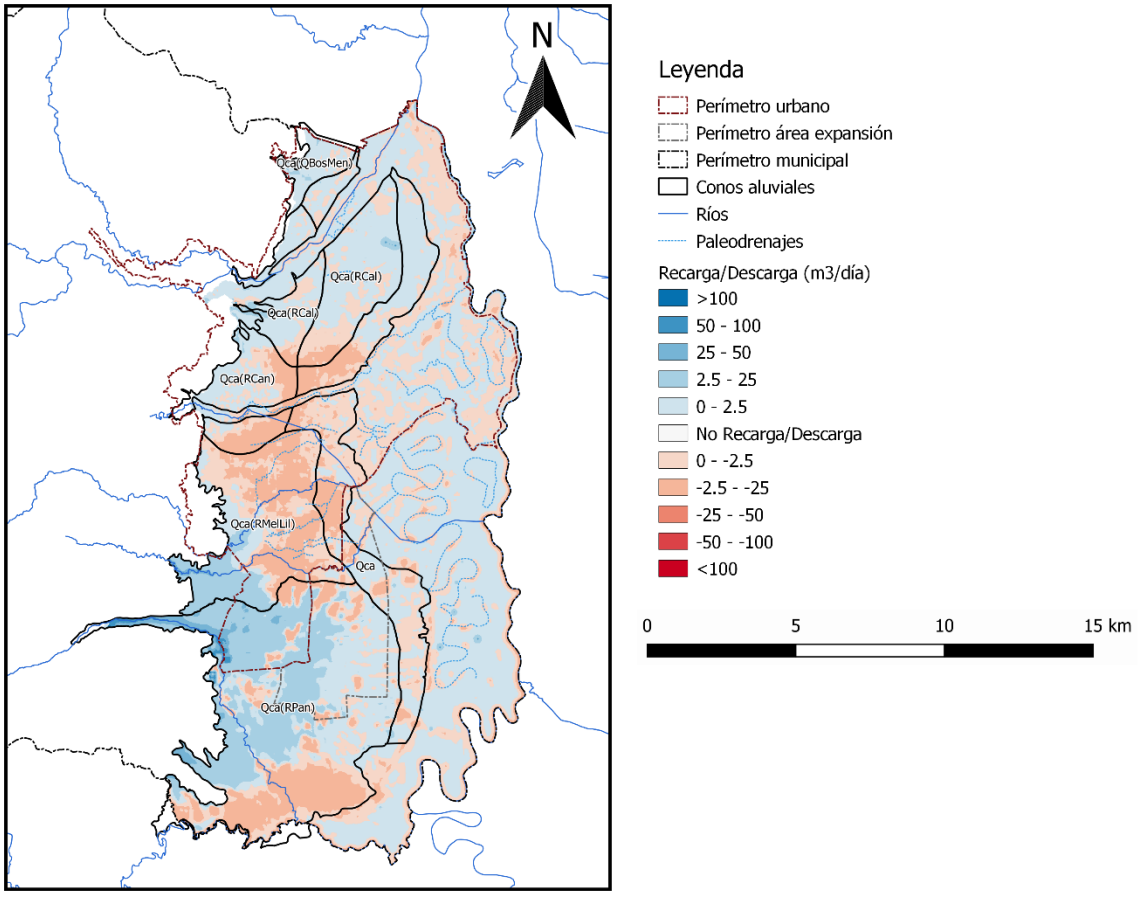


Figura 3-100 Recarga y descarga del acuífero a los 25 metros de profundidad

La Figura 3-100 representa las zonas de recarga y descarga del acuífero a los 25 metros de profundidad, en diferentes rangos del intercambio de flujo para visualizar la magnitud de los procesos. La recarga de agua subterránea está asociada principalmente a los conos aluviales. Los conos aluviales de los ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo representan principalmente zonas de descarga y no de recarga, esto asociado a los sedimentos más finos presentes en estos conos, en contraste con los conos de los ríos Cali y Pance que presentan materiales más gruesos y más favorables para la recarga. El sellamiento del suelo o impermeabilización en las zonas de alta recarga, puede afectar los procesos de recarga natural, produciendo como efecto que la mayor parte de la precipitación se convierta en escorrentía superficial o se pueda perder por evapotranspiración (Balwant et al., 2018). El cono aluvial del río Cali, a pesar de estar compuesto por materiales gruesos en contraste con los conos de los ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo, presenta valores de recarga mucho menores a los del cono del río Pance, debido a la urbanización de esta zona de la ciudad.

En la Tabla 3-22 se presenta el porcentaje del área total de recarga y la recarga total que representa cada rango, la zona que se resalta en el mapa con azules más intensos ubicada principalmente en el cono aluvial del río Pance y en menor proporción en el cono aluvial de los ríos Lili y Meléndez, representa las zonas de la ciudad donde la recarga es mayor a 2.5 m^3/día que corresponde al 20.3% de las áreas de recarga y al 86.5% de la recarga total, mientras que

las zonas en el rango entre 0 y 2.5 m^3/día (azul más claro) representan el 79.7% del área total y solo aportan el 13.5% de la recarga.

En la Tabla 3-23 se presentan las estadísticas para las áreas de descarga del acuífero, en donde se resalta el área comprendida entre los conos aluviales de los ríos Cañaveralejo, Lili y Meléndez, y el área al sur de la ciudad. Hacia el límite este de Cali se alternan zonas de recarga y de descarga, y es importante resaltar que muchas de estas áreas de descarga coinciden con madre viejas y sistemas actuales de humedales, así como también de paleodrenajes, lo que hace importante la conservación de estas áreas.

Tabla 3-22 Estadísticas de la recarga en los diferentes rangos de magnitud

Rango de recarga (m3/día)	% Área total recarga	Recarga en el rango (m3/día)	% Recarga en rango
> 100	0.02%	4928	0.9%
100 – 50	0.42%	52544	9.4%
50 – 25	1.60%	105396	18.9%
25 - 2.5	18.24%	320407	57.3%
2.5 – 0	79.73%	75653	13.5%
Total	100.00%	558928	100.0%

Tabla 3-23 Estadísticas de la descarga en los diferentes rangos de magnitud

Rango de descarga (m3/día)	% Área total descarga	Descarga en el rango (m3/día)	% Descarga en rango
0 - -2.5	67.26%	-77404	21.5%
-2.5 - -25	32.67%	-279132	77.4%
-25 - -50	0.05%	-2575	0.7%
-50 - -100	0.02%	-1391	0.4%
Total	100.00%	-360501	100.0%

Con base en lo anterior, se define inicialmente una zona prioritaria de recarga, ubicada principalmente en el cono aluvial del río Pance. La recarga en esta área representa el 82% de la recarga total del acuífero en la ciudad, y de acuerdo al sistema de flujo (Capítulo 3.2.6) alimenta el acuífero y se mueve a través de él hacia el norte hasta el paleodrenaje del río Cañaveralejo, el cual tenía su desembocadura en el sector del actual paso a Juanchito. Por esto, la recarga que ocurre en esta área es importante para gran parte de la ciudad, ya que sus aguas se dirigen a zonas donde existen pozos de agua para los diferentes usos concesionados, y hacia la zona de descarga en el este de la ciudad, donde actualmente se estudia el potencial del acuífero para el consumo humano en la ciudad de Cali, y donde existen cuerpos de agua como madreviejas y humedales que dependen de esta descarga de agua subterránea para mantener sus niveles y por consiguiente los servicios ecosistémicos que prestan.

Esta zona tiene conexiones de flujo subterráneo con gran parte de la ciudad, y debe conservarse así debido a su importancia actual y futura para Cali, por ser un recurso estratégico para la seguridad hídrica de la ciudad. La protección de esta zona debe realizarse evitando la impermeabilización de las áreas dentro de ella y evitando cualquier fuente de contaminación que pueda entrar rápidamente al acuífero y moverse a través de él hacia el norte. El cubrimiento de esta área con zonas duras produciría inicialmente una disminución en el agua que está entrando en el acuífero y posteriormente puede alterar los sistemas de flujo,

generando descargas cercanas a las áreas de recarga difusa, evitando que el agua viaje hacia otras zonas de la ciudad.

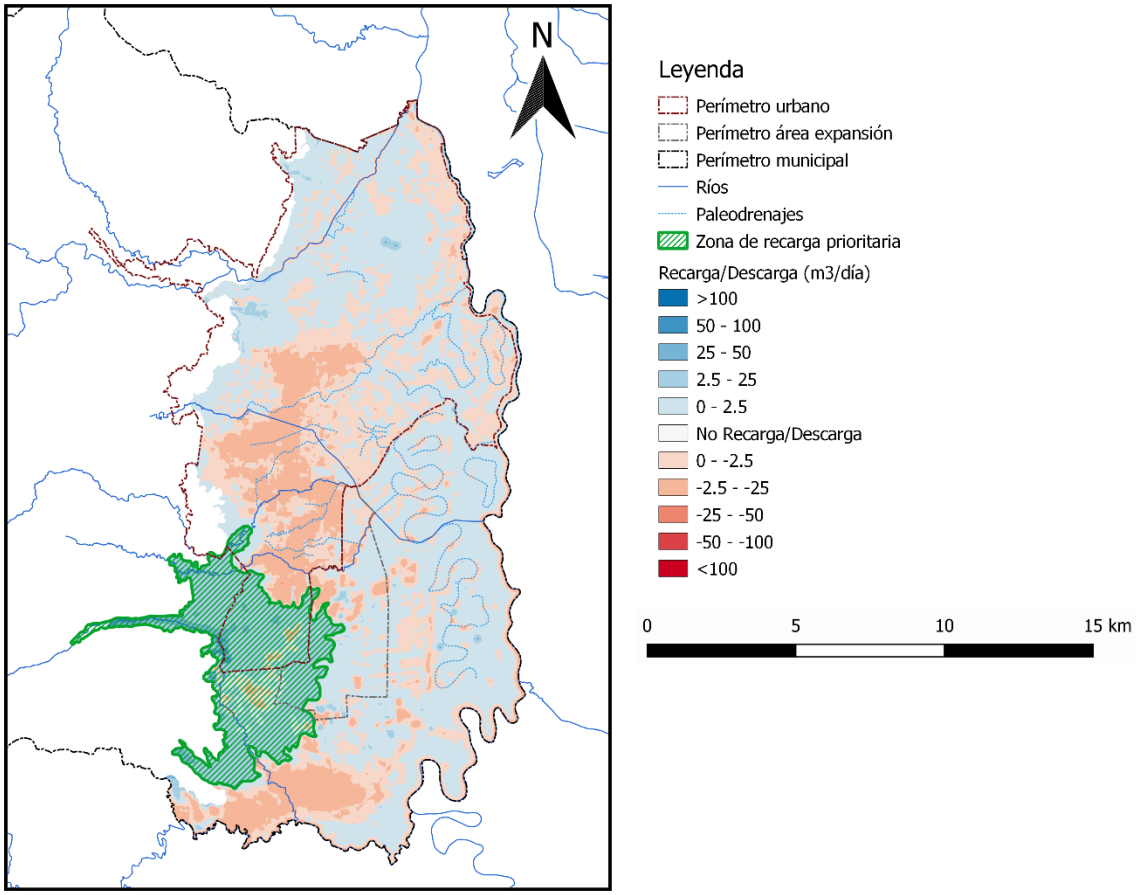


Figura 3-101 Zona de recarga prioritaria

En cuanto al cono aluvial del río Cali, como se mencionó anteriormente es un área con un gran potencial de recarga que se ha disminuido debido al efecto de la impermeabilización. Hoy en día aún representa zonas de recarga, pero con magnitudes mucho más bajas que la de la zona prioritaria de Pance. En esta área se recomienda realizar estudios más detallados en el corto plazo para la evaluación del efecto de la recuperación de zonas verdes que permitan aumentar la magnitud de la recarga al norte de la ciudad.

Finalmente, para las zonas de descarga del acuífero, se recomienda evaluar su relación con cuerpos de agua como lagunas, humedales, lagos y ríos que estén en ellas y por tanto es muy probable que tengan conexiones hidráulicas con el acuífero. En estos casos se recomienda realizar estudios detallados para evaluar el grado de conexión de estos cuerpos con el acuífero, para así protegerlos de acciones que puedan causar el descenso de niveles de agua subterránea, y por tanto una disminución del caudal base o el espejo de agua de los mismos, con las consecuentes alteraciones de los servicios ecosistémicos que pueden presentar.

En las zonas de descarga también se presentan generalmente niveles poco profundos del acuífero, por lo que es importante evaluar en detalle los efectos de las intervenciones urbanísticas en el subsuelo, ya que pueden causar alteraciones en los sistemas de flujo y afectaciones en cuerpos de agua alrededor.

3.7 Vulnerabilidad intrínseca del acuífero

El análisis de vulnerabilidad del acuífero es uno de los puntos clave del diagnóstico de las aguas subterráneas, y ayuda a prevenir o reducir los riesgos por contaminación a los que pueda estar sometido el acuífero. Teniendo en cuenta el comportamiento de las aguas subterráneas, la dificultad para ejercer alguna actividad directa sobre ellas por ser un recurso "invisible" y los posibles costos para la remediación de las aguas, la vulnerabilidad es clave para la prevención de la contaminación.

El concepto de vulnerabilidad ha sido ampliamente discutido con enfoques polifacéticos, fue introducido a finales de la década de los años sesenta por el hidrogeólogo francés Margat (1968), y se basa en la tesis de que el medio geológico y la cubierta edafológica proporcionan un cierto grado de protección de las aguas subterráneas frente a contaminantes de origen tanto natural, como derivados de actividades humanas. De acuerdo a Custodio (1994), la vulnerabilidad es una medida cualitativa o cuantitativa de la mayor o menor facilidad con la que se puede causar un perjuicio, concebido como daño, deterioro o degradación. Así entonces, la vulnerabilidad hace referencia a la susceptibilidad del sistema natural a ser afectado por una amenaza, a la sensibilidad del acuífero a una cierta acción o forma de acción y no a la naturaleza, intensidad, oportunidad o aplicación de esta acción, factores que en conjunto con la vulnerabilidad conforman el riesgo (MAVDT, 2010). Para Colombia, de acuerdo al decreto 1640 de 2012 la vulnerabilidad se define como "las características propias de un acuífero que determinan la facilidad con que un contaminante derivado de actividades antrópicas o fenómenos naturales que puedan llegar a afectarlo" (MADS, 2014).

Un mapa de vulnerabilidad es un determinante clave para establecer estrategias de protección del agua subterránea y la planificación de las actividades en el territorio y usos de la tierra. Los diferentes rangos de vulnerabilidad de un acuífero dependen de diferentes factores de acuerdo al método utilizado para el análisis, en general los componentes clave para el estudio son la profundidad del agua subterránea, el material del subsuelo que condiciona la velocidad del movimiento de las aguas, y la recarga que puede ocasionar el lavado de sustancias que pueden llegar al acuífero a través del suelo por medio de la infiltración. Dependiendo del método elegido, otros parámetros condicionantes pueden entrar en el análisis.

La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación generalmente se clasifica desde baja, media, alta, muy alta, hasta extrema. Los resultados de esta evaluación se suelen presentar en mapas temáticos, los cuales zonifican un territorio en áreas de diferente aptitud potencial para un propósito específico, es decir mapas orientados a usos u objetivos concretos. Estos resultados deben ser articulados con los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas –POMCA y los Planes de Ordenamiento Territorial –POT, para así garantizar la protección de los sistemas acuíferos (MAVDT, 2010).

Así, un estudio de vulnerabilidad sirve como orientación o guía para la planeación en general de las actividades de un territorio. Sin embargo, al planificar actividades puntuales que puedan afectar el acuífero se requieren de estudios a una mayor escala que permita el conocimiento local y una adecuada toma de decisiones. De acuerdo la guía nacional para el análisis de la vulnerabilidad intrínseca (MAVDT, 2010), las escalas de trabajo limitan la utilidad de estos mapas. Se habla de mapas orientativos para evaluaciones a nivel nacional con escalas

menores a 1:500.000 y a escala regional o departamental con escalas entre 1:100.000 y 1:250.000. Los segundos tipos de mapas son para administración o manejo, y se habla de ellos para evaluaciones locales de tipo urbano o municipal a escalas semidetalladas entre 1:25.000 y 1:50.000, o para evaluaciones locales de tipo puntual a escalas detalladas entre 1:10.000 y 1:5.000.

Las principales metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación se agrupan en cuatro tipos (MAVDT, 2010):

- Modelos de simulación: Usan ecuaciones numéricas que simulan los procesos de transporte por los que se rigen los contaminantes. Son utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad específica.

- Métodos estadísticos: Los métodos estadísticos son utilizados para cuantificar la vulnerabilidad de la contaminación del agua subterránea determinando la dependencia o la relación estadística entre la contaminación observada, las condiciones ambientales observadas que pueden o no caracterizar vulnerabilidad y las actividades relacionadas con el uso del suelo, que sean fuentes potenciales de la contaminación (p.e. uso del fertilizante y ocurrencia séptica del tanque). Una vez un modelo de esta dependencia o de la relación se ha desarrollado con análisis estadístico, la probabilidad de la contaminación puede ser evaluada. La vulnerabilidad se expresa como probabilidad de contaminación. Cuanto más alta es la probabilidad de contaminación, más alta será la vulnerabilidad.

- Métodos de superposición e índices (o paramétricos): Están basados en la combinación de diferentes parámetros (litología, suelo, espesor de la zona no saturada, etc.), y se utilizan para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca. Cada parámetro es puntuado cuantitativamente y se les pueden asignar distinto valor de ponderación para determinar el resultado final que es un índice numérico de vulnerabilidad, que es traducido a rangos cualitativos de vulnerabilidad.

- Ambientes Hidrogeológicos: Evalúan la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos en términos cualitativos, utilizando una superposición de mapas temáticos. Es aplicable cuando la información básica específica es inadecuada o escasa.

De manera general, para elaboración de mapas de vulnerabilidad intrínseca a escala nacional, departamental o urbana, se utilizan los métodos de superposición siempre y cuando se cuente con la información requerida, en caso de no existir información suficiente se recomiendan método de ambientes hidrogeológicos. Para análisis puntuales y detallados los métodos más adecuados son los modelos de simulación de contaminantes.

Los métodos paramétricos más destacados para el análisis de la vulnerabilidad intrínseca son el GOD, DRASTIC, SINTACS, EPIK y GALDIT (MAVDT, 2010). Cada método tiene sus ventajas y condicionantes para su empleo, relacionados con el sistema a analizar, el contexto en el que se encuentra y la información disponible:

- El método GOD (Foster & Hirata, 1988), es aplicable a zonas con escasa información, irregular distribución de datos o con incertidumbre en la información. Es un método muy sencillo, fácil de aplicar en una escala regional (hasta 1:100.000) debido a los bajos requerimientos de información. No considera un factor tan importante como la recarga.

- El método DRASTIC (Aller et. al, 1988) utiliza siete parámetros para la evaluación de la vulnerabilidad, que dependen del clima, el suelo, el sustrato superficial y el subterráneo. Entre las críticas al DRASTIC, se tiene que requiere una gran cantidad de variables, la dependencia entre algunas de ellas y que las ponderaciones que realiza a las mismas pueden ser cuestionable. Uno de los factores que agrega mayor incertidumbre es la recarga, con la cual no se considera un efecto de dilución, sino que solo está definida para valorar la capacidad de infiltración, que es la misma característica considerada por el parámetro de topografía.

- SINTACS (Civita et. al, 1990), es una aplicación de las características de Italia del método DRASTIC, utiliza los mismos parámetros y emplea una escala de trabajo de mayor detalle. Los retos para la aplicación de SINTACS son los mismos que para DRASTIC, por el requerimiento de la misma información.

- El método EPIK (Doerfliger et. al, 1997), es una metodología desarrollada para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos kársticos y utiliza cuatro parámetros (Epikarst, Cubierta Protectora, Infiltración y Paisaje kárstico).

- GALDIT (Chachadi & Lobo, 2005) es un método que permite la evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión marina de un acuífero. La intrusión marina es un proceso dinámico en el que el frente de agua salada avanza tierra adentro durante los períodos de menor recarga del acuífero y retrocede hacia el mar cuando la recarga aumenta. Para evaluar esta intrusión, GALDIT evalúa seis parámetros y asigna diferentes pesos que al superponerse, permiten generar un mapa de rangos de vulnerabilidad.

El método a elegir depende de la disponibilidad de información y del tipo de acuífero a evaluar, así como su contexto en el territorio. Para territorios principalmente rurales, la vulnerabilidad está asociada a riesgos de contaminación por actividades agrícolas como aplicación de sustancias agroquímicas, también se pueden encontrar riesgos por lixiviación de depósitos de basuras, o infiltraciones por tanques subterráneos industriales.

Para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos en el contexto regional del Valle del Cauca, la CVC ha considerado las características físicas del acuífero y de la zona no saturada, así que la vulnerabilidad depende básicamente de la inaccesibilidad de la zona saturada a la penetración de los contaminantes y a la capacidad de atenuación de los estratos localizados encima de la zona saturada, como resultado de los procesos físicos, químicos y biológicos (CVC, 2012). A nivel regional en Colombia se han empleado también otras metodologías para evaluar la vulnerabilidad. Para la región del Bajo Cauca Antioqueño (Rueda & Betancur, 2006) utilizaron las metodologías DRASTIC, EKv, AVI y DRASTIC-P para confrontar resultados, concluyendo que DRASTIC-P es la de mejor ajuste, siendo una variación del DRASTIC para evaluar vulnerabilidad específica.

En las ciudades, el riesgo de los acuíferos está asociado a actividades urbanas o que se encuentran predominantemente en la ciudad. En este caso, las principales amenazas que se resaltan son los tanques subterráneos para almacenamiento de combustible o de componentes requeridos por la industria, entre ellos los pasivos ambientales, y también las fugas en el sistema de alcantarillado que puede producir infiltración de aguas contaminadas por el suelo hasta alcanzar el nivel de agua del acuífero. Dentro de análisis de vulnerabilidad para ciudad, se encuentra que los métodos más utilizados son el DRASTIC y el SINTACS.

Para la ciudad de León en México, Tovar & Rodríguez (2004) utilizaron las metodologías DRASTIC y AVI para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación, permitiendo que las principales fuentes potenciales de contaminación sean incluidas en el análisis de ordenamiento territorial, definiendo áreas restrictivas para el desarrollo urbano por su alta vulnerabilidad. Por otro lado, Ramos et. al (2011) realizaron un análisis para el sistema acuífero en la zona metropolitana de la cuenca mexicana utilizando el método SINTACS, estableciendo relaciones entre los asentamientos urbanos y las características hidrogeológicas que determinan la vulnerabilidad.

Para la ciudad de Cali, existe al momento de elaboración de este análisis un mapa de vulnerabilidad incluido en el POT 2014-2027, y como parte del diagnóstico realizado en el marco del PMAA se analiza la vulnerabilidad utilizando el método DRASTIC permitiendo la comparación con el mapa anterior y generando un nuevo insumo para la planeación de la ciudad. El estudio es enfocado en la unidad A del acuífero, la más superficial, ya que es la más susceptible a actividades realizadas en el suelo o en los primeros metros de profundidad, y por tanto la que requiere un mayor enfoque de gestión en términos de protección de la calidad.

El método DRASTIC utiliza siete parámetros para su evaluación (MAVDT, 2010):

- ***D**. Profundidad del agua subterránea:* Indica el espesor de la zona no saturada que es atravesado por las aguas de infiltración y que pueden traen consigo el contaminante, hasta alcanzar el acuífero.

- ***R.** Recarga neta*: Es la cantidad de agua anual por unidad de superficie que contribuye a la alimentación del acuífero. La recarga resulta primariamente de la fracción de precipitación que no se pierde por evapotranspiración y de la escorrentía superficial. Es el principal vehículo transportador de los contaminantes.

- ***A**. Litología y estructura del medio acuífero:* Representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso o fracturado para transmitir los contaminantes.

- ***S.** Tipo de suelo*: Representa la capacidad de los suelos para oponerse a la movilización de los contaminantes y corresponde a la parte de la zona vadosa o no saturada, que se caracteriza por la actividad biológica. En conjunto, con el parámetro A, determinan la cantidad de agua de percolación que alcanza la superficie freática.

- ***T.** Topografía:* Representa la pendiente de la superficie topográfica e influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y subsuperficial.

- ***I****. Naturaleza de la zona no saturada:* Representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical.

- ***C:*** *Conductividad hidráulica del acuífero:* Determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir la velocidad.

De acuerdo con las características y el comportamiento, a cada parámetro se les asignan índices que van desde 1,0 (mínima vulnerabilidad) hasta 10,0 (máxima vulnerabilidad).

A continuación, se presentan los diferentes insumos utilizados para el análisis de vulnerabilidad para el acuífero en el área de estudio del PMAA para Santiago de Cali y su procesamiento para obtener cada uno de los siete índices que al superponerse, permiten generar el mapa de vulnerabilidad para la zona. En los mapas a seguir, los colores verdes representan índices bajos, que se traducen en vulnerabilidad baja para cada parámetro específicamente, mientras que los colores rojos representan vulnerabilidades altas. Es importante resaltar que la definición de vulnerabilidad alta en una zona determinada y para un parámetro específico no se traduce necesariamente en vulnerabilidad alta en el resultado final, los parámetros tienen diferentes pesos que influyen en el resultado final.

D – Profundidad del agua subterránea:

A partir del mapa de isopiezas generado en el capítulo de direcciones de flujo, se genera el mapa de profundidad mediante el cálculo de la diferencia con el terreno. De acuerdo a los índices para la profundidad del agua del método DRASTIC presentados en la Tabla 3-24 se genera el primer mapa insumo del análisis (Figura 3-102).

Tabla 3-24 Índices DRASTIC para la profundidad del agua subterránea

D - Profundidad (m)	Dr
0 – 1.5	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
> 30.5	1

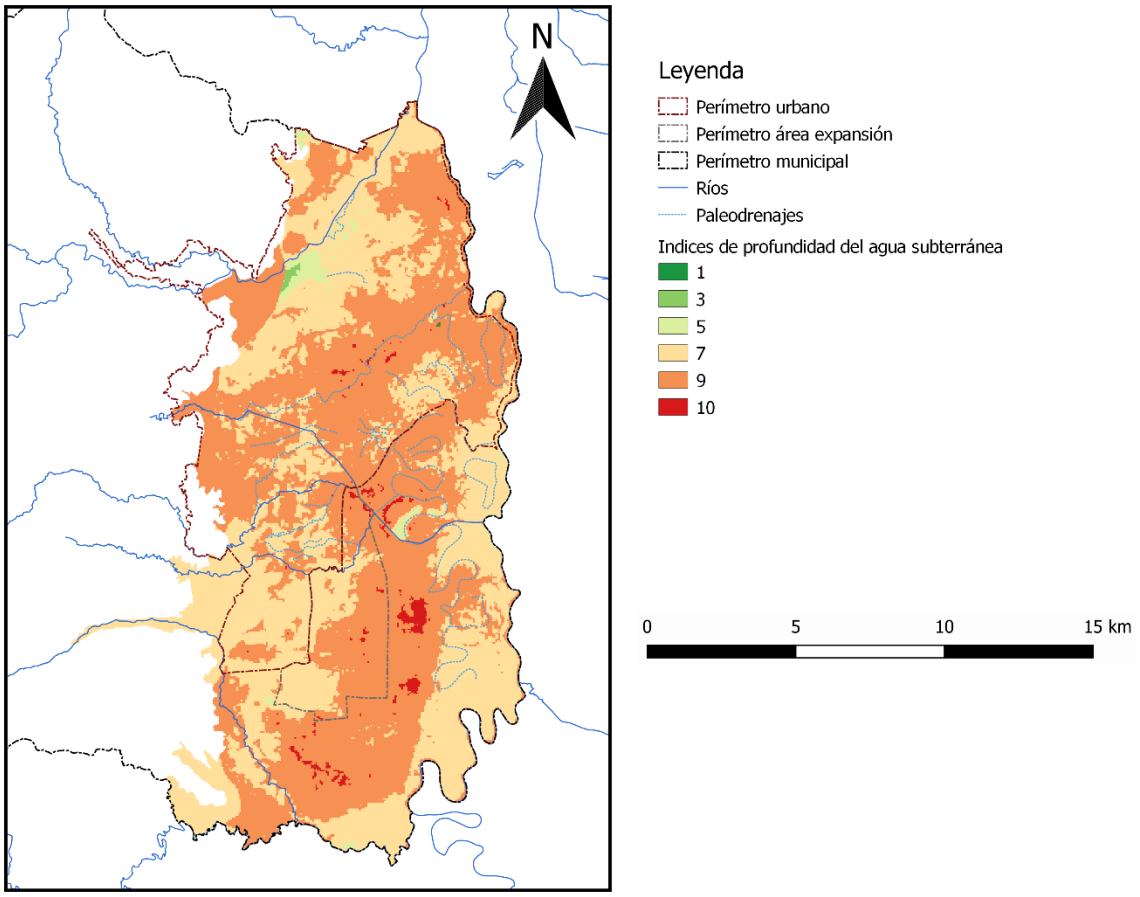


Figura 3-102 Profundidad del agua subterránea – índices DRASTIC

En Cali los niveles estáticos promedios no superan los 30 m, por lo cual no se presenta el índice de vulnerabilidad más baja. En contraste, los niveles de agua subterránea en la ciudad son poco profundos lo que se traduce en menores distancias que un contaminante debe recorrer hasta alcanzar el acuífero. En la mayor parte del área de la ciudad se presentan índices de 7 y 9, que representan profundidades entre 1.5 m y 9.1 m. Los niveles menos profundos y por tanto con mayor vulnerabilidad según este parámetro se presentan a lo largo del paleocauce del río Cañaveralejo, al este de la ciudad en el área urbana, y en la parte este de la zona de expansión.

R – Recarga difusa:

Para este parámetro se utilizó como insumo la recarga promedio para la ciudad entre los años 2007-2017 (Ver sección 3.2.5.1). Con base en la metodología DRASTIC se asignaron índices a los diferentes rangos de la recarga (Tabla 3-25).

Tabla 3-25 Índices DRASTIC para la recarga difusa

R – Recarga (mm)	Rr
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

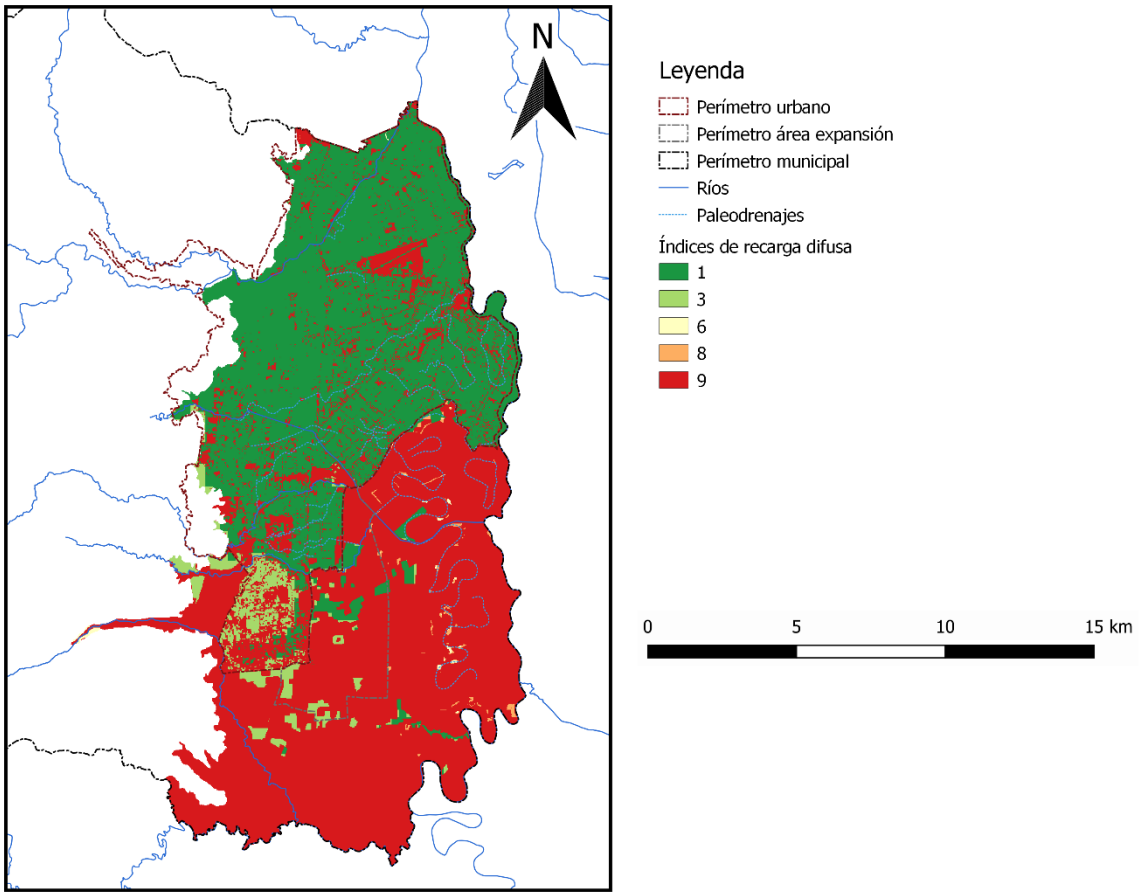


Figura 3-103 Recarga difusa – índices DRASTIC

Como se aprecia en la Figura 3-103 Recarga difusa – índices DRASTIC, hay una diferencia marcada fuertemente entre la zona urbana y la zona rural respecto a la recarga, debido a los efectos del cubrimiento de los suelos o impermeabilización. De acuerdo al método DRASTIC, el máximo rango de vulnerabilidad se asigna a valores de recarga mayores a 254 mm/año. En toda el área rural (excepto en pequeñas zonas que han sido impermeabilizadas), los valores de recarga difusa superan este umbral, por lo cual el índice que prevalece es el máximo (9).

Por otro lado los efectos de la cobertura de suelos con zonas duras en el área urbana se ven en una disminución de la recarga con valores menores a 50 mm/año, representado por el índice 1.

A – Material del acuífero:

Los materiales del acuífero fueron definidos a partir de las conductividades hidráulicas estimadas para la zona saturada y que también fueron utilizados para la modelación de aguas subterráneas (Ver índice de conductividad hidráulica para DRASTIC).

De acuerdo a la equivalencia entre las conductividades hidráulicas y los diferentes materiales que se encuentran en el subsuelo, se generaron los índices para los materiales del acuífero utilizados en el método para la estimación de la vulnerabilidad (Tabla 3-26).

Tabla 3-26 Índices DRASTIC para las litologías (zona saturada, zona no saturada y suelos)

A – Material predominante en el acuífero	Ar
Arcilla	1
Arcilla con Limo	2
Limo con Arcilla	2
Arcilla con Arena	3
Limo	3
Basamento meteorizado	3
Limo con Arena	4
Conglomerados	5
Turba	5
Caliche	6
Arena con Limo	6
Arena con Arcilla	6
Arena	8
Gravas	9
Cantos	9

S – Suelos:

Actualmente para la ciudad de Cali no existe un mapa detallado de clasificación del suelo de acuerdo a sus materiales, o de los materiales predominantes ubicados justo debajo de las zonas duras. Existe un mapa de suelos del año 2004 que contiene polígonos de asociaciones de acuerdo a la taxonomía. Por esto se recomienda en el corto plazo realizar el levantamiento de este mapa a una escala detallada, ya que de estas propiedades depende el comportamiento de la parte superficial del acuífero y es la primera zona que define la capacidad de infiltración de las aguas en el suelo y subsecuentemente en el acuífero.

Para efectos de este análisis, los índices para los suelos se estimaron de acuerdo a los materiales predominantes entre la superficie y 1 m de profundidad en las columnas litológicas de pozos y de los estudios de suelos para obras urbanísticas.

La predominancia litológica de los suelos y de la zona no saturada se estimó utilizando como insumo las columnas litológicas de los pozos y estudios de suelo para obras urbanísticas que se digitalizaron durante la fase de aprestamiento. A los materiales encontrados se asignaron índices de acuerdo a la Tabla 3-26. Estos índices fueron asignados de acuerdo al conocimiento de expertos, con base en las clases de litología digitalizadas para los pozos en la ciudad de Cali, y teniendo en cuenta las equivalencias con las clases y lo índices propuestos en la metodología original DRASTIC (MAVDT, 2010). A continuación los índices se ponderaron de acuerdo al espesor de cada uno de ellos en las columnas.

Estos valores de índices ponderados fueron escalados con el mapa de suelos disponible (Figura 3-105), y a cada polígono se asignó un índice de acuerdo a la predominancia de los valores encontrados en las columnas. Posteriormente y para generar el mapa final, estos índices sólo se tomaron para las áreas verdes, que no están impermeabilizadas. A las áreas

impermeables se les asignó un valor de 1 que representa el índice de menor vulnerabilidad para este parámetro (Figura 3-105).

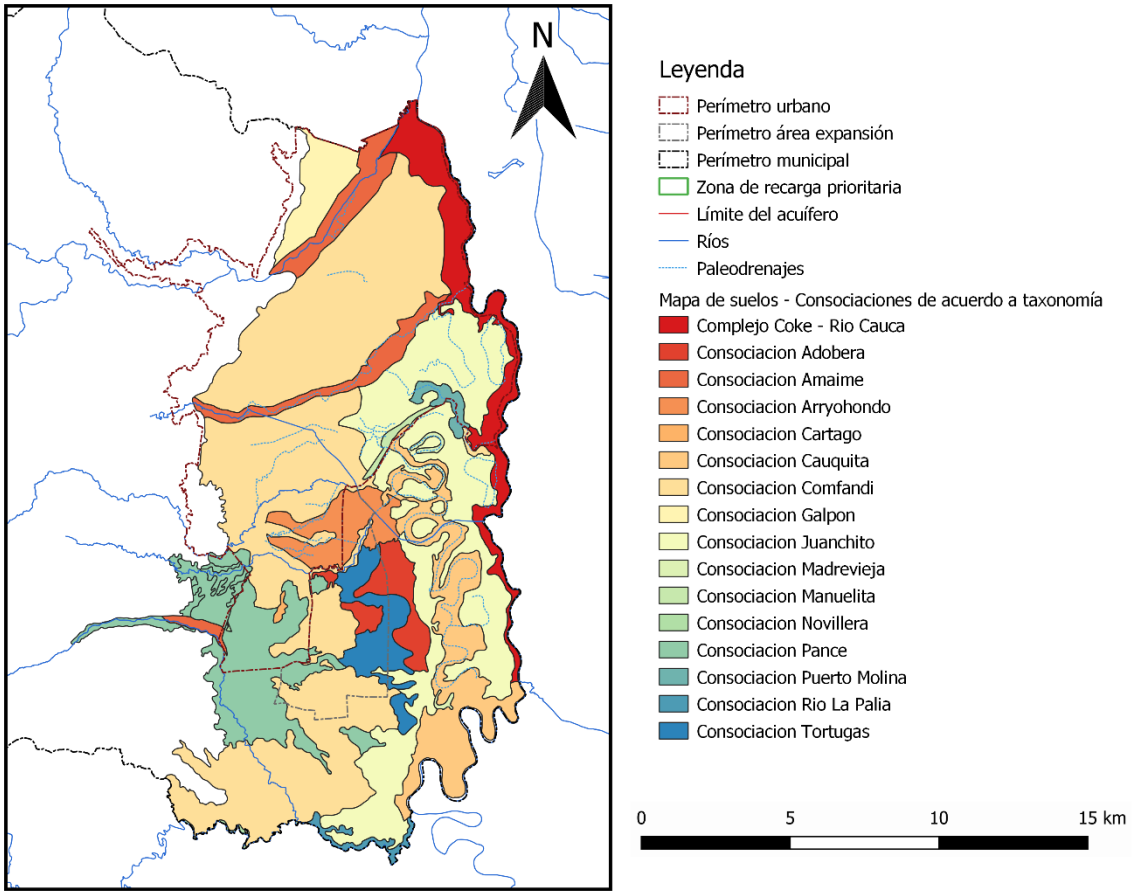


Figura 3-104 Mapa de suelos para Cali - Consociaciones

Los índices para los suelos en la ciudad de Cali son todos menores a 5, debido a la ausencia de materiales gruesos en el primer metro de profundidad del subsuelo. Esto se debe principalmente al depósito de sedimentos de los ríos de la ciudad en el acuífero, donde los materiales más gruesos se encuentran más profundos y las partes más superficiales están compuestas de los materiales más finos y recientes.

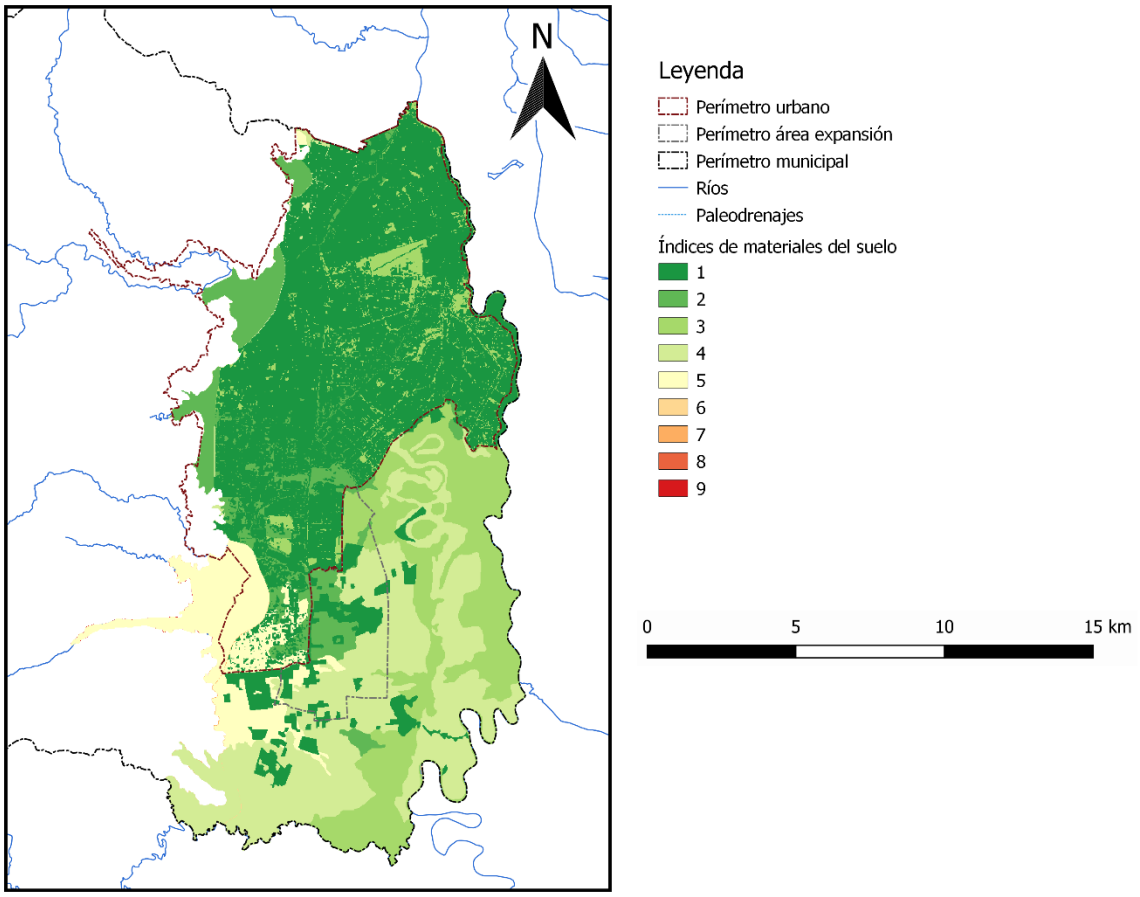


Figura 3-105 Suelos – índices DRASTIC

T – Topografía:

Los índices de topografía se generaron utilizando el modelo digital de elevación detallado para la ciudad. A partir de este se generó un mapa de pendientes que fue posteriormente traducido a un mapa de índices de acuerdo a la Tabla 3-27.

Tabla 3-27 Índices DRASTIC para la topografía

T – Topografía como pendiente (%)	Tr
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

El mapa de índices de topografía (Figura 3-105) muestra predominancia de índices altos para la vulnerabilidad debido a que gran parte del terreno es plana. Sin embargo, el parámetro de topografía es uno de los que menos peso tiene en la ponderación para generar el mapa de vulnerabilidad final de DRASTIC.

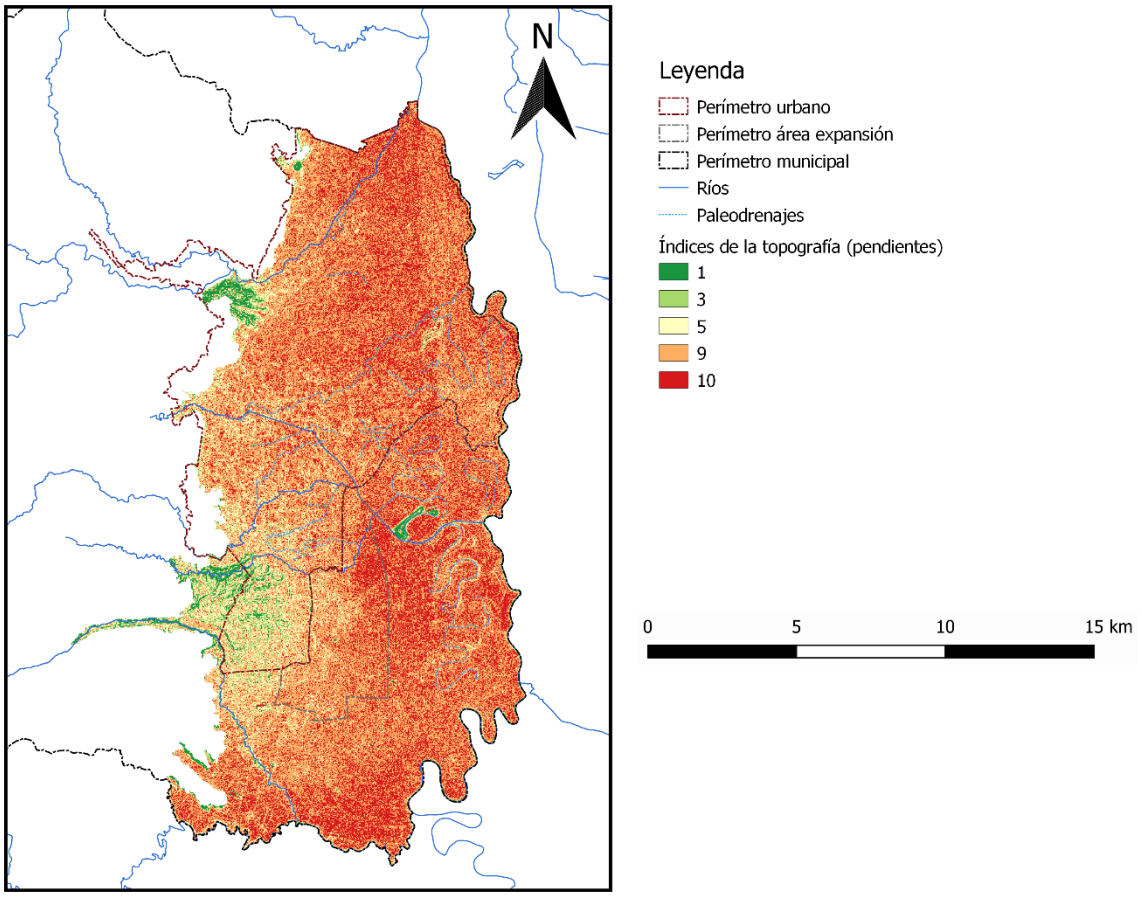


Figura 3-106 Topografía como pendientes en el terreno – índices DRASTIC

I – Material de la zona no saturada:

Para estimar la predominancia de materiales de la zona no saturada se utilizaron las equivalencias entre materiales e índices presentadas en la Tabla 3-26, de la misma manera que se emplearon para estimar la predominancia de materiales en el suelo. En este caso, se estimó la predominancia de materiales encontrados en las columnas entre la superficie del terreno y el nivel del agua subterránea, que representa la zona no saturada.

Los materiales predominantes estimados en cada punto fueron interpolados y se presentan en la Figura 3-107. Los conos aluviales de los ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo presentan los índices más bajos debido a que en estas zonas se presentan materiales más finos, las otras áreas del acuífero presentan índices más altos. El área ubicada en el cono aluvial de Pance presenta los índices más altos debido a la presencia de materiales más gruesos en la misma.

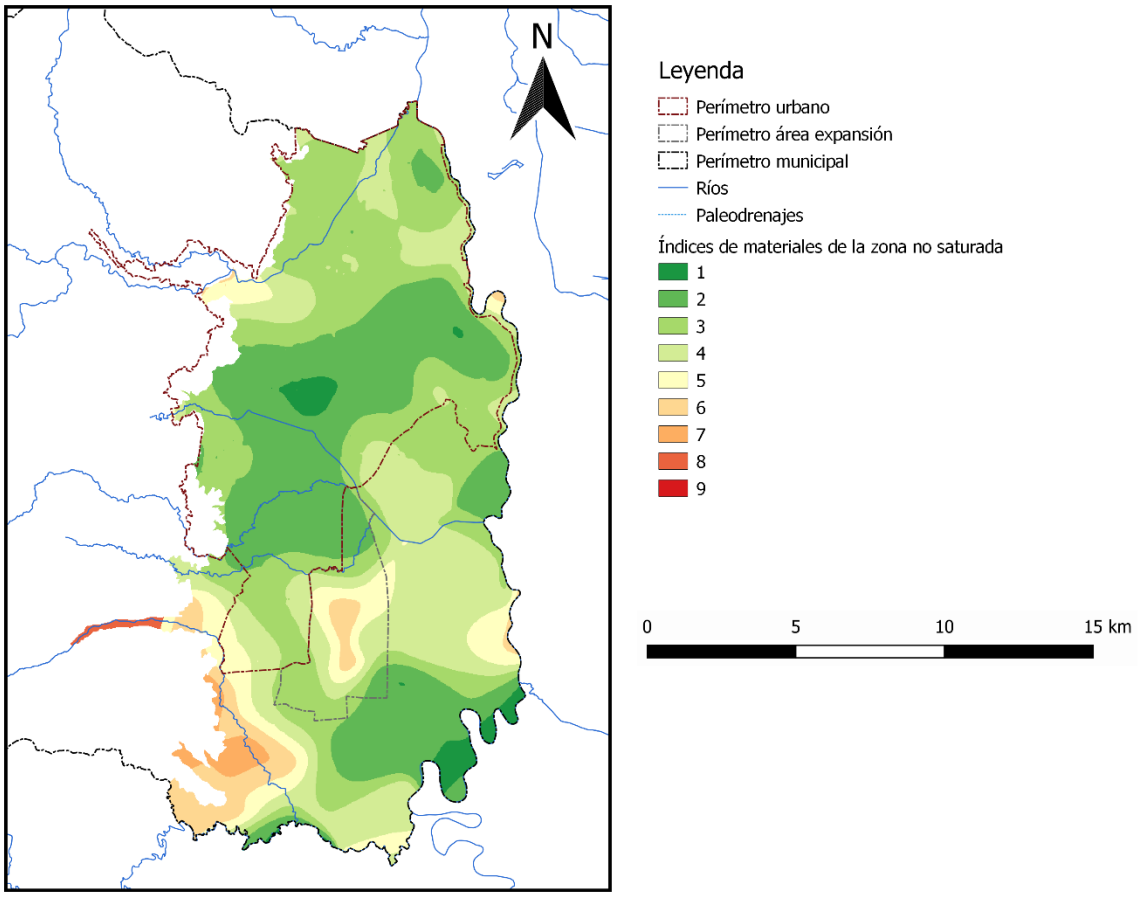


Figura 3-107 Materiales de la zona no saturada – índices DRASTIC

C - Conductividad hidráulica del acuífero:

Las conductividades hidráulicas del acuífero para la unidad A (Figura 3-25) fueron generadas mediante el cálculo de la conductividad equivalente a partir de los cuatro mapas generados para el modelo numérico. La descripción del cálculo se encuentra en la sección 3.2.3.2.2.

A partir de estos valores de conductividades, se asignan índices de acuerdo a los rangos propuestos por la metodología DRASTIC (Tabla 3-28).

Tabla 3-28 Índices DRASTIC para la conductividad hidráulica

C - Conductividad Hidráulica (m/día)	Cr
0.04 – 4.08	1
4.08 – 12.22	2
12.22 – 28.55	3
28.55 – 40.75	6
40.75 – 81.49	8
> 81.49	10

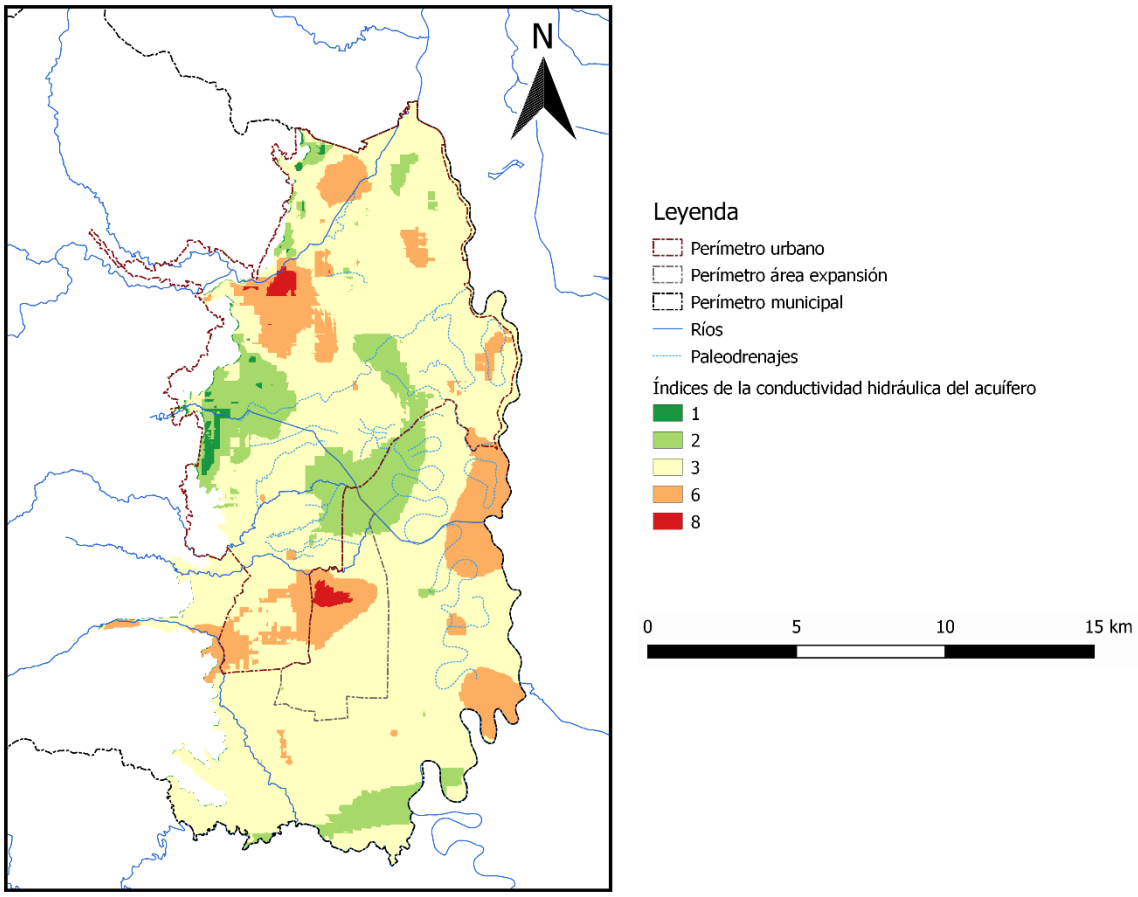


Figura 3-108 Conductividad hidráulica del acuífero – índices DRASTIC

En la Figura 3-108 se presentan los índices DRASTIC para la conductividad hidráulica del acuífero. Hacia el norte cerca al río Cali y en la zona de expansión se encuentran dos zonas pequeñas con índices altos de 8, alrededor de estas zonas, en el cono aluvial del río Pance y hacia el este de la ciudad se presentan algunas zonas con índices de 6, y la mayor parte del acuífero está representada por índices de 1, 2, y 3 que representan conductividades entre 0.04 m/día y 28.58 m/día.

Mapa de Vulnerabilidad (DRASTIC):

Finalmente, los siete mapas diferentes generados se cruzan utilizando los factores de ponderación presentados en la Tabla 3-29. Los parámetros de profundidad (D), recarga (R) y material de la zona no saturada (I) son predominantes en el resultado final ya que en conjunto representan el 61% del peso total para estimar la vulnerabilidad. Los parámetros de suelos y topografía representan solo el 13% del total, por lo que no tienen efectos predominantes en el resultado final.

Tabla 3-29 Factores de ponderación de los diferentes parámetros del método DRASTIC

D	R	A	S	T	I	C
5	4	3	2	1	5	3

En la Figura 3-109 se presenta el resultado final del análisis de vulnerabilidad empleando el método DRASTIC. La unidad A del acuífero en Cali tiene grados de vulnerabilidad baja, moderada y alta. La parte alta del cono aluvial del río Pance, la zona sur del municipio, el área de expansión y la zona rural presentan grados de vulnerabilidad alto por lo que requieren mayor protección para evitar contaminantes en el subsuelo o aplicados en el suelo que puedan llegar al acuífero.

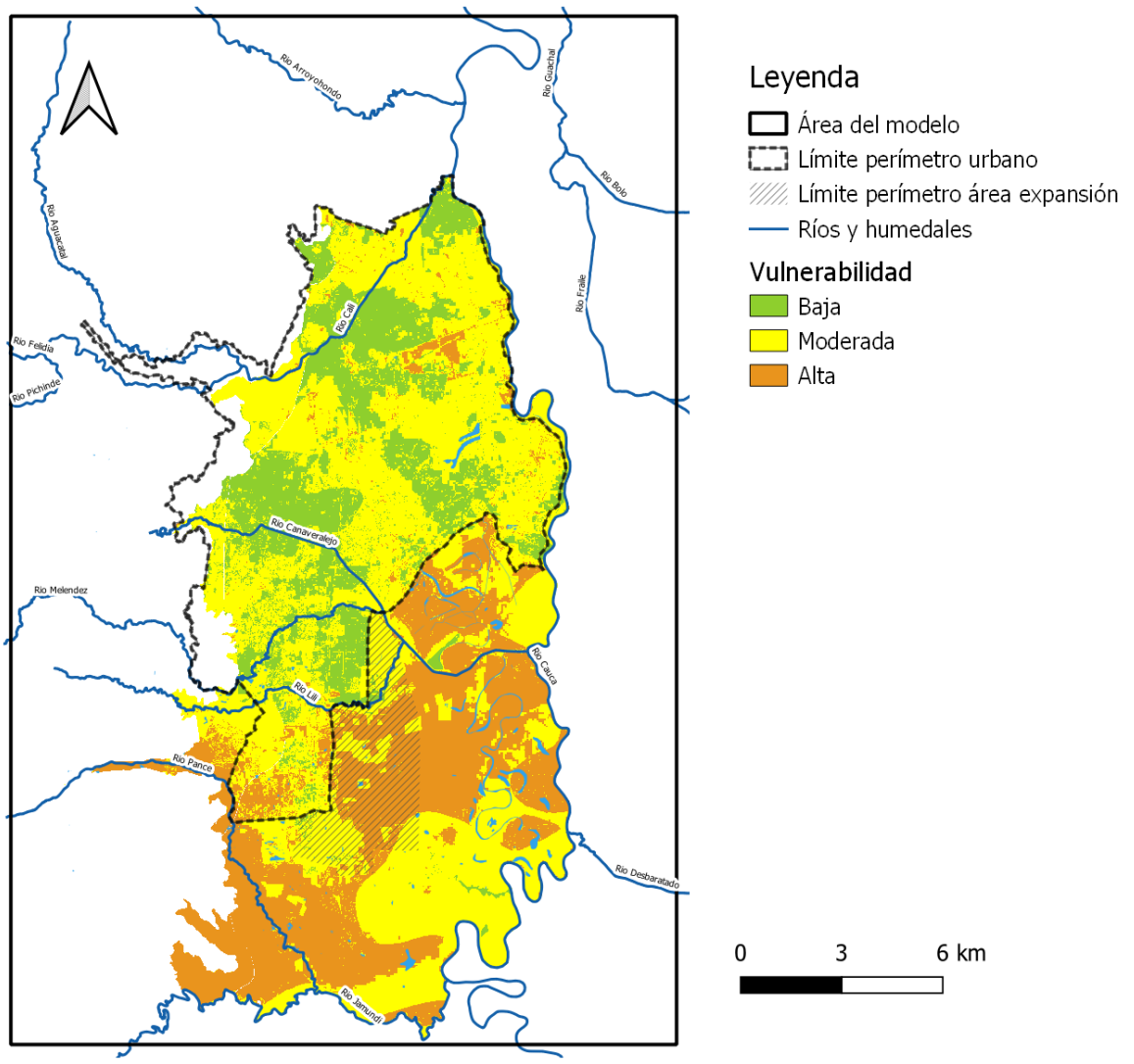


Figura 3-109 Vulnerabilidad en el acuífero de Santiago de Cali

4 Diagnóstico Participativo

El objetivo del diagnóstico participativo es socializar con los actores los avances de la fase de aprestamiento y del diagnóstico técnico, y recoger las expectativas de los mismos hacia el plan de manejo, así como su percepción de las problemáticas relacionadas con el acuífero y con el recurso hídrico subterráneo.

Para alcanzar el objetivo planteado, el diagnóstico participativo se llevó a cabo a través de una serie de jornadas y talleres participativos con los actores sociales y con profesionales del DAGMA.

En esta sección se resume la metodología y los resultados obtenidos de los tres tipos de talleres que se llevaron a cabo:

- Talleres participativos con los actores: Varios talleres con los actores sociales en los cuales se socializaron los avances de aprestamiento y del diagnóstico técnico. En estos talleres además se buscó transferir a los actores las nociones básicas sobre hidrogeología y el manejo de las aguas subterráneas. Además, se trabajó con los actores para identificar las principales amenazas y problemáticas relacionadas con el acuífero y la calidad y cantidad del agua subterránea.

- Salidas de campo: Se efectuaron con los actores a puntos relevantes de la ciudad de Santiago de Cali para profundizar en los temas de aguas subterráneas que se trataron durante los talleres participativos.

- Talleres con grupos multidisciplinarios del DAGMA: Correspondierosn a jornadas de trabajo con los profesionales del DAGMA, para identificar las amenazas y problemáticas relacionadas con la gestión del agua subterránea, con el acuífero y con la calidad y cantidad del agua subterránea. Además de identificar las amenazas, se identificaron sus causas y sus impactos socioeconómicos y ambientales. En estos talleres además se recogió información para llevar a cabo un análisis de gobernanza y capacidad institucional para así identificar las amenazas que afectan la institucionalidad del DAGMA, pero también identificar sus fortalezas, oportunidades y debilidades.

Como parte del diagnóstico participativo también se trabajó en las herramientas de comunicación para hacer llegar los avances e importancia del PMAA a los ciudadanos de Santiago de Cali. En la sección 4.5 se describen las herramientas de comunicación implementadas.

4.1 Talleres participativos con los actores

El objetivo de estos talleres fue socializar los avances del PMAA, establecer un diálogo de saberes con los actores para ofrecerles nociones básicas sobre las aguas subterráneas, y recibir su conocimiento sobre el tema, e identificar las amenazas con el acuífero y el recurso hídrico subterráneo.

4.1.1 Metodología

El proceso metodológico para las jornadas de diagnóstico participativo se fundamentó en dos actividades: 1) talleres de nivelación y de identificación de amenazas que se describen en este

apartado, y 2) salidas de campo que sirvieron para complementar y enriquecer los diferentes temas abordados con los actores sociales, y que se describen en el apartado 4.3.

La Figura 4-1 presenta el proceso metodológico llevado a cabo para la realización de los talleres.

Figura 4-1 Proceso metodológico jornadas de diagnóstico.

Con el objetivo de hacer de los espacios de encuentro un diálogo de saberes que contribuya a la construcción del PMAA, se realizaron ajustes en la distribución de los grupos de actores. Dichos ajustes se fundamentaron en la organización y distribución de los actores sociales, que se realizó teniendo en cuenta elementos tales como: identificación, descripción, rol, organización, tipo de actor y asistencia a las jornadas anteriores en la fase de aprestamiento. De este modo, se consiguió consolidar un grupo de participantes activos e interesados en la construcción del PMAA del municipio de Santiago de Cali.

Teniendo en cuenta el ejercicio señalado anteriormente, se realizaron cinco jornadas de encuentro para llevar a cabo el diagnóstico participativo considerando las siguientes características:

- Realizar grupos poco numerosos, ya que permite una interacción cercana con cada uno de los participantes, mayor flujo de información y manejo adecuado del grupo.

- Establecer grupos de actores de forma estratégica; teniendo en cuenta su rol, actividad, experticia y relación con el recurso.

Bajo el precepto anterior, se conformaron cinco grupos de actores:

Grupo No. 1: Sector de servicios.
Grupo No. 2: Sector de Servicios (el sector servicios se dividió en dos grupos).
Grupo No. 3: Sectores comercial, comunitario y SIGAG.
Grupo No. 4: Sectores construcción e industrial.
Grupo No. 5: Sectores académico, institucional, SIGAC y gremios.

A continuación se describen las dos modalidades de encuentro:

Modalidad Taller:
La integraron actores de los sectores de servicios, comunitarios, comercial y SIGAC. Los temas tratados fueron amenazas, vulnerabilidad y riesgos al acuífero de la zona urbana del municipio de Santiago de Cali, y se denominó jornadas de "Profundización y construcción de conocimientos". Cabe resaltar que dichos ejes temáticos fueron solicitados en la fase de aprestamiento por los actores como temas a profundizar. Para este grupo de actores, se plantearon herramientas pedagógicas como: imágenes, video, ubicación cartográfica, y maquetas entre otras técnicas. Todas ellas ayudaron a que la información presentada fuera interiorizada y que los aportes de los actores fueran significativos y productivos.

El objetivo del taller fue enriquecer el diagnóstico del PMAA, a través del diálogo de saberes con los diferentes grupos de actores sociales, y de este modo identificar de manera conjunta amenazas y riesgos relacionados con las aguas subterráneas.

Modalidad Mesa de Trabajo:
Integrada por actores de los sectores académico, institucional y gremios, y teniendo en cuenta el perfil y el amplio conocimiento de estos actores en aguas subterráneas, se planteó una presentación técnica de los avances del proyecto denominada, "Retos y necesidades para el manejo de las aguas subterráneas en la ciudad de Cali". Pese a ser una presentación fundamentada en aspectos técnicos, la dinámica de la jornada integró la participación de los actores durante la presentación, y creó espacios para recoger el conocimiento de los actores en relación al recurso hídrico subterráneo. De este modo, se recolectó información relevante sobre amenazas y problemáticas relacionadas con el acuífero y los recursos hídricos subterráneos.
El objetivo de la mesa de trabajo era identificar necesidades y aportes en torno al conocimiento y gestión de las aguas subterráneas, e identificar amenazas y problemáticas relacionadas con las aguas subterráneas.

Es importante mencionar, que, de forma paralela a la elaboración de la estructura del taller y la mesa de trabajo, el equipo de comunicaciones del PMAA, realizó gestiones en la elaboración y entrega de las convocatorias. Se elaboraron dos protocolos (uno para el Taller y el otro para la Mesa de trabajo) que sirven de guía a los facilitadores en el cumplimiento de los objetivos propuestos y tiempos definidos para cada jornada, intervención de los facilitadores, temática a desarrollar, descripción de la actividades, aspectos metodológicos a tener en cuenta durante la ejecución de la jornada, entre otros.

4.1.2 Resultados de los talleres participativos: Amenazas identificadas por los diferentes grupos de actores sociales

En los talleres se organizaron grupos de trabajo para la identificación de amenazas sobre un mapa del municipio de Santiago de Cali, dichos grupos se distribuyeron estratégicamente, de

modo que los conocimientos para la identificación de las amenazas fueran enriquecidos con distintas perspectivas.

El ejercicio evidenció el conocimiento y la relación que han construido en torno al recurso hídrico subterráneo, y que es necesario buscar espacios de encuentro en donde los diferentes conocimientos permitan hacer una lectura acertada de la realidad y más aún, si el tema como lo manifiestan los actores sociales es poco conocido.

A continuación, se presenta el resultado del análisis del ejercicio de identificación de amenazas.

1) Se generó un mapa de la identificación de amenazas realizado por los actores sociales (Figura 4-2).

2) Se identificaron un total de 106 amenazas, siendo los procesos de contaminación la que mayor presencia tiene según los actores.

3) Si bien el ejercicio contemplaba las amenazas para la zona urbana de Cali, los actores sociales identificaron 50 amenazas (contaminación, construcción, deforestación, minería y otros) en la zona rural del municipio de Santiago de Cali.

4) En la comuna 10 se identificó solo una amenaza relacionada con inundación, siendo la comuna con menos amenazas identificadas.

5) En la comuna 19, se identificaron el mayor número de amenazas: siete amenazas por contaminación, una amenaza por deforestación, otra por construcción y finalmente una por inundación.

6) En la comuna 2 se identificaron el mayor número de amenazas por construcción, la zona rural de Cali es donde se presenta la mayor problemática relacionada con la construcción (expansión y unidades habitacionales) con trece amenazas.

7) En las comunas 19, 20 y 8 se registraron amenazas por deforestación, nuevamente la zona rural tiene el mayor porcentaje, dónde se identificaron nueve puntos relacionados con deforestación.

8) En las comunas 13 y 2 se identificaron amenazas por minería, la zona rural de Cali tiene el mayor porcentaje, dónde se identificaron nueve amenazas por minería.

9) En las comunas en las que se identificaron amenazas por inundación son: comuna 22, 6, 21, 10, 19 y 3.

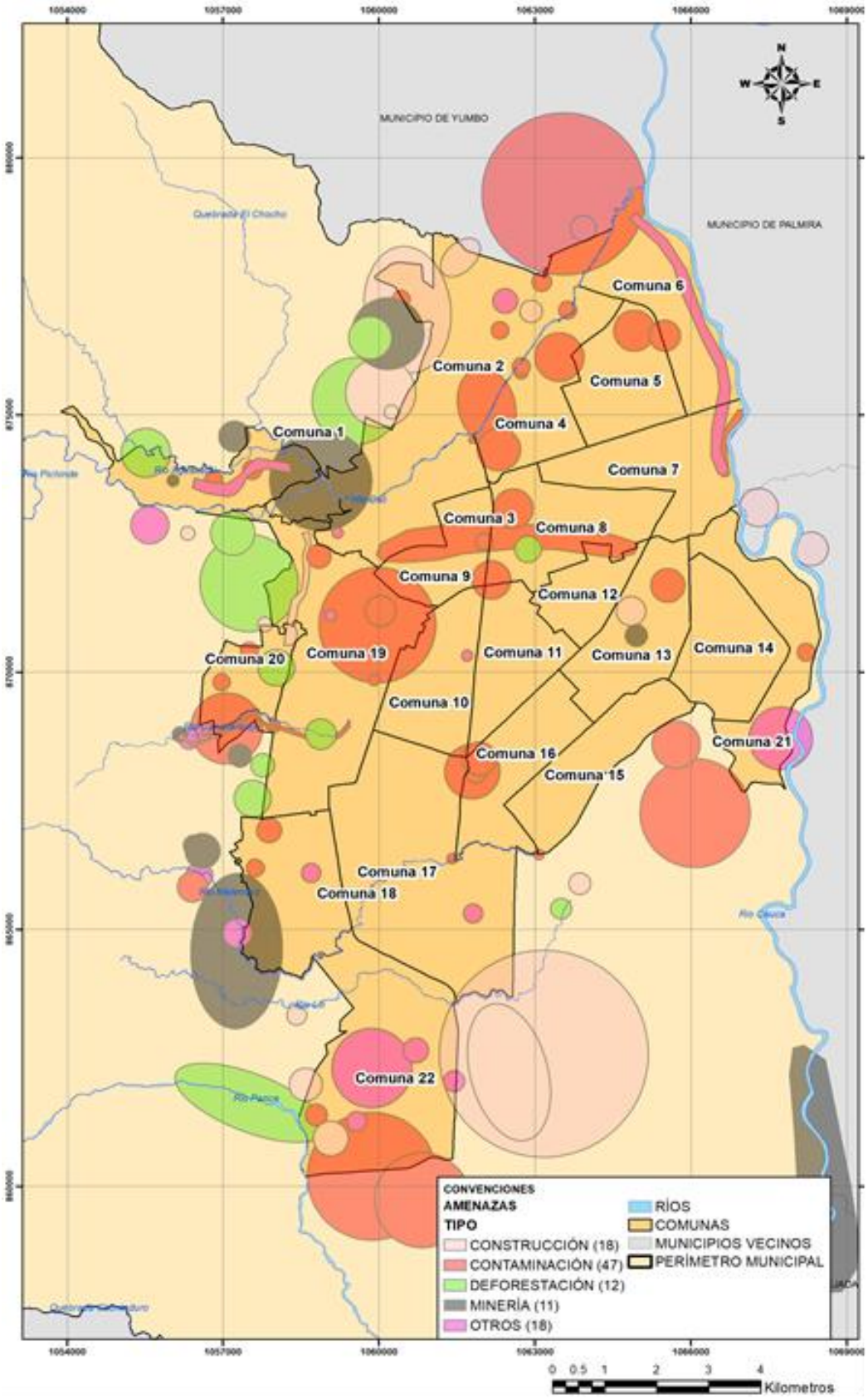


Figura 4-2 Mapa de amenazas identificadas por los actores sociales

4.1.3 Reflexiones de los actores resultado de los talleres participativos y de las salidas de campo

Aspectos culturales y cultura del agua

El análisis realizado por parte de los actores sociales sobre los aspectos culturales y cultura del agua, revela que los seres humanos desarrollamos prácticas cotidianas que son potencialmente contaminantes para el acuífero, y que dichas prácticas con el paso del tiempo se van generalizando y haciendo cada vez más comunes, pues como lo plantearon los actores sociales, existe un desconocimiento profundo relacionado con el recurso hídrico subterráneo, su existencia, control, manejo y aprovechamiento sostenible.

Por otro lado, los actores sociales en sus intervenciones enfatizaron en la necesidad de tener conocimiento básico y técnico en aguas subterráneas, ya que antes de la construcción de un pozo o aljibe es importante estudiar si se tienen cercanos pozos sépticos que puedan ocasionar contaminación microbiológica. Además, mencionaron la necesidad de planeación orientada al uso racional del recurso hidrico subterraneo, para evitar el posible desabastecimiento. De esta manera, es importante que las generaciones futuras cuenten con claridades conceptuales, técnicas y prácticas que seguramente harán que el manejo y aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo mejore ostensiblemente.

Otro factor a analizar, es la reflexión que realizaron los actores sociales desde la perspectiva económica y de normatividad, pues en sus intervenciones expresaron que obtener el recurso hídrico subterráneo tiene un costo económico elevado, que se incrementa cuando se llevan a cabo actividades infructuosas para la búsqueda del recurso, debido a la carencia de conocimientos en la normativa, aspectos técnicos o datos de referencia como información secundaria que permita una lectura real y actual del lugar en donde se pretende aprovechar el recurso.

Finalmente, es importante resaltar que las diferentes percepciones de los actores sociales frente al conocimiento de aguas subterráneas, acuífero, contaminantes, prácticas inadecuadas, cultura de los beneficiarios en torno al manejo y protección del recurso, entre otras, fueron abordadas a través de ejercicios con imágenes al inicio del encuentro participativo en la fase de diagnóstico, dejando como resultado diversas opiniones de los participantes que permitieron realizar los análisis expuestos anteriormente, a su vez, develaron que los actores sociales lograron identificar algunos tipos de contaminación (químicos, fertilizantes, textiles, desechos de la zona urbana), y los relacionaron con los conceptos aportados en la presentación del facilitador, tales como: amenazas por desabastecimiento, amenazas por contaminación, riesgos y zonas de recarga fueron evidentes y manejados de la mejor manera en sus intervenciones.

Gobernanza y capacidad institucional

En relación a la gobernanza y capacidad institucional, los actores sociales expresaron una serie de necesidades y aportes que evidenciaron en primer lugar, debilidades tales como: falta de articulación entre planes e instrumentos, pérdida de credibilidad a causa de la debilidad en el control y los procesos inherentes a la autoridad ambiental, falta de cooperación interinstitucional causada por un débil canal de comunicación, gestión inadecuada e insuficiente de los recursos hídricos más allá de un débil proceso de liderazgo, los actores sociales refieren que se debe realizar una actualización de la información y normatividad en aguas subterráneas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se deben incorporar a las actividades procesos reales de planes de acción interinstitucionales de manera permanente y continua, mejorar la conexión entre los actores con soporte legal y un reforzamiento educativo que permita el buen manejo de las aguas subterráneas por parte de los diferentes actores sociales.

Por otro lado, los actores sociales evidenciaron que la carencia de personal calificado y rotación de contratistas genera pérdida de conocimiento histórico y de memoria institucional, así mismo los actores sociales identificaron que no se evidencia el interés de nuevas generaciones por prepararse técnica o profesionalmente en temas relacionados con las aguas subterráneas, lo cual dificulta el relevo generacional para afrontar las problemáticas que surjan en torno al acuífero.

El análisis también revela que los actores sociales identificaron poco interés en la asignación de recursos para profundizar en el tema de aguas subterráneas y ausencia de desarrollo tecnológico. De esta manera, la capacidad institucional se ve limitada y afectada, reflejando ciertas dificultades para dar cumplimiento a las obligaciones normativas, trámites interinstitucionales y respuestas efectivas a los usuarios.

Finalmente, el análisis evidencia la necesidad de fortalecer la gobernanza y la capacidad institucional, desarrollando acciones que permitan la generación e intercambio de información para la toma de decisiones de todos los actores involucrados, de una manera transparente, adecuada y oportuna. Impulsar procesos de participación y articulación con entes territoriales locales, regionales y nacionales, actores del sector privado y de la sociedad civil.

4.2 Salidas de campo

Teniendo en cuenta los resultados de las jornadas de Diagnostico Participativo durante los días 12, 13, 19 y 20 de marzo de 2019 con los actores sociales identificados en la fase de aprestamiento; y con el objetivo de enriquecer las temáticas abordadas en el taller “Retos y necesidades para el manejo de las aguas subterráneas en la ciudad de Santiago de Cali”, se realizaron tres salidas de campo durante los días 28, 29 y 30 del mes de mayo de 2019 a puntos estratégicos relacionados con el recurso hídrico subterráneo en diferentes zonas de la ciudad.

Los puntos a visitar se definieron teniendo en cuenta las temáticas abordadas en el encuentro inicial de la fase de diagnóstico, como por ejemplo sitios de interés relacionados con el recurso hídrico subterráneo, zonas de recarga y descarga del acuífero, lugares identificados por los actores como amenazas al acuífero, entre otras. En este sentido, el recorrido se convierte en un hilo conductor entre lo abordado en las jornadas de las fases de aprestamiento, diagnóstico participativo y la vida cotidiana de los actores sociales en relación con el recurso hídrico subterráneo.

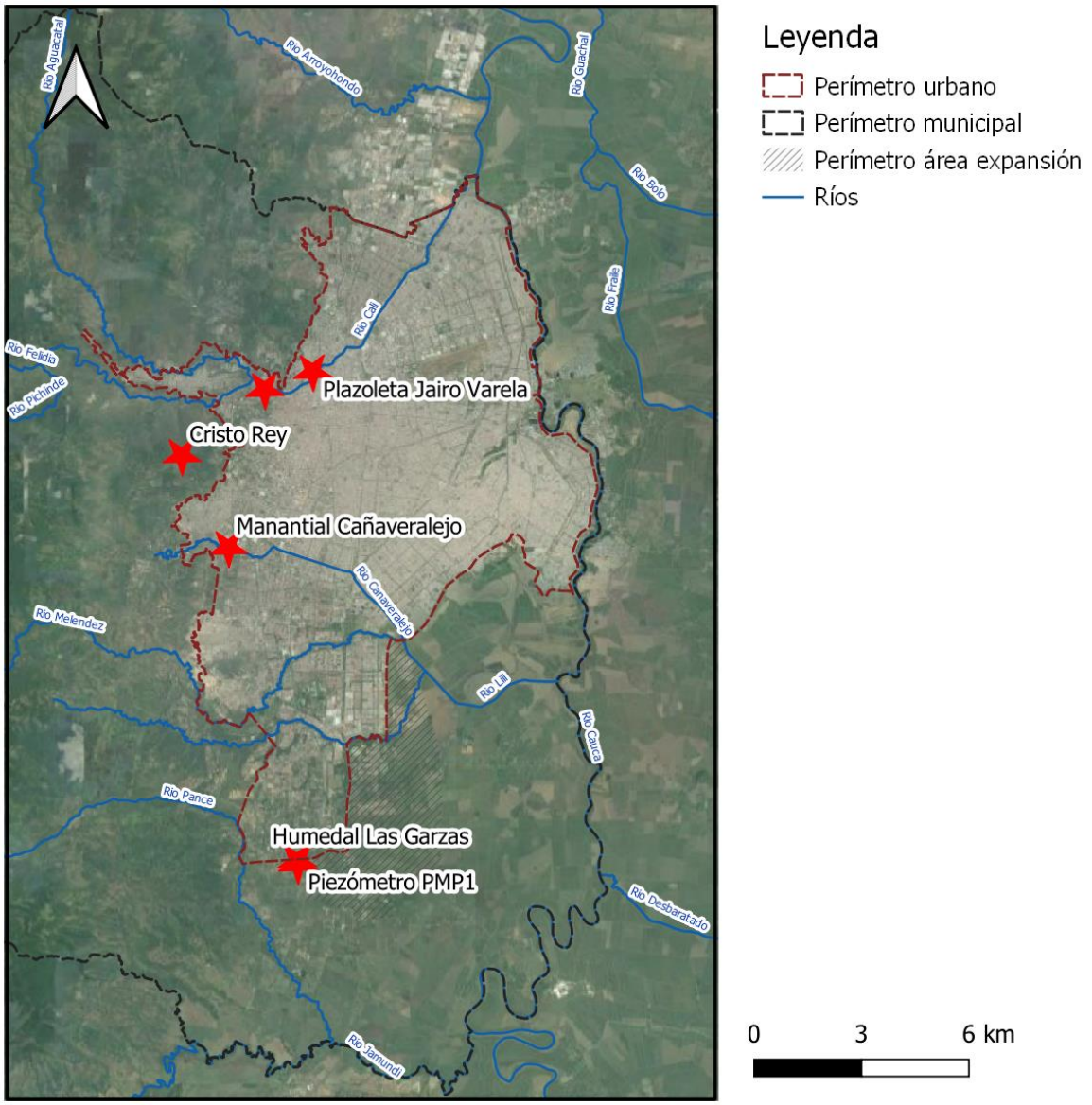


Figura 4-3 Puntos estratégicos para el recorrido.

Posteriormente se definió una agenda de trabajo, para abordar las salidas de campo, de este modo contar con lineamientos claros, intervenciones precisas y un esquema que oriente al facilitador en el recorrido.

4.3 Talleres con profesionales del DAGMA

Con el objetivo de identificar las principales amenazas, entendiendo no sólo cada amenaza de manera individual, sino también como se relacionan entre ellas, cuáles son sus causas, y como pueden formularse posibles soluciones, se organizaron dos talleres con profesionales del DAGMA:

- Taller con grupos multidisciplinarios del DAGMA
- Talleres con el Grupo de Recursos Hídricos del DAGMA

La metodología usada para la identificación de amenazas, causas e impactos está basada en el modelo de análisis FPEIR[1] (en Inglés DPSIR) desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente. Este modelo permite describir las interacciones entre la actividad humana y el medio ambiente (Figura 4-4).

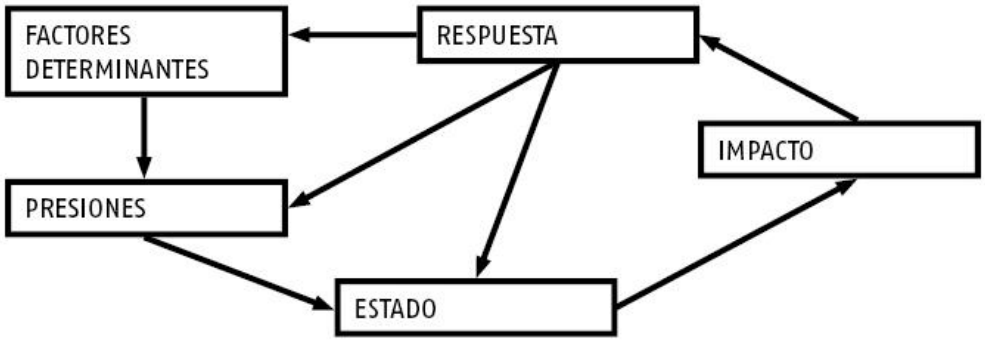


Figura 4-4 Modelo de análisis FPEIR

Según este modelo, las interacciones de actividad humana/medioambiente pueden describirse utilizando los siguiente cinco conceptos:

- Factores determinantes: son aquellas condiciones ambientales, sociales, demográficas y económicas que influencian las presiones sobre el medio ambiente.
- Presiones: son las actividades humanas que causan o potencialmente pueden causar problemas en el medio ambiente.
- Estado: situación de diversos aspectos del medio ambiente en un momento determinado, lo cual depende de las condiciones naturales, de las presiones sobre el medio y de las medidas de protección del medio ambiente que se hayan implantado.
- Impacto: son aquellas consecuencias de los cambios en el estado del medio ambiente o en la población.
- Respuesta: son el reflejo de las iniciativas que la sociedad y la administración están tomando o pueden tomar para mejorar los problemas medioambientales.

Para efecto del presente plan de manejo, se adaptó este modelo de la siguiente manera (Figura 4-5):

[1] *FPEIR: Fuerzas Motrices - Presiones – Estados – Impactos - Respuestas*

Figura 4-5 Modelo de análisis Causa-Efecto-Impacto, basado en el modelo FPEIR. Elaboración propia

Se agruparon factores determinantes y presiones bajo la categoría de “causas”, mientras que “efectos” (estado), “soluciones”(respuesta) e “impactos”, se mantuvieron como categorías separadas. El cambio de nombre en dos de las categorías se debe a la adecuación del lenguaje a uno que resulte más familiar para los actores. Los denominados “efectos” en este análisis son lo que la guía metodológica denomina amenazas al acuífero o la calidad y cantidad del agua subterránea. Este modelo permite visualizar claramente las causas asociadas a las principales amenazas a las que es vulnerable el acuífero, así como también sus interconexiones, y sus impactos socioeconómicos y ambientales. El modelo además permite identificar los puntos críticos para visualizar posibles soluciones que tengan un mayor impacto. Las “soluciones” identificadas se utilizaron para comenzar a dar forma los proyectos del PMAA.

Es importante tener en cuenta, que el modelo incluye tanto efectos e impactos actuales, como también potenciales. Esto es de vital importancia, ya que el plan de manejo del acuífero se proyecta como una herramienta de gestión del recurso hídrico subterráneo, guiando el desarrollo futuro de la zona, y que por ende se adelante a potenciales problemas futuros, y proponga soluciones que eviten o minimicen posibles impactos.

4.3.1 Taller con grupos multidisciplinarios del DAGMA

Durante las jornadas participativas con el DAGMA para la elaboración del PMAA (Ver Anexo 4), se llevó a cabo una sesión dedicada exclusivamente al análisis de causas, efectos e impactos. Para esto, los asistentes se dividieron en cuatro grupos, cada uno enfocado en uno de los siguientes temas: reducción de la contaminación, oferta y demanda, fortalecimiento institucional y gobernanza, y generación de conocimiento e información para la gestión integral. Estos temas fueron definidos previamente, tomando como referencia el diagnóstico técnico, las amenazas identificadas por los actores, y las enfatizadas por la Guía Metodológica para PMAAs. Se consideraron tanto efectos e impactos actuales como potenciales, y se trabajó en la categoría “soluciones” como una primera aproximación a los proyectos que formarán parte del plan de manejo.

Los resultados de esta actividad se muestran en el formato original a continuación (Figura 4-6):

Figura 4-6 Diagrama causa-efecto-impacto para el tema Fortalecimiento Institucional y Gobernanza

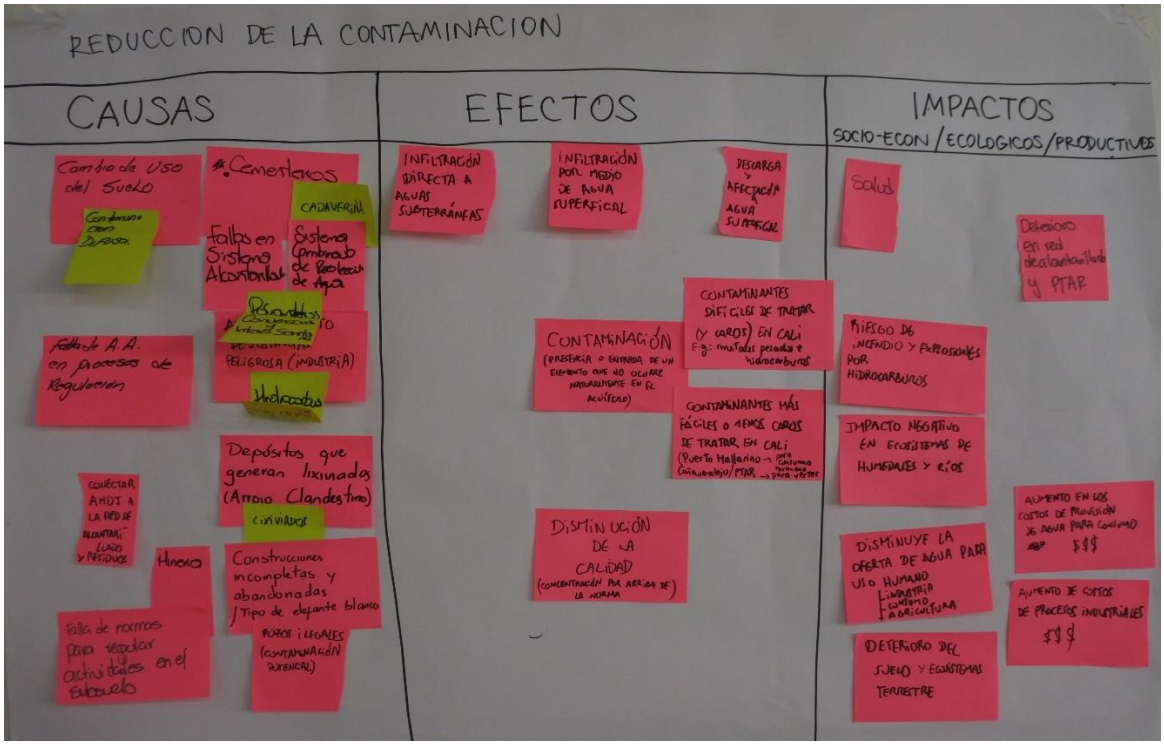


Figura 4-7 Diagrama causa-efecto-impacto para el tema Reducción de la Contaminación

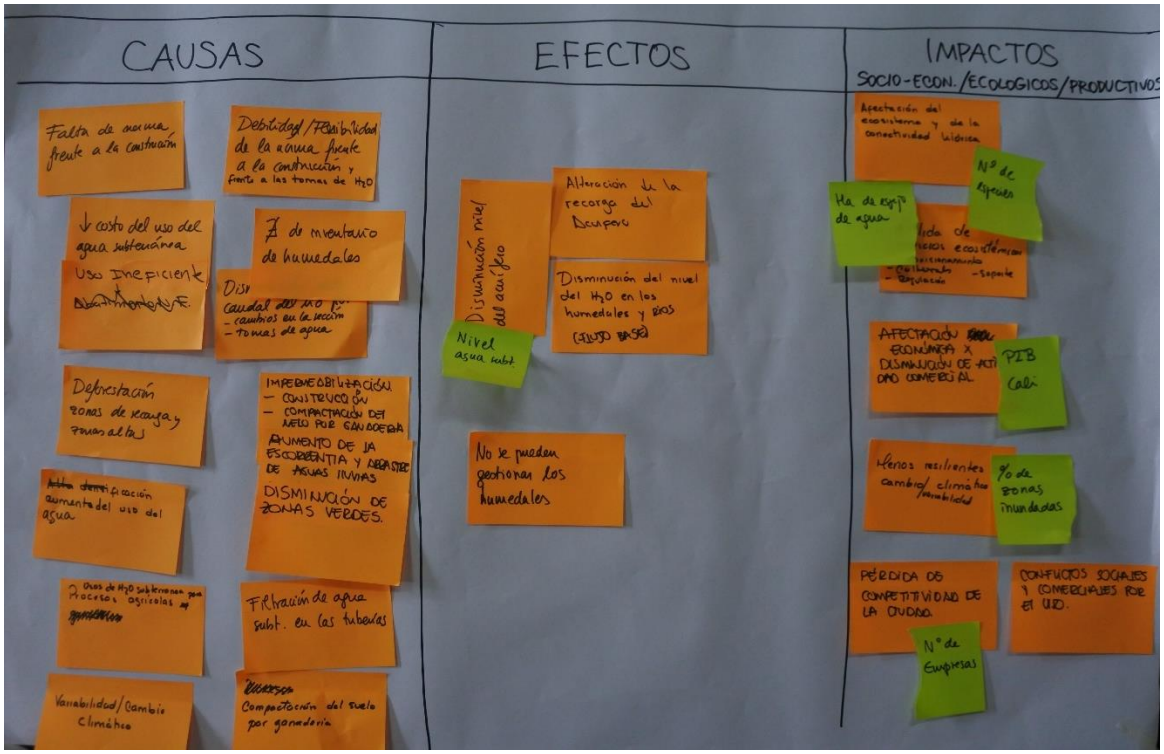


Figura 4-8 Diagrama causa-efecto-impacto para el tema Oferta y Demanda

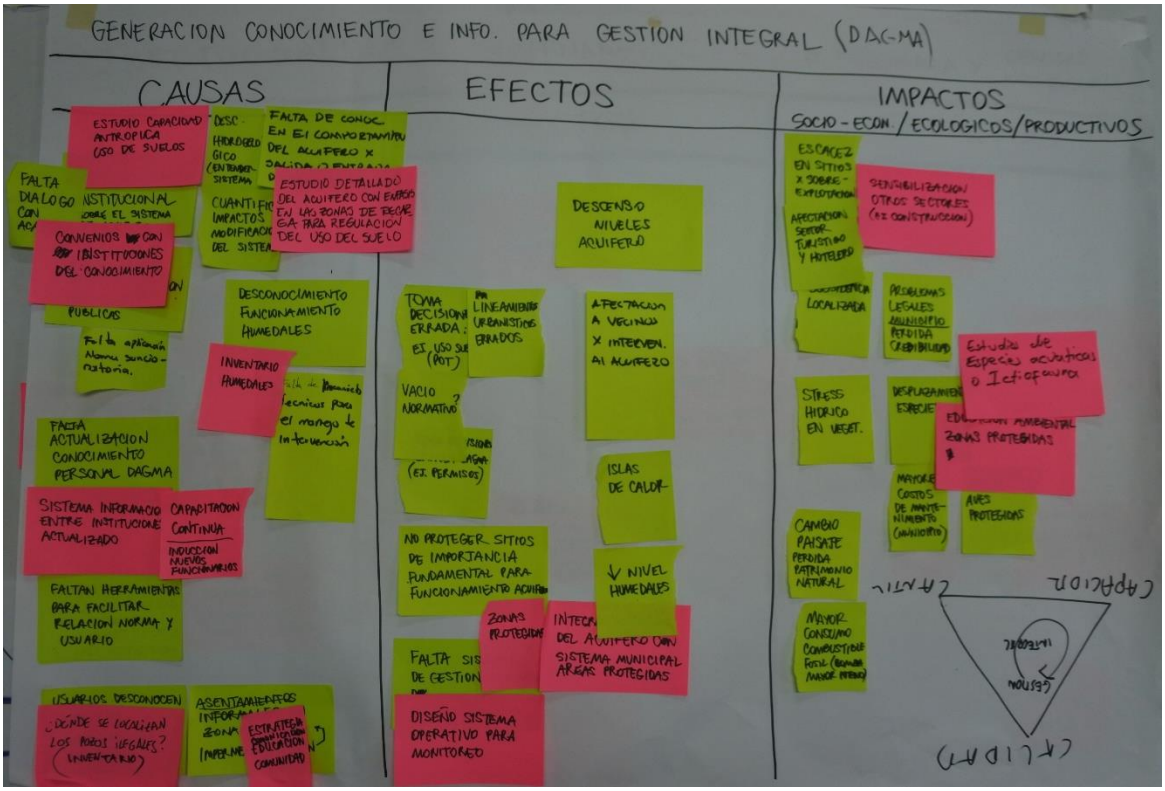


Figura 4-9 Diagrama causa-efecto-impacto para el tema Generación de Conocimiento e Información para la Gestión Integral

Luego de revisar los resultados de la jornada en detalle, y constatar que en el tema Generación de Conocimiento e Información para la Gestión Integral se repetían en muchas de las causas, los efectos e impactos presentes en los otros temas, se decidió incorporar este tema como un aspecto transversal a los otros tres. De esta manera, los tres temas fueron: Oferta y Demanda, Reducción de la Contaminación, y Fortalecimiento Institucional y Gobernanza.

Los aspectos detallados en los diagramas elaborados con el DAGMA fueron actualizados incorporando esta modificación.

4.3.2 Talleres con el Grupo de Recursos Hídricos de DAGMA

Se realizó una segunda revisión de los diagramas de causa-efecto-impacto con DAGMA, en la cual se buscó depurar la información inicial, poniendo atención en reflejar las principales problemáticas para el acuífero en Santiago de Cali. En este proceso se desestimaron aquellas causas, efectos e impactos que se consideraron no relevantes para la formulación del plan de manejo.

Finalmente, se llevó a cabo un segundo taller de depuración. En este taller, se contrastaron los diagramas de causa-efecto-impacto hechos para el PMAA de Santiago de Cali y para el PMAA del Valle del Cauca, con el objetivo de igualar el lenguaje utilizado, y así generar mayor consistencia entre los dos planes. Además, se revisaron nuevamente las causas, efectos e impactos y se agruparon, en la medida de lo posible, aquellos que eran similares, de manera de simplificar nuevamente los diagramas. El fin de esta simplificación responde a la intención de generar diagramas que sean entendibles por el público general, a la vez que sigan en línea con los resultados obtenidos en los talleres con los grupos multidisciplinarios del DAGMA.

Este ejercicio y sus iteraciones, permitió reflexionar y entender las componentes de las amenazas para cada uno de los temas definidos, permitiendo visualizar y jerarquizar los temas que requieren de acción inmediata, la formulación de proyectos que conllevan a generar mayores impactos positivos.

Además este ejercicio fue un insumo para hacer el análisis de gobernanza y capacidad institucional que se presenta en la sección 4.4

4.3.3 Resultados de los talleres con profesionales del DAGMA

Los resultados de estos talleres para cada uno de los temas se resumen a continuación y se presentan en forma de diagrama:

Oferta y demanda:

Los resultados del análisis sobre oferta y demanda muestran que las principales problemáticas o amenazas (en los diagramas denominadas efectos) son el cambio en la condición de recarga y descarga del suelo, y el descenso de niveles del acuífero, que conlleva un menor flujo ambiental a ecosistemas dependientes. Las principales causas se relacionan al cambio climático, la impermeabilización de zonas de recarga asociada a la creciente urbanización, el aumento de la demanda con respecto a la oferta renovable, y la falta de conocimiento en temas como la relación entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas, o el drenaje y/o filtración en tuberías. El principal impacto de estas amenazas se relaciona a las pérdidas económicas, la afectación de ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas, y potencialmente la pérdida de resiliencia y el aumento de conflictos por uso del agua. El Diagrama se presenta en la Figura 4-10

Reducción de la Contaminación:

Los resultados del análisis en el tema de reducción de la contaminación muestran que la principal amenaza es la afectación a la calidad del agua subterránea derivada de fugas o derrames de sustancias peligrosas, infiltración desde tanques sépticos o letrinas en el suelo, infiltración o inyección de aguas contaminadas por medio de sistemas de recarga artificial o de fuentes superficiales contaminadas, o filtraciones al acuífero desde del sistema de alcantarillado. Las causas de estas amenazas se relacionan con una debilidad en el control de la aplicación de la norma por parte de los usuarios y una debilidad en la descripción y protocolo de los procesos de control, que llevan a la autoridad ambiental a hacer un seguimiento inadecuado de los pozos en desuso o un mal sellado de los mismos. Otras causas se relacionan con el desconocimiento de los efectos de actividades potencialmente contaminantes en superficie, o por la deficiencia en la regulación de ciertas actividades contaminantes. Otras causas están relacionadas con la falta de profundización en el análisis del transporte de contaminantes en el agua y en los procesos de remediación, lo que lleva a una toma de decisiones errada sobre intervenciones y usos del suelo. Otra causa importante es la falta de conocimiento sobre las relaciones entre aguas superficiales y subterráneas, y otra el incumplimiento por parte del usuario de la norma. Finalmente, las fallas en el sistema de alcantarillado son obviamente la causa principal de las filtraciones de aguas grises y negras al acuífero. Los impactos derivados de estas amenazas son el riesgo de incendios y explosiones por sustancias peligrosas, los altos costos en procesos de remediación, las afectaciones a la salud, las afectaciones a los ecosistemas asociados a humedales, los conflictos por usos del agua entre usuarios y la autoridad ambiental, y el aumento de costos de provisión de agua por el aumento de costos de tratamiento de las aguas. El diagrama se presenta en la Figura 4-11.

Fortalecimiento institucional y gobernanza:

Los resultados del diagrama sobre el fortalecimiento institucional y gobernanza muestran cómo las diversas causas tienen como principal efecto la gestión inadecuada de los recursos hídricos y la pérdida de memoria institucional, que se constituye como una de las principales amenazas para la gestión eficaz del recurso hídrico subterráneo, aunado a esta problemática está la desarticulación con los diferentes planes e instrumentos de reglamentación y manejo,el aumento en el número de pozos ilegales. Las causas son la inadecuada cooperación interinstitucional que se da por la baja articulación y una comunicación insuficiente, el poco diálogo con la academia, la inadecuada promoción de procesos participativos con los actores y usuarios, la insuficiente educación ambiental de los actores, los bajos costos del agua subterránea, la insuficiente capacidad del DAGMA relacionada con la falta de recursos humanos, conocimiento técnico y coordinación interna junto con la temporalidad de los profesionales y su consecuente pérdida de memoria institucional. Otra causa es que el DAGMA no dispone de herramientas adecuadas para la gestión eficiente de los recursos hídricos, tales como un sistema de información para los procesos y trámites de control, sanciones y permisos. Otra causa importante es la financiación inadecuada, que a su vez tiene como efecto la deficiente gestión, ya que no existen los recursos necesarios para llevar a cabo el tipo de proyectos que DAGMA requiere. Los principales impactos son la afectación de la calidad del agua subterránea y el cambio en la condición de recarga/descarga del suelo. El diagrama se presenta en la Figura 4-12

Si bien los tres diagramas se presentan por separado, están estrechamente vinculados. Los dos grandes impactos relacionados a la gestión inadecuada son la afectación de la calidad del agua subterránea y el cambio de la condición de recarga/descarga. A su vez, esto produce una serie de otros impactos que se pueden revisar en detalle en los diagramas de Oferta y Demanda, y Reducción de la Contaminación.

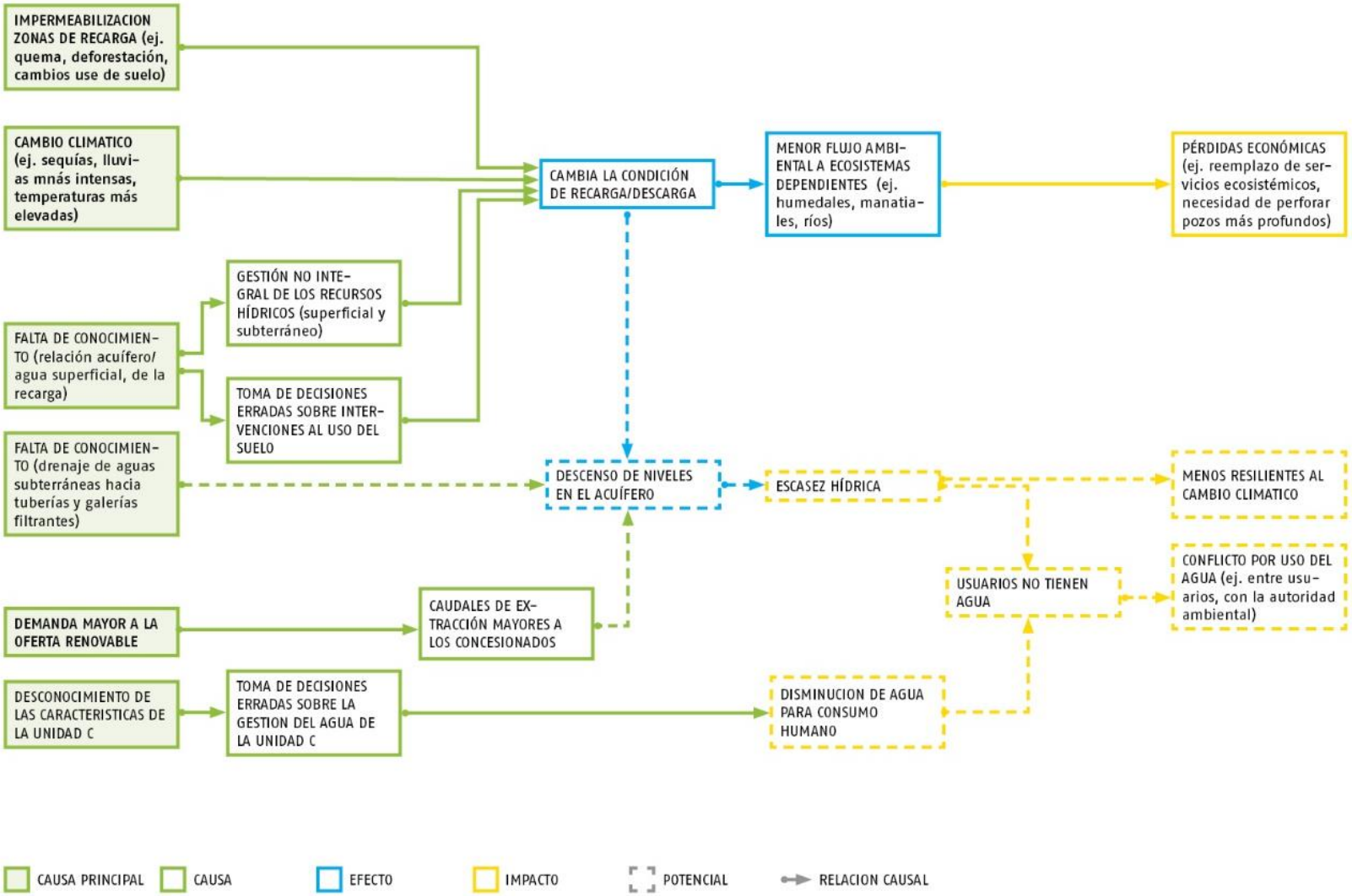


Figura 4-10 Diagrama para el tema Oferta y Demanda

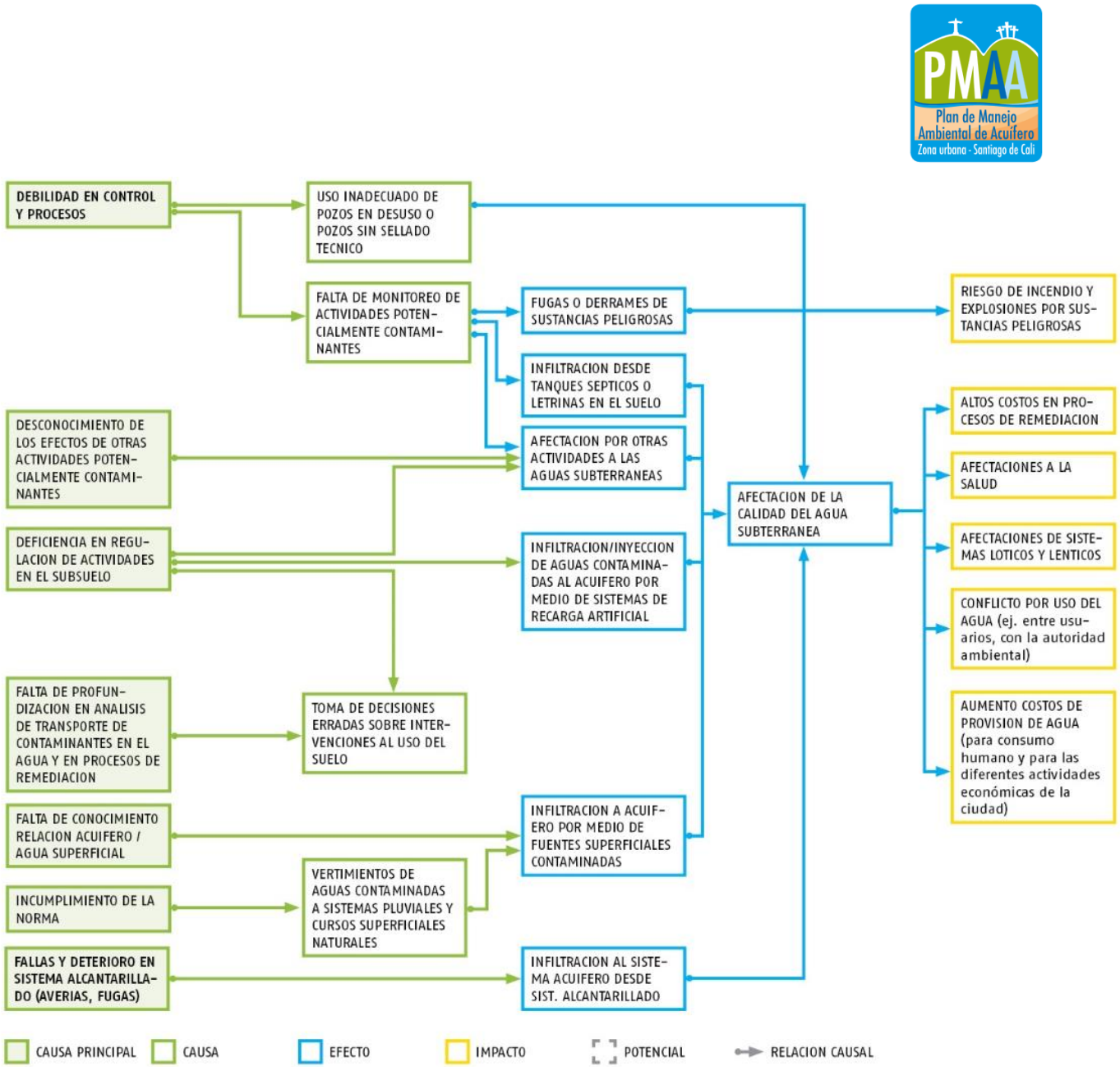


Figura 4-11 Diagrama para el tema Reducción de la Contaminación

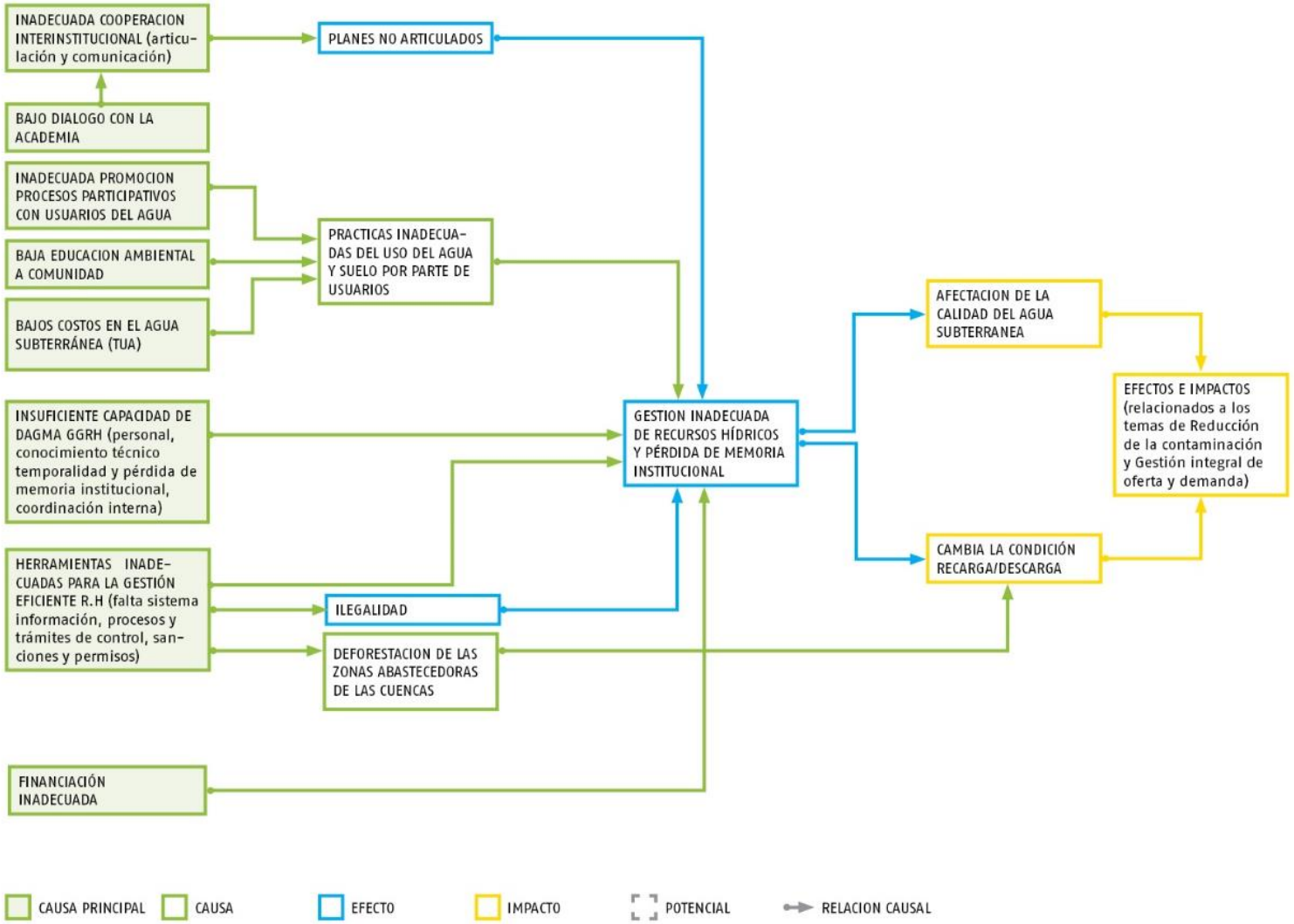


Figura 4-12 Diagrama para el tema de Fortalecimiento Institucional y Gobernanza

4.4 Análisis de gobernanza y capacidad institucional del DAGMA

El DAGMA cuenta con dos grandes áreas de acción: Calidad Ambiental y Gestión Integral de Ecosistemas, y UMATA (Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria). Cada una de estas áreas cuenta con diversos departamentos que abordan temas de gestión medioambiental como la gestión del recurso hídrico y la gestión integral de los recursos naturales (ver Tabla 4-1).

Tabla 4-1 Organigrama DAGMA

Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente DAGMA	
Calidad Ambiental	**Gestión Integral de Ecosistemas y Umata**
• Gestión de Flora	• Conservación de Ecosistemas
• Adopción de Zonas Verdes	• Vivero Municipal Oscar Rojas
• Gestión del Recurso Hídrico	• Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria
• Gestión de Calidad de Aire	• Ecourbanismo
• Gestión de Fauna Silvestre	• Gestión del Riesgo
• Gestión de Calidad Acústica	• Educación Ambiental
• Gestión Integral de Recursos Sólidos	• Participación Ciudadana
• Laboratorio Ambiental	
• Gestión Urbanística Ambiental	
• Gestión Ambiental Empresarial	
• Trámites Ambientales	

El diagnóstico de la capacidad institucional de DAGMA se llevó a cabo utilizando la herramienta de análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas, ver Tabla 4-2). Se trata de una herramienta útil en la toma de decisiones, que permite entender el estado actual de una organización y su potencial de desarrollo, identificando qué estrategia se debe seguir y qué medidas tomar para su implementación. A continuación, se presentan los principales aspectos de este tipo de herramienta, junto a las estrategias posibles de acuerdo con los resultados del diagnóstico:

Tabla 4-2. Componentes del análisis FODA y principales estrategias

Estrategias		**Capacidad interna**	
		Fortalezas (+)	Debilidades (-)
Factores externos	Oportunidades (+)	**FO ofensiva**	**DO reorientación**
	Amenazas (-)	**FA defensiva**	**DA supervivencia**

Las estrategias posibles son:

FO ofensiva: optimizar fortalezas para maximizar oportunidades
DO reorientación: contrarrestar debilidades para explotar oportunidades
FA defensiva: optimizar fortalezas para minimizar amenazas
DA supervivencia: contrarrestar debilidades y amenazas

El análisis FODA para DAGMA fue elaborado con información proveniente de dos fuentes:

- Estudio de literatura disponible sobre la institución. La literatura utilizada fue: página web institucional (http://www.cali.gov.co/dagma/)
- Resultados de los talleres organizados dentro de la fase de diagnóstico participativo

De acuerdo a esta información, el análisis institucional FODA para DAGMA se presenta en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Análisis Institucional FODA para DAGMA

FODA DAGMA	
Fortalezas (+)	**Oportunidades**
• Funciones definidas y visión clara del DAGMA • Jurisdicción sobre un territorio acotado y unificado (zona urbana)	• Mejorar capacidades locales (ej. capacitación de personal) • Nuevas tecnologías • Cambios políticos favorables • Nuevas relaciones interinstitucionales • Cambios favorables en el entorno laboral • Cambios positivos en los hábitos de consumo del uso del recurso de aguas subterráneas • Incentivos económicos gubernamentales (ej. subvenciones, exenciones impositivas, subsidios) • Ampliar jurisdicción incluyendo áreas rurales y suburbanas
Debilidades (-)	**Amenazas (-)**
• No es lo suficientemente fuerte/poderosa como para lidiar con los múltiples actores poderosos presentes en su jurisdicción • Objetivos no explícitos • Falta de recursos económicos para ejecutar proyectos • Falta de recursos humanos capacitados • Falta de articulación intergrupal que lleva a la duplicidad de acciones entre grupos	• Cambios demográficos, económicos, políticos y legales, sociológicos, medioambientales, tecnológicos o culturales desfavorables (ej. político: reducción de jurisdicción) • Decisiones políticas no favorables • Temporalidad del personal y competencia interna • Condiciones económicas desfavorables • Ausencia de un marco legal • Falta de apoyo económico externo adecuado • Modificación de acciones y/o obligaciones sobre los grupos cada que llegan nuevos directores. • Interferencias políticas en decisiones técnicas

En este análisis, se reconocen múltiples amenazas (factores externos) que afectan la institucionalidad de DAGMA, así como también múltiples oportunidades para la mejora de su institucionalidad. Sin embargo, las actuales fortalezas de la institución son escasas, y se centran en la clara visión y compromiso de sus profesionales. La principal debilidad de la institución es la falta de recursos (económicos, humanos y de infraestructura).

Tomando en cuenta las diversas oportunidades reconocidas en el análisis FODA, se propone una estrategia institucional ofensiva, que consiste en optimizar las fortalezas para así maximizar las oportunidades. Se espera que optimizando la definición de funciones y la visión del DAGMA, puedan maximizarse las oportunidades.

4.5 Herramientas de comunicación durante el Diagnóstico Participativo

Al adentrarse en la fase de diagnóstico la estrategia de comunicación se encontró fortalecida, habiendo recorrido un año de actividad y de difusión del plan, en esta etapa los actores identifican plenamente la imagen del PMAA y en cada jornada se resalta este elemento construido. De esta manera se hizo uso de las herramientas de comunicación (canales de televisión, página web) proporcionadas por las instituciones líderes DAGMA y CVC para así continuar el proceso de difusión de información.

Se contó con un apartado especial en el medio impreso ADN (Figura 4-13), de amplia circulación en la ciudad, que se distribuye gratuitamente en diferentes puntos especialmente en las estaciones del sistema de transporte masivo (MIO), se concreta de esta manera la información para la ciudadanía ofreciendo detalles orientadores del PMAA.

Con el propósito de fortalecer la recordación de la imagen en los actores, se hizo entrega de un material conformado por un cuaderno y un lapicero elaborados en material ecológico, en el que plenamente se identificó el trabajo realizado con relación a la identidad visual del plan y vieron reflejado la construcción del eslogan como aporte directo de los actores en las diferentes jornadas.

ADN Cali

Plan para cuidar acuífero

Obras de construcción y averías en alcantarillado pueden contaminarlo. Hacen diagnóstico.

4 jun. 2019

Antes de finalizar este año estará listo el Plan de Manejo Ambiental del Acuífero de la zona urbana de Cali (Pmaa), indicaron el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (Dagma) y la Corporación Autónoma Regional del Valle (CVC).

"Un acuífero es un reservorio natural de agua subterránea y lo componen rocas y materiales sedimentarios permeables, como gravas, arenas, limos y arcillas, que permiten que el agua fluya a través del subsuelo", se explicó desde el Grupo de Recursos Hídricos de la Dirección Técnica de la CVC.

La infiltración de la lluvia y de ríos en las zonas permeables recargan el acuífero de Cali. Entonces, el agua se mueve en sentido oeste-este hasta el río Cauca, la zona principal de descarga. Mientras las aguas atraviesan la ciudad son aprovechadas mediante pozos de extracción.

La idea es hacer el diagnóstico de esas aguas subterráneas e identificar todos los actores relacionados con este recurso, para luego tener lineamientos que permitan protegerlo.

Para hacer este Plan de manerjo, el Dagma, la CVC y la Fundación Deltares de Holanda tienen un convenio. El Dagma informó que se avanza en la segunda fase, que

Aunque se realiza un diagnóstico que determinará los factores que contaminan los acuíferos, se sabe que el crecimiento urbanístico es uno de los que más lo afecta.

Funcionarios del Dagma y de la CVC realizan labores de diagnóstico de aguas subterráneas.

Figura 4-13 Difusión en ADN del PMAA Zona urbana de Santiago de Cali

Figura 4-14 Collage de imágenes relacionadas con material publicitario entregado a los actores sociales en jornada diagnóstico

5 Descripción de las amenazas identificadas

Según la guía metodológica, el PMAA es el instrumento a través del cual se aborda la identificación de amenazas o problemáticas sobre el acuífero, sobre la cantidad y calidad del recurso hídrico subterráneo, y sobre la sostenibilidad de este. Así, dentro del PMAA, se define la amenaza como una problemática sobre el sistema acuífero. Estas amenazas pueden ser de tipo antrópico o de tipo natural, y pueden agruparse en temas según estén relacionadas con la cantidad, la calidad o la gobernanza del recurso hídrico subterráneo.

Durante la fase de diagnóstico de este PMAA, se procedió a la identificación de amenazas a través de talleres con los actores sociales y en talleres con los profesionales del DAGMA.

En este capítulo se hace una descripción de las amenazas identificadas y de los datos del diagnóstico técnico que sustentan su evidencia, y se derivan algunas conclusiones y recomendaciones para avanzar en la mitigación de la amenaza.

Las amenazas identificadas se pueden agrupar en los temas mencionados en la sección 4.3:

- Amenazas relacionadas con la oferta y la demanda
- Amenazas relacionadas con la contaminación de las aguas subterráneas
- Amenazas relacionadas con la gobernanza y el fortalecimiento institucional

5.1 Amenazas relacionadas con la oferta y la demanda

De acuerdo con el diagnóstico técnico y al participativo, se han identificado dos amenazas potenciales sobre el acuífero y sobre el recurso hídrico subterráneo, con relación a la oferta y a la demanda:

- El cambio de la condición de zona de recarga del suelo
- El descenso de niveles

Estas dos amenazas están estrechamente relacionadas, ya que el cambio de la condición de zona de recarga del suelo (por ejemplo, menos zona de recarga), puede conllevar un descenso de niveles porque hay menos precipitación que llega a la zona saturada. A su vez, un descenso de niveles causado por bombeos de agua subterránea, puede cambiar la condición de recarga del suelo en una determinada zona porque crea un abatimiento tal que las líneas de flujo se invierten. Por lo tanto, estas dos amenazas se describen de forma conjunta.

En la zona urbana del municipio de Santiago de Cali, hay dos zonas de recarga principales, el cono aluvial del río Cali, y el cono aluvial del río Pance (ver secciones 3.2.6 y 3.6) . De las dos, el cono aluvial del río Pance es la zona de mayor recarga del acuífero, y la recarga se da sobre todo a través del río Pance y sus acequias o derivaciones. En estas zonas, el gradiente hidráulico es de entre 2 y 3% y los niveles se encuentran a bastante profundidad en la parte alta de los conos y llegan casi a la superficie en la parte distal de los conos que corresponde a la zona de descarga.

Como se muestra en el diagrama de la Figura 4-10, las causas principales del cambio de condición de zona de recarga del suelo y del descenso de niveles son:

- El cambio climático

- La impermeabilización de zonas de recarga
- La deforestación
- La toma errada de decisiones sobre las intervenciones de usos del suelo por falta de conocimiento sobre i) las relaciones entre las aguas superficiales y las subterráneas, ii) la afectación al acuífero por obras urbanísticas, iii) el proceso de recarga, o iv) los procesos de infiltración y drenaje hacia y desde las tuberías
- La gestión no integral de los recursos hídricos por falta de conocimiento sobre los temas mencionados en el punto anterior
- La potencial extracción excesiva de caudales de aguas subterráneas

Los efectos e impactos del cambio de condición de zona de recarga del suelo, la consecuente disminución de la recarga, y el descenso de niveles son:

- Pérdidas económicas por la necesidad de perforar pozos más profundos, aumento en costos de operación o la inviabilidad de continuar con la explotación de los pozos.
- Menor flujo ambiental a ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas, dado por una reducción del caudal base, que puede llevar a pérdidas económicas por el reemplazo de servicios ecosistémicos.
- Escasez hídrica, falta de agua para los usuarios y conflictos por el uso del agua

A continuación, se relacionan las causas e impactos con la amenaza.

Cambio climático

Los escenarios de cambio climático analizados muestran que el escenario climático RCP4.5 (ver descripción en el capítulo 3.3.12.), si bien tiene influencia en la reducción de la recarga del acuífero, el efecto del escenario se observa sobre todo fuera de la zona urbana, que es la zona que no está pavimentada. Por lo tanto, el impacto sobre los niveles de agua subterránea anuales promedios es mínimo del orden de pocos centímetros (<20cm) en la ciudad (ver 3.3.12). Este pequeño cambio en los niveles implica que el impacto de este escenario de cambio climático sobre la delimitación de zonas de recarga y descarga del acuífero también es mínimo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el modelo utilizado no simula el agua que por escorrentía superficial llega a los ríos, y que por ende varía el caudal de los ríos. Estas variaciones en los caudales de los ríos podrían tener un impacto sobre la recarga del acuífero los cuales se deberían estimar mediante modelos de lluvia-escorrentía de los ríos.

Lo que sí se ha observado, es que hay un cambio en la recarga total que llega al acuífero por medio de la precipitación. En el escenario RCP4.5, llegan 28.6Mm3 menos al acuífero (en toda el área modelada), sobre todo concentrados en la parte noreste de la zona estudiada. Los cambios de recarga en la zona urbana son mínimos, debido a la impermeabilidad de la zona.

Impermeabilización de zonas de recarga y toma errada de decisiones sobre las intervenciones de usos del suelo

La urbanización, la reducción de zonas verdes y la deforestación son procesos que llevan a la impermeabilización del suelo o la reducción de la capacidad de infiltración de este. Además, las construcciones urbanísticas pueden causar un descenso local de los niveles del agua subterránea y afectaciones locales sobre las líneas naturales del flujo subterráneo.

De acuerdo con el POT, hay 5 zonas en las que se plantea urbanizar y por consecuente impermeabilizar parte del suelo (3.3.13). Estas zonas son:

- Zona 1: Zona de Expansión urbana corredor Cali-Jamundí que cuenta con planes parciales
- Zona 2: Zona de Llanos de Pance y El Embudo para la cual también existen planes parciales entre la zona urbana y la rural
- Zona 3: Zona La Riverita para la que se propone determinar la totalidad de la zona como suelo suburbano y para la cual se cuenta con un plan zonal
- Zona 4: Macroproyecto Ecociudad Navarro para el cual se tiene un plan zonal
- Zona 5: Comuna 22, que, si bien ya forma parte de la zona urbana del municipio, hay planes para densificar la urbanización

Como muestra el análisis de escenarios de la sección 3.3.13, según el modelo, la urbanización de estas áreas causará un descenso de niveles en las zonas urbanizadas de entre unos pocos centímetros y hasta casi 1.6 metros. La zonas en las que se observan los mayores descensos son la zona 1 y la 5. En las zonas 2 y 3, el descenso no se espera que tenga un impacto importante en la condición de recarga o descarga del acuífero porque aquí el nivel del agua ya es muy profundo (Figura 5-1) y es una zona de recarga clara, sobre todo alimentada por el río Pance el cual no se va a impermeabilizar. Cabe destacar que las zonas 2 y 3, si bien presentan un descenso de niveles menor a 1 metro, son zonas muy importantes para la recarga difusa, y su impermeabilización conlleva una disminución en la recarga del acuífero. En la parte sureste de la Comuna 22 (Zona 5), en la parte este de la zona de expansión (Zona 1) y en la zona de Navarro (Zona 4) que son áreas de transición de recarga y descarga, la delimitación de la zona de recarga y descarga podría verse alterada levemente, pasando de zona de recarga a zona de descarga, pero al tratarse de una zona de transición o equilibrio, este cambio no tendría mayor impacto en cuanto al volumen de recarga.

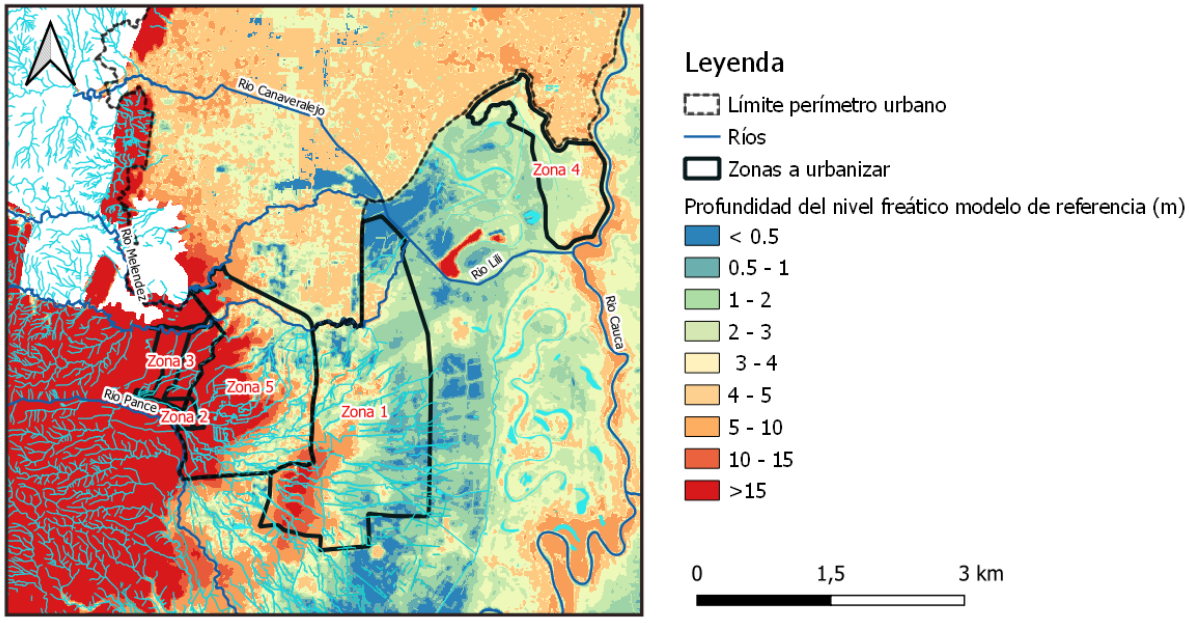


Figura 5-1 Profundidad de los niveles de agua subterránea en las zonas proyectadas para urbanizar

En estas zonas, además, el descenso de niveles y el cambio de condición de recarga del suelo, puede haber un impacto sobre los humedales que dependen de las aguas subterráneas.

Estudios específicos sobre las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas podrían concluir la importancia de las aguas subterráneas para la preservación de los humedales.

Otra consecuencia de la impermeabilización es la disminución de la recarga del acuífero, que de acuerdo con el modelo para toda el área modelada sería de 9.5 Mm^3/año, que es un 10% de toda la recarga que hay en el término municipal (ver análisis capítulo 3.2.5). Los 9.5 Mm^3/a casi coinciden con el bombeo de aguas subterráneas actual contabilizado (ver capítulo 3.2.7), y si se comparan con la recarga solamente en la zona urbana, representan el 64% de la recarga anual.

La reducción de la recarga por el escenario climático y la reducción de la recarga por el escenario de usos del suelo, no pueden sumarse para obtener un valor total de reducción de la recarga resultado de la combinación de los escenarios. Esto se debe a que las metodologías utilizadas para calcular la recarga en ambos escenarios son diferentes. En particular, la metodología del cálculo del a recarga para el escenario climático (3.3.12.1) es diferente de la usada para el modelo estacionario de referencia, que es la base de los escenarios de usos del suelo. Por esta razón, si se quisiera saber el efecto combinado, se tendría que hacer una nueva corrida del modelo escogiendo una metodología única para el cálculo de la recarga.

Se concluye por lo tanto, que antes de aprobar planes de urbanización, es importante hacer un estudio específico, a escala del cuerpo de agua superficial que podría verse afectado, de las consecuencias de la impermeabilización del suelo, sobre todo con relación al descenso de niveles, y a los flujos subterráneos a humedales dependientes de los mismos. El estudio debería hacerse para cada uno de los humedales que se estiman dependientes del flujo subterráneo y considerando también los posibles impactos de sistemas de pozos y/o aljibes existentes.

Cuando se defina el uso del suelo en las zonas proyectadas para el crecimiento de la ciudad, es recomendable que se determinen las áreas para la construcción de pozos de contingencia para el abastecimiento de la población cercana, así como sus áreas de influencia.

Como se ha comentado en el capítulo del modelo numérico, el modelo tiene algunas incertidumbres relacionadas con la infiltración y drenaje de agua desde y por los ríos, la cantidad de agua que drenan las galerías filtrantes, el sistema de alcantarillado, y otras tuberías subterráneas. Estas incertidumbres tienen que resolverse si se aplica el modelo para evaluar las consecuencias de la impermeabilización en zonas específicas.

Deforestación

Otra manera de reducir la capacidad de infiltración del suelo y por lo tanto la recarga del acuífero, es la deforestación. Los actores identificaron varios puntos en la ciudad, sobre todo en las zonas de la ladera, en las que la deforestación se considera un problema Figura 5-2. En estas zonas altas y medias cubiertas por la vegetación, es donde se produce la mayor recarga y donde la recarga del acuífero es más rápida. Algunas de estas zonas están por fuera del área del acuífero, y son zonas que favorecen el mantenimiento del flujo base de los ríos que recargan el acuífero, así como la recarga en los medios fracturados.

Para asegurar la recarga del acuífero, es importante que cesen los procesos de deforestación en estas zonas medias y altas de recarga y se promuevan proyectos de recuperación y protección en las cuencas, principalmente en aquellas ligadas a las áreas de recarga del acuífero como son la cuenca del rio Pance y Cali.

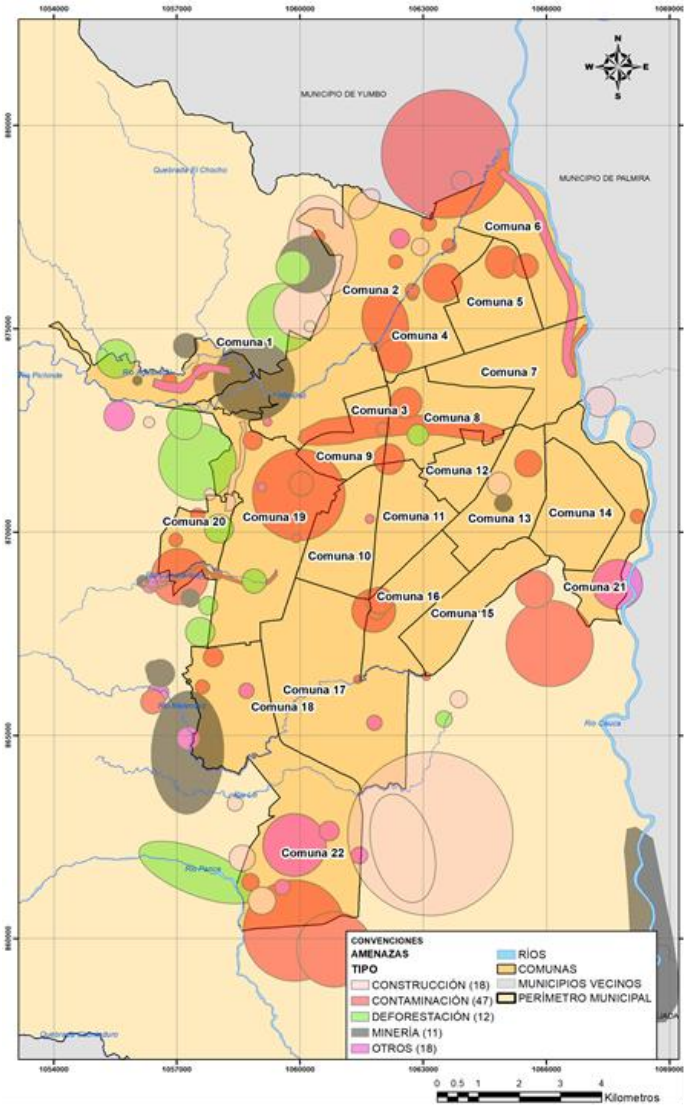


Figura 5-2 En verde aparecen las áreas con deforestación identificadas por los actores sociales

La toma errada de decisiones sobre las intervenciones de usos del suelo y la gestión no integral de los recursos hídricos

En este aspecto, las causas y efectos están asociados a la falta de conocimiento sobre:

- *Las relaciones entre las aguas superficiales y las subterráneas que puede llevar a una disminución del caudal de los ríos*

La falta de conocimiento sobre las relaciones entre las aguas superficiales y las subterráneas, puede llevar a extraer demasiada agua de los ríos, desviar ríos o crear embalses, lo que puede provocar una disminución del caudal de los ríos y de la infiltración de agua de los ríos al acuífero, el descenso de niveles, y el consecuente cambio de condición de recarga del suelo.

De acuerdo con un estudio hecho en el año 1999 y reportado en el POT2014, los sistemas actuales de abastecimiento de la ciudad no son suficientes para satisfacer la demanda. En las

zonas altas de las laderas, hay un problema de cantidad de agua, ya que algunos ríos se secan en la época seca. En otras zonas, el problema es de calidad del agua superficial. Por lo tanto en el POT 2014 se describe la evaluación de 35 alternativas de abastecimiento. De éstas se seleccionan 12 y finalmente se llevan a nivel de prefactibilidad 3 alternativas diferentes; una de regulación del río Cali, otra de desviación del alto río Grande a la cuenca del Río Cali, y otra de aprovechamiento de aguas del embalse de Timba. Todas estas alternativas consideran las aguas superficiales para el abastecimiento.

En concreto, en el estudio de regulación del río Cali se concluyó que si se deja pasar un 10% del caudal del río aguas abajo, se puede cubrir gran parte de la demanda. Si bien no se ha cuantificado el impacto de disminuir el caudal del río Cali sobre el acuífero, los resultados del diagnóstico muestran que la parte alta del cono aluvial del río Cali es una zona importante de recarga, también por la infiltración de agua del mismo río, que de acuerdo al balance hídrico supone un 32% del agua que entra en el acuífero en la cuenca. Por lo tanto se espera que una reducción del caudal del río Cali tenga un impacto en la recarga que llega al acuífero y por lo tanto en el recurso subterráneo renovable disponible y en los niveles de agua subterránea.

También se conoce que los ríos Cali y Meléndez alcanzan niveles bajos, donde en muchas ocasiones el caudal base del rio es usado en su mayoría para darle prioridad al consumo humano de la ciudad, dejando a los ríos casi secos en algunas épocas del año., sobre todo como consecuencia de la deforestación en las laderas y del mal uso de los ríos en su parte alta y media.

Consecuentemente, se resalta la necesidad de elaborar estudios específicos incluyendo la modelación de escenarios, del impacto que puede tener alterar el caudal o la ubicación de cauces superficiales, sobre la recarga del acuífero y los niveles del mismo.

Uno de los estudios que se está llevando a cabo actualmente por EMCALI y el Instituto Cinara de la Universidad del Valle, es el piloto de investigación de filtración de lecho del río Cauca, el propósito del cual es conocer la potencialidad de usar los lechos y fondo del rio para filtrar y extraer agua del rio Cauca de mejor calidad y ser una alternativa para abastecer la ciudad de Cali, reduciendo los costos de tratamiento y el riesgo sanitario, debido a la variabilidad de la calidad del rio Cauca actualmente. Una de las cuestiones a resolver es el impacto que los pozos radiales que se plantean, puedan tener sobre el acuífero.

En este piloto es muy importante que la fase de investigación tome el tiempo necesario, para hacer los ensayos de bombeo, la recopilación de datos y las simulaciones numéricas necesarias para asegurar que el impacto del proyecto sobre los niveles de agua subterránea es aceptable a corto y a largo plazo y bajo diferentes escenarios climáticos, de crecimiento poblacional, y de usos del suelo.

- *Afectación al acuífero por obras urbanísticas y procesos de infiltración y drenaje hacia y desde la tuberías*

La construcción urbanística es otra de las posibles causas de una alteración de la recarga o del descenso de niveles debido a los bombeos temporales (que pueden convertirse en permanentes) de aguas subterráneas durante el proceso de construcción. Actualmente el DAGMA cuenta con una *Guía de Buenas Prácticas Ambientales para el Sector de la Construcción* (DAGMA, 2019) que está en proceso de adoptarse mediante una Resolución. En esta guía, se comunica al sector de la construcción que *"Se debe realizar un Estudio de Intervención de Aguas Subterráneas, el cual permitirá verificar si habrá o no afectación del*

acuífero por el desarrollo del proyecto; este estudio se debe presentar a la autoridad ambiental. Si el Estudio de Intervención de Aguas Subterráneas concluye que, SI HABRÁ AFECTACIÓN DEL ACUÍFERO, se deberá presentar a la autoridad ambiental, el Plan de Manejo de Afloramientos de Agua Subterránea – PMAAS para su evaluación y aprobación en caso de encontrar conformidad".

El modelo numérico muestra que hay una gran cantidad de agua (del orden de 148Mm3/año) que es drenada por sistemas subsuperficiales como galerías filtrantes, el sistema de alcantarillado o tuberías. Este volumen de agua que actualmente se vierte al sistema pluvial o al colector de aguas residuales, podría suponer una alternativa de abastecimiento. Si se sigue la Guía desarrollada por el DAGMA y se realizan los estudios de intervención y los PMAAS, podrían recogerse datos para validar los resultados del modelo en cuestión de volúmenes drenados a infraestructura subsuperficial.

La recomendación es un inventario de los volúmenes drenados por construcciones, sótanos, galerías, sistema pluvial, etc. para poder validar estos resultados del modelo. También es necesario fortalecer los términos de referencia actuales para la presentación de los PMAAS, validando en sus componentes con las variables del acuífero definidas en el presente documento como las relaciones acuífero - fuentes superficiales.

La extracción excesiva de aguas subterráneas
Los bombeos excesivos de aguas subterráneas pueden provocar, el descenso de niveles, el consecuente cambio de condición de recarga del suelo, y un desequilibrio entre la oferta renovable y la demanda.

Actualmente el Índice de Extracción de Aguas subterráneas (IEAS, ver sección 3.4) de las 3 cuencas (Cali, Lili-Meléndez-Cañaveralejo y Jamundí) utilizando los volúmenes consumidos de aguas subterráneas y la recarga calculada como la suma de la precipitación y las pérdidas de acueducto por cuenca es:

- Cuenca del río Cali: 20%
- Cuenca de los ríos Lili-Meléndez-Cañaveralejo: 10%
- Cuenca del río Pance: 6%

Estos índices son bajos comparados con el índice de otras cuencas en el Valle del Cauca, sin embargo, a este análisis faltaría sumarle los bombeos de pozos no registrados.

Si bien la recarga se ha considerado como la suma de la precipitación y de las pérdidas por tuberías, podría considerarse añadir la recarga a través de los ríos.

La recomendación es actualizar el inventario incluyendo los pozos no registrados y recalcular el IEAS para las tres cuencas.

Otro dato importante a tener en cuenta, es que gran parte de la recarga difusa en la zona urbana (el 82%) proviene de pérdidas de acueducto. Si el IEAS se calcula usando solamente la recarga por precipitación, los valores se vuelven más preocupantes para la cuenca del río Cali y de los ríos Lili-Meléndez-Cañaveralejo, como se presenta a continuación:

- Cuenca del río Cali: 128%
- Cuenca de los ríos Lili-Meléndez-Cañaveralejo: 28%

- Cuenca del río Pance: 7%

Deberá ser de análisis de la autoridad ambiental, el equilibrio entre a) las actividades que promueva para la reducción de pérdidas de acueducto y b) la oferta y demanda que proyecte para la administración sustentable del agua subterránea.

De acuerdo con el estudio mencionado y reportado en el POT2014, la demanda máxima de agua potable proyectada para la ciudad para el año 2025 es de 14.8m^3/s que equivalen a 467Mm^3/año.

Los resultados del diagnóstico técnico, muestran que la recarga solo por precipitación en la zona urbana y zona de expansión es de 22.5Mm^3/año (ver sección 3.2.5). Si se consideran las pérdidas por acueducto, la recarga es de 92.7Mm^3/a en la zona urbana y de expansión (ver sección 3.4). Teniendo en cuenta que la demanda de agua proyectada a 2025 es de 467Mm^3/año para abastecer a la ciudad de Cali, y que ésta es del orden de cinco veces la recarga por precipitación y pérdidas de acueducto en la zona urbana y zona de expansión, se hace necesario evaluar a profundidad los posibles impactos que tendria para el acuifero extraer toda esta candidad de agua.

La recomendación es contabilizar todos los bombeos existentes legales e ilegales, hacer proyecciones de demanda a futuro, evaluar todas las fuentes alternativas para el abastecimiento, y recalcular el IEAS, analizando las consecuencias socioeconómicas y medioambientales de su valor en las tres cuencas.

5.2 Amenazas relacionadas con la contaminación de las aguas subterráneas

La principal amenaza relacionada con la contaminación de las aguas subterráneas es la afectación de la calidad del agua subterránea por varios procesos como:

- Fugas o derrames de sustancias peligrosas
- Infiltración desde tanques sépticos o letrinas en el suelo
- Infiltración por medio de sistemas de recarga artificial
- Infiltración por medio de cauces superficiales contaminados
- Infiltración del sistema de alcantarillado
- Afectación por otras actividades como cementerios, canteras, residuos sólidos, y minería.

Las causas están principalmente relacionadas con: 1) el desconocimiento de la ubicación de actividades potencialmente contaminantes para el acuífero, 2) la falta de conocimiento sobre las relaciones entre las aguas superficiales y las subterráneas y los procesos de contaminación y remediación del suelo, 3) la deficiencia en regulación, vigilancia y control de actividades potencialmente contaminante activas e inactivas, 4) la debilidad de los procesos de control, 5) el incumplimiento de la norma, 6) las fallas en el sistema de alcantarillado y 7) El desconocimiento del estado de los elementos de almacenamiento y transporte de las sustancias potencialmente contaminantes.

En general y como se ha descrito en la sección 3.2.10, con relación a la calidad del agua subterránea, hay dos áreas de atención que coinciden con las zonas de descarga del acuífero: la primera comprendida entre los ríos Cañaveralejo y Meléndez, y la segunda en el paleodrenaje

del río Cañaveralejo. Estos sitios se encuentran en zonas de descarga en donde la contaminación proveniente de otras áreas del acuífero se concentra, manteniéndose los indicadores de contaminación mayores que los de las zonas de recarga.

Fugas o derrames de sustancias peligrosas

En la ciudad de Cali existen antecedentes de derrames por sustancias peligrosas de hidrocarburos, el más grande identificado en el año 2008 en una EDS localizada en el sector del Estadio Pascual Guerrero, y entre los años 2016 al 2019 se identificaron 6 casos de empresas que tuvieron problemas en sus tanques de almacenamiento y sistemas de distribución de combustible, o se encontraron pasivos en tanques enterrados conforme a la acción de abandono del inmueble. Todos estos casos se identificaron a partir de la visualización del problemas en las obras de intervención del área de cada establecimiento. Gracias a la gestión de la entidad, todas los casos han tenido acompañamiento, siendo los puntos más críticos, el seguimiento en los procesos de remediación y manejo, que no se deben interrumpir en el tiempo, y la falta de capacitación del personal en procesos de contaminación y de entidades de la Alcaldía en el manejo integral de la contingencia, procesos y protocolos claros del manejo y de los procesos de remediación.

Lo anterior nos lleva a tener la necesidad de conocer rápidamente el riesgo por contaminación al acuífero por esta sustancia, procesos y protocolos de manejo, con la finalidad de identificar controladamente y anticipadamente, las zonas donde se deban profundizar estudios de contaminación activa y pasiva, evitando la contaminación del agua subterránea y/o evitando su dispersión.

A través de un convenio entre la Universidad del Valle y la CVC y el acompañamiento del DAGMA, se realizó un inventario de empresas con actividades potencialmente contaminantes en Cali (Villamil y Walteros, 2018). De las actividades potencialmente contaminantes que pueden sufrir fugas o derrames, las estaciones de servicio fueron identificadas como las que se encuentran en más número en el área urbana. Para poder dar respuesta a la necesidad de identificar el riesgo que pueden suponer posibles fugas o derrames de estaciones de servicio, se filtró la información del estudio mencionado, extrayendo la ubicación de estaciones de servicio y se completó con una búsqueda en OpenStreetMaps. Si se superpone la ubicación de las estaciones de servicio identificadas, con el mapa de flujo de agua subterránea (Figura 5-3), pueden observarse las estaciones que se ubican en zonas en las que el flujo de agua subterránea es descendiente (azul en el mapa). En estas zonas se espera que las fugas de combustibles u otras sustancias, lleguen a más profundidad en el acuífero y se muevan con el flujo hacia zonas de descarga (ríos, pozos, humedales, nacimientos, drenajes).

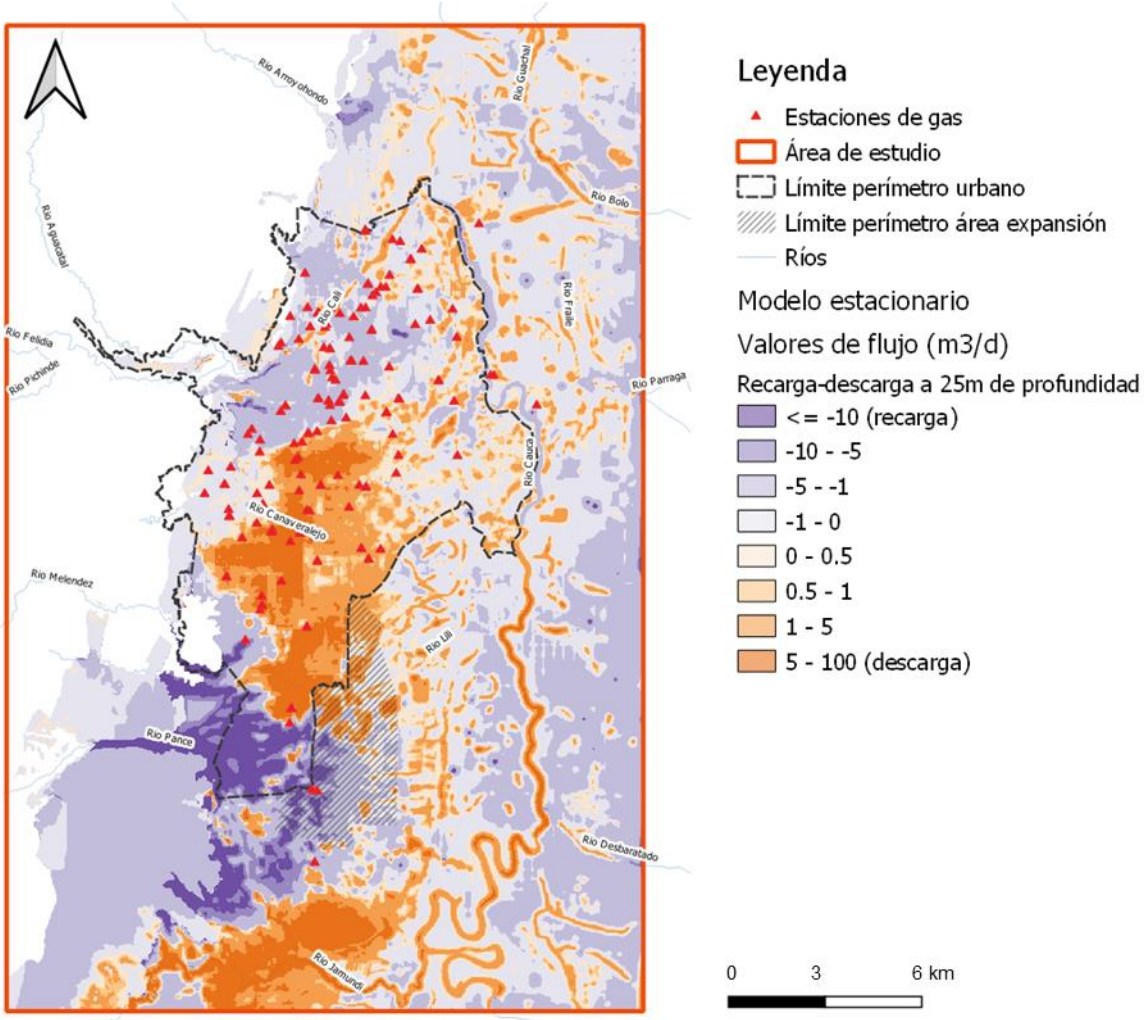


Figura 5-3 Ubicación de las estaciones de servicio sobre el mapa de recarga y descarga del acuífero

En la Figura 5-4 se pueden observar las ubicaciones de las estaciones de servicio en la zona de estudio sobre el mapa de vulnerabilidad. En general, estas se encuentran ubicadas donde la vulnerabilidad a la contaminación es baja-moderada. Sin embargo, se ve que alrededor de 4 estaciones se encuentran hacia el sur, ubicándose en zonas donde hay una mayor vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

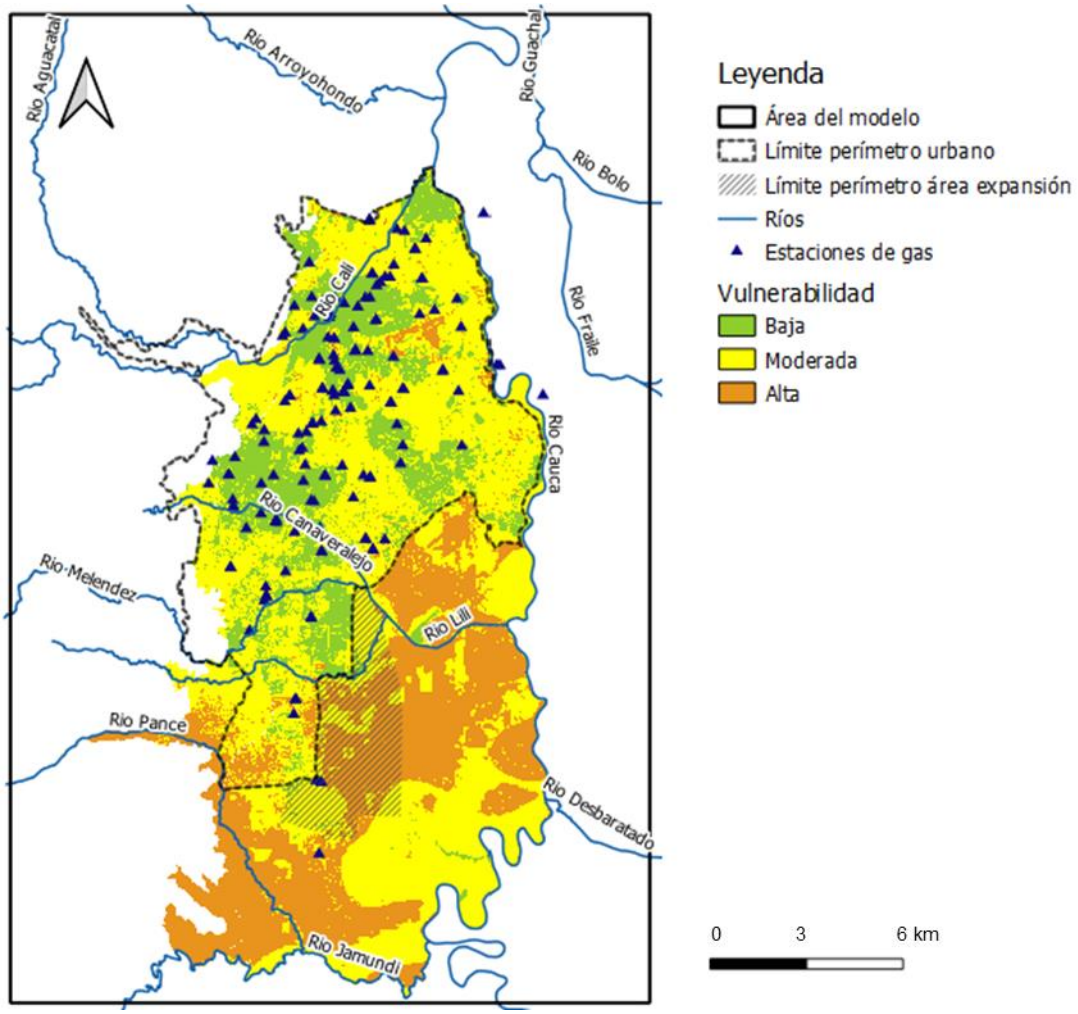


Figura 5-4 Ubicación de las estaciones de servicio sobre el mapa de vulnerabilidad del acuífero

La recomendación es que se prioricen las zonas de recarga o de descarga cercanas a ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas para iniciar los estudios de contaminación y remediación del suelo.

Infiltración desde tanques sépticos y letrinas en el suelo

Según el POT, hay un crecimiento en número y población de los Asentamientos Humanos de Desarrollo Incompleto (AHDI). Estos asentamientos generalmente presentan una carencia en la prestación de servicios básicos de agua potable y de alcantarillado, por lo que se espera que la mayor parte de tanques sépticos y letrinas se encuentren en los AHDI. En este estudio no se dispone de un inventario completo de los AHDI, pero se ha evaluado la ubicación de las zonas para las que en el POT se propone un mejoramiento de los servicios (Figura 5-5).

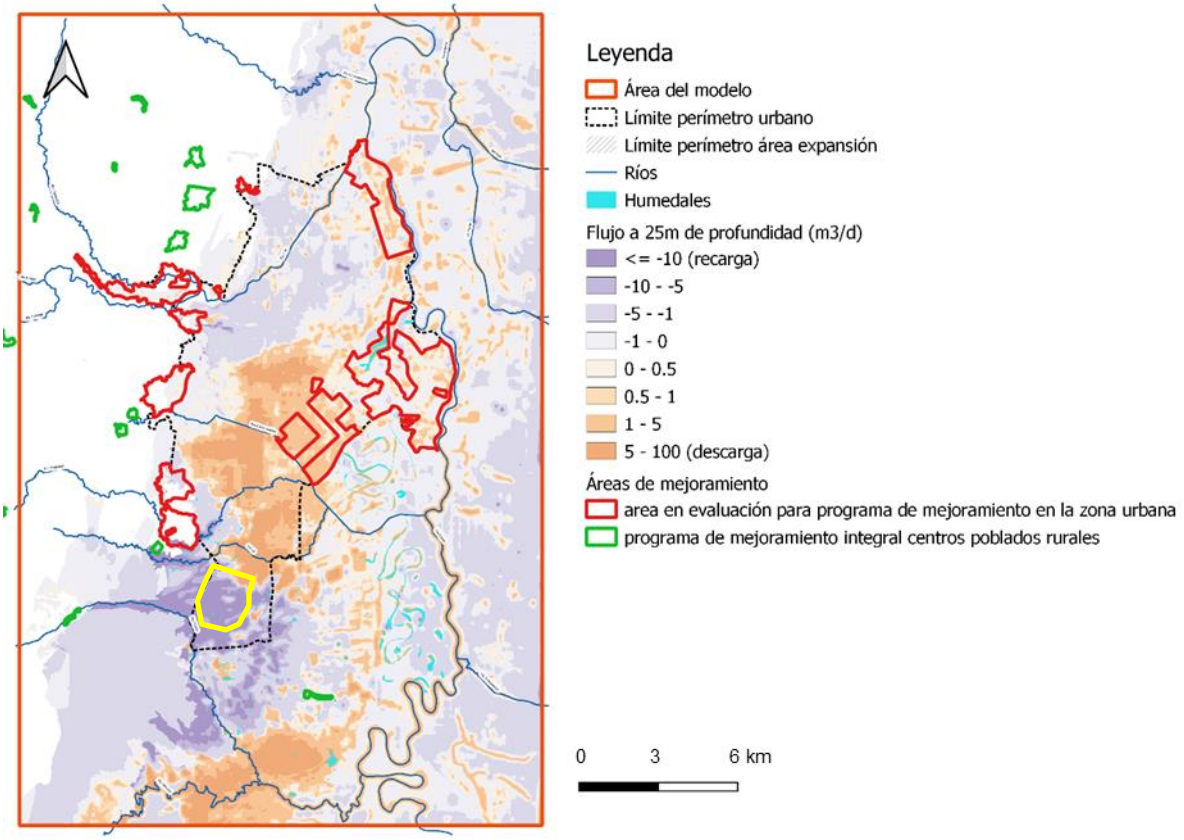


Figura 5-5 Ubicación de las áreas de mejoramiento en el modelo. En amarillo se muestra el área de la comuna 22 que se identifica como área con letrinas y necesidad de mejoramiento.

Se puede observar que una parte de las de mejoramiento están en zonas de recarga del acuífero, lo cual contribuye a que la contaminación ingresada al acuífero a través de los tanques sépticos y letrinas llegue a zonas de descarga de las aguas subterráneas.

Al sur de Cali, específicamente en la comuna 22 se identifica otra zona con la existencia de letrinas ya sean activas o en estado de abandono (en amarillo en la Figura 5-5). Esto es particularmente ocurre dada la dinámica constructiva que ha tenido esta comuna, donde las viviendas eran grandes casas con amplias zonas verdes, donde el servicio de alcantarillado no tenía cobertura dada su distancia al perímetro urbano. Actualmente no se tiene el inventario de cuantas letrinas persisten en la zona que está en un desarrollo urbanístico.

Se recomienda que en estas zonas se priorice la mejora de la prestación de servicios de alcantarillado, conforme a la viabilidad de legalización de la ocupación y la cobertura de la empresa de servicios públicos, o se ajusten dichos sistemas de saneamiento individuales a la normatividad Ambiental actual

Infiltración por medio de sistemas de recarga artificial

Uno de los programas que se ha planteado en el "Plan de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático para Santiago de Cali" es el "Programa de gestión integral de las aguas lluvias a través de sistemas de drenaje urbano sostenibles (SUDS) como instrumento de resiliencia frente al cambio climático". Entre los co-beneficios de este programa está el aumento de zonas verdes para la recarga de acuíferos. Si bien es cierto que los SUDS pueden ser una estrategia para

mantener la recarga del sistema acuífero, cabe mencionar que la calidad de las aguas pluviales, después de que circulen por los sistemas de drenaje de la ciudad, puede no ser la adecuada para infiltrar en el acuífero.

De igual manera, deben considerarse una las de las alternativas más comunes en los PMAAS (Planes de Manejo de Afloramientos de Aguas Subterráneas), donde se busca que el agua subterránea interceptada por la intervención del suelo especialmente en la construcción de sótanos, sea regresada al acuífero de manera controlada por medio de la recarga a gravedad o forzada.

La recomendación es hacer un monitoreo continuo de la calidad del agua que se quiere infiltrar en el acuífero para determinar si es aconsejable su infiltración, y los posibles efectos no solo en la calidad sino también en estructuras físicas e hidráulicas cercanas.

En cuanto a la ubicación de los SUDS, existen metodologías (como por ejemplo la publicada por Faneca et al, 2019), para identificar la potencialidad de la recarga artificial en determinadas zonas. Los resultados del diagnóstico técnico que pueden ser usados para determinar ubicaciones potenciales para la recarga artificial son: el mapa de conductividades hidráulicas del acuífero, el mapa de recarga, el mapa de flujo vertical entre las primeras capas del modelo, el mapa de vulnerabilidad, y el mapa con las líneas de flujo.

Con el objetivo de determinar las posibles áreas para SUDS, se recomienda la elaboración de un mapa de potencialidad de la recarga artificial en la ciudad.

Infiltración por medio de cauces superficiales contaminados
Según varios estudios (POT2014, POMCA Lili-Meléndez-Cañaveralejo), algunos ríos de la ciudad como los ríos Cañaveralejo, Cali y Meléndez, presentan problemas de calidad de agua. De la misma forma, el río Cauca, presenta un deterioro progresivo de la calidad y como resultado de fuertes eventos de precipitación, los niveles de turbiedad y de contaminación en el río son tan elevados que pueden causar la suspensión del suministro. Otros ríos, como el Aguacatal y el Lili, reciben también fuertes descargas de contaminantes provenientes de los AHDI, de actividades mineras activas y pasivas, así como de la intervención de las cuencas en las zonas medias y altas.

Como se ha visto en la sección 3.3.9, los ríos en la ciudad son importantes para la recarga del acuífero, sobre todo en la parte media y alta de su cauce. El modelo estacionario muestra que el río Cali, desde que entra en la zona urbana hasta aproximadamente la iglesia de la Ermita, está recargando el acuífero. A partir de este punto el río sobre todo drena el acuífero, aunque hay puntos en los que también recarga. Los ríos Meléndez y Cañaveralejo, también recargan el acuífero desde su entrada a la zona urbana hasta aproximadamente la Calle 5. El río Lili, antes de entrar en la zona urbana y después en su paso por la zona de El Establo también está recargando el acuífero. El río Pance recarga prácticamente en todo su recorrido hasta que llega aproximadamente a la Avenida Cañasgordas, y sus dos derivaciones principales (Acequia Grande o Derivación 5, y Acequia Cañas Gordas o Derivación 4), recargan hasta prácticamente llegar al río Lili. El ingreso de contaminantes al acuífero ocurre en estos tramos en los que el río recarga, por lo que la calidad del agua en estos tramos es muy importante para evitar la contaminación del acuífero.

La recomendación es monitorear la calidad de agua de los ríos en los tramos en los que recargan el acuífero, y reducir las actividades contaminantes en origen o realizar acciones que eviten que las aguas contaminadas lleguen a los cuerpos de agua superficial.

Infiltración del sistema de alcantarillado

Como se ha mencionado en el apartado 3.2.9., se conoce que tanto en la zona centro de la ciudad, como en la zona norte, y alrededor del río Cali, el sistema de alcantarillado de la ciudad es más antiguo. Probablemente es en estas zonas donde el alcantarillado presenta más daños y puede tener fugas. De igual manera, al oriente de la ciudad, a pesar de que el sistema de alcantarillado es más reciente, por la características de los suelos, EMCALI ha mencionado que en estas zonas donde confluyen la mayor parte de las aguas residuales de la ciudad (dada la localización de la PTAR de Cañaveralejo y que por ende se manejan grandes diámetro y flujos de agua en los alcantarillados), es donde puede existir una alta posibilidad de tener colapso de infraestructura y por ende fugas de aguas residuales al suelo. Si estas zonas coinciden con las zonas de recarga y zonas donde el acuífero es más vulnerable, probablemente las fugas de aguas residuales contaminarán de manera extensiva el acuífero pudiendo afectar a los puntos de descarga del agua subterránea.

Es necesario identificar puntualmente la ubicación de los daños del sistema de alcantarillado y analizar detalladamente si existe una correlación entre la contaminación y el sistema de alcantarillado. Además, se recomienda priorizar las tuberías que se encuentran en zona de recarga o de descarga cercanas a ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas. Las que se encuentran en zona de descarga y presenten daños, seguramente están drenando el acuífero y por lo tanto no influyen en la calidad del agua subterránea, aunque pueden estar afectando los cuerpos de agua donde drenan.

Afectación por otras actividades como cementerios, canteras, basureros, y minas

En la ciudad existen varias actividades, a parte de las mencionadas en los párrafos anteriores, que pueden causar contaminación. Las más importantes identificadas por los actores son los cementerios, las canteras, los vertederos y las minas. Además de estas actividades se presentan otras actividades contaminantes que pueden afectar el acuífero en puntos específicos, como los lavaderos de vehículos, las tintorerías, industrias químicas, etc.

El POT 2014 tiene inventariadas las actividades mineras, los basureros y los cementerios. Las otras actividades contaminantes podrían filtrarse del inventario realizado por Villamil y Walteros (2018) en un estudio específico con este fin. Las actividades inventariadas en el POT 2014 se presentan en un mapa, superpuestas con las zonas de recarga Figura 5-6. Las minas a lo largo de los ríos son de material de arrastreque en principio no afectan a la calidad del agua. Las otras minas, que en su mayor parte se encuentran fuera de la zona urbana, podrían estar afectando la calidad del agua de los ríos, y ésta finalmente a la calidad del acuífero.

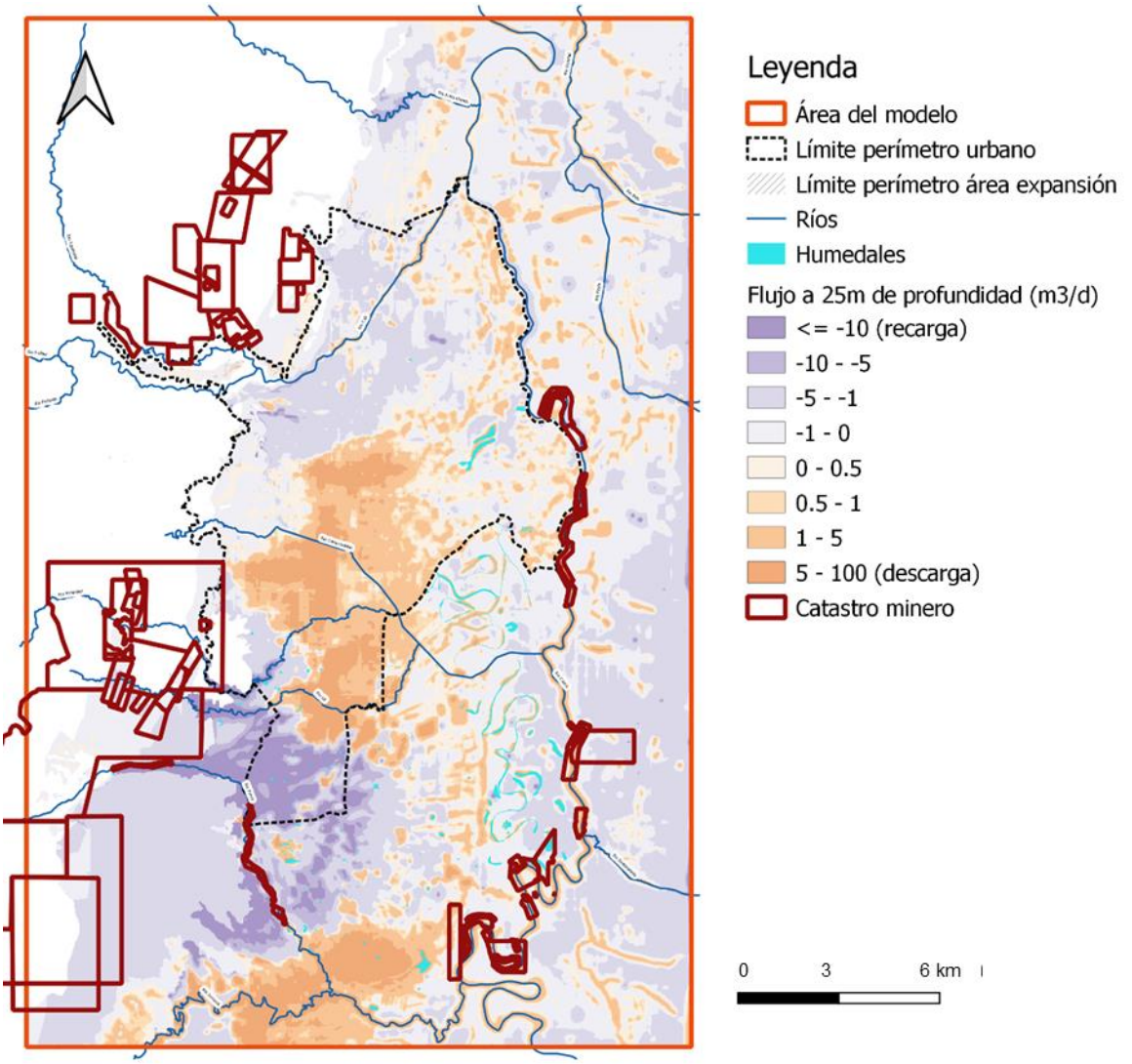


Figura 5-6 Ubicación de las actividades mineras sobre el mapa de recarga y descarga a 25m de profundidad

En cuanto a los cementerios, el de San José de Siloé y el de los Jardines de la Aurora y del recuerdo, están claramente ubicados en zonas de recarga (Figura 5-7). El Cementerio Central también parece estar sobre una zona de recarga y que drena hacia el río Cali.

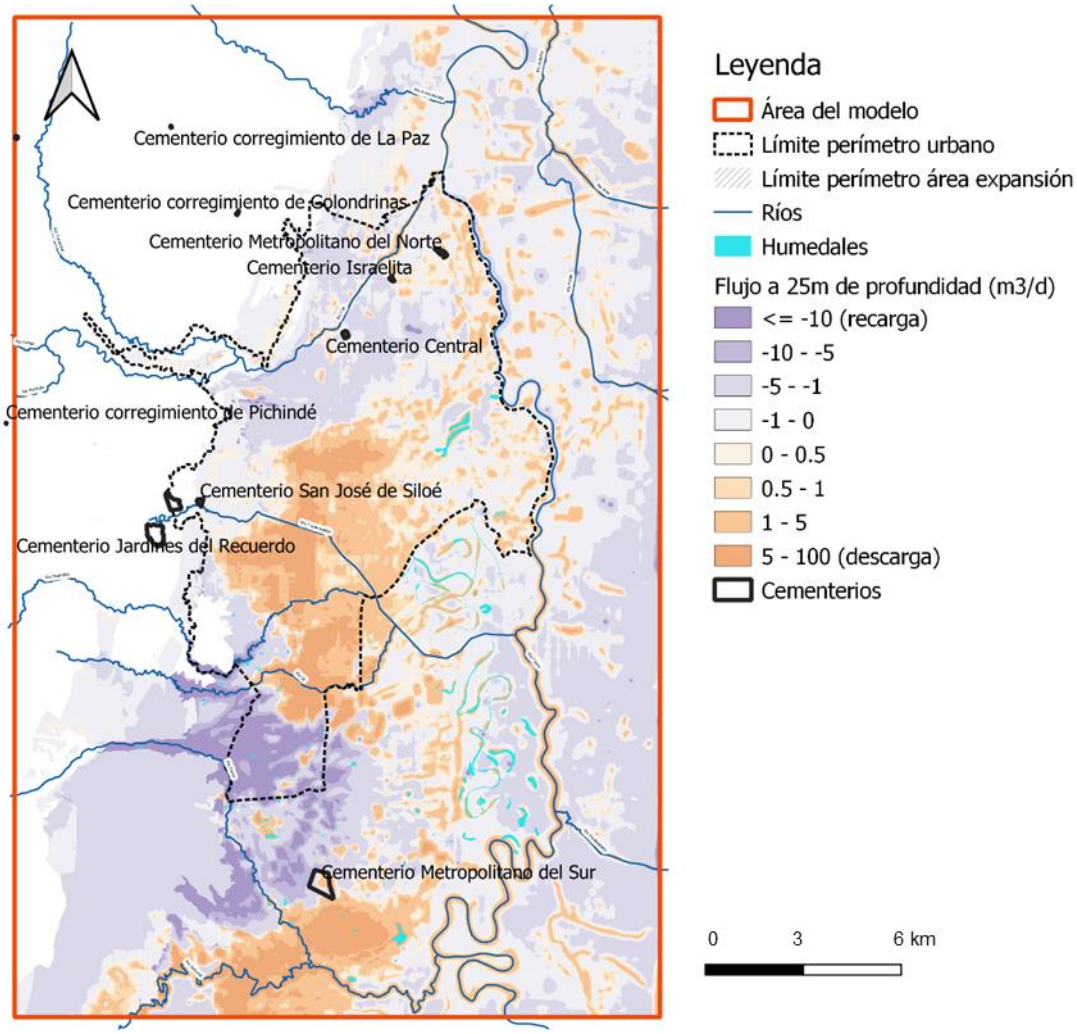


Figura 5-7 Ubicación de los cementerios sobre el mapa de recarga y descarga a 25m de profundidad

En cuanto a la ubicación de los cementerios respecto a la vulnerabilidad intrínseca del acuífero (Figura 5-8), el cementerio que se encuentra en una zona de alta vulnerabilidad es el Metropolitano del Sur, por lo que debería tenerse especial cuidado con el mismo. Cementerios como Israelita, Evangélico, San José de Siloé y Metropolitano del Norte se encuentran en zonas de vulnerabilidad moderada, mientras que el cementerio Central se encuentra en un área de baja vulnerabilidad, pero en zona de recarga cerca del río Cali.

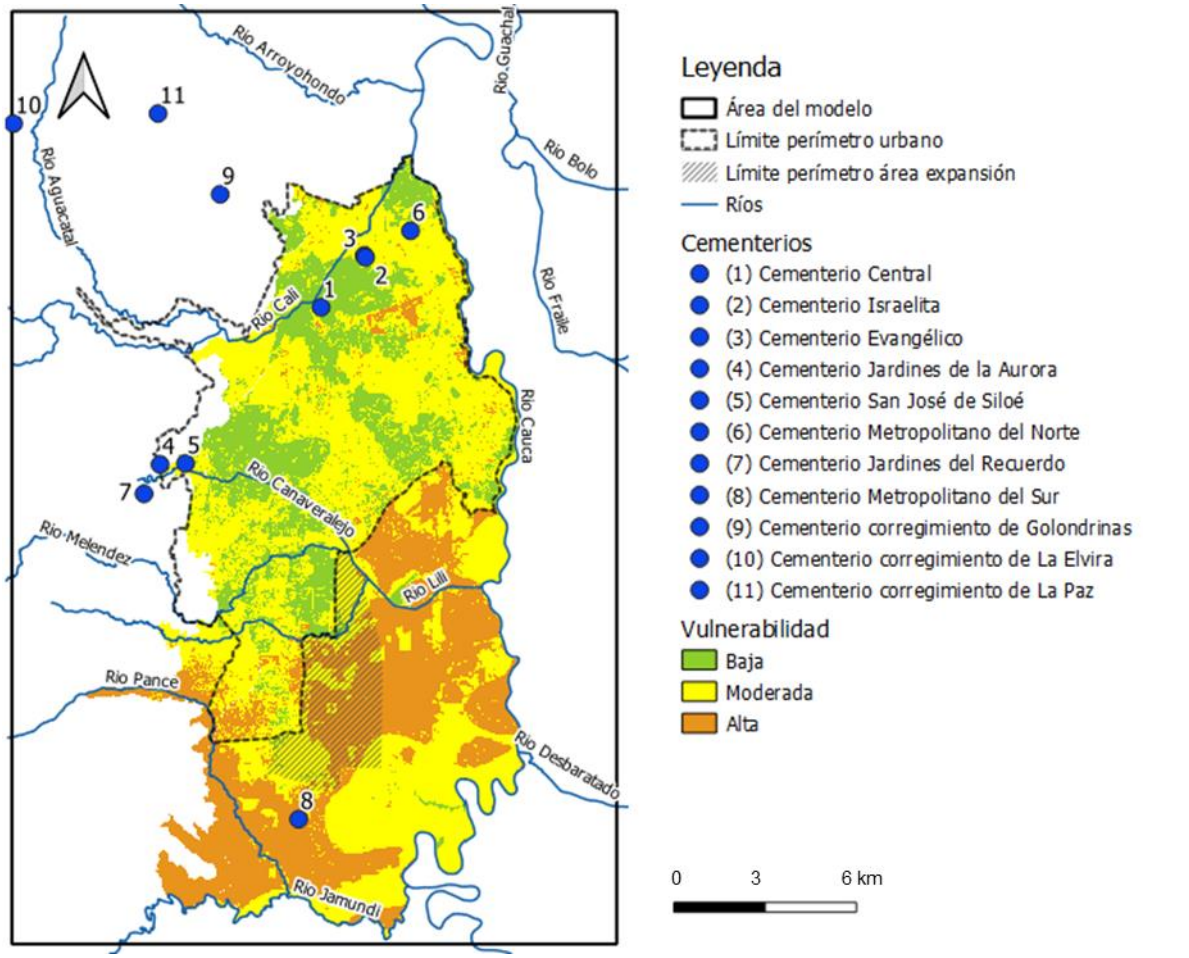


Figura 5-8 Ubicación de los cementerios respecto a la vulnerabilidad intrínseca del acuífero

Igual que con las otras actividades contaminantes, aquellas que se encuentran en zonas de recarga, o en zonas donde las líneas de flujo rápidamente descargan a los ríos, o en zonas de vulnerabilidad moderada o alta, son las que más pueden afectar el acuífero y los ecosistemas dependientes.

Por lo anterior se recomienda priorizar inversiones a base de estudios de contaminación en los cementerios y minas ubicados en zonas de recarga o zonas de descarga cercanas a ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas o en zonas de vulnerabilidad alta o moderada del acuífero.

Uno de los puntos de atención más importantes es el relleno sanitario clausurado de Navarro. En la primera fase y hasta el año 2001, el basurero de Navarro no tenía capa impermeable y los lixiviados de los residuos depositados desde 1970 hasta 2001, se podrían estar moviendo hacia las aguas superficiales y subterráneas. En la segunda fase, se construyó una capa impermeable y un sistema para recoger los lixiviados que se dirigían a lagunas de almacenamiento. Sin embargo, los lixiviados podrían estar drenando a las aguas subterráneas (POT 2014).

Según los resultados del diagnóstico técnico, el relleno clausurado de Navarro está ubicado entre dos zonas de descarga importantes (Figura 5-9); el pie del cono del río Lili en el oeste, y el río Cauca al este. Se trata de una zona de transición donde ambos procesos de recarga y

descarga ocurren. Esta posición implica que seguramente hay drenaje del vertedero hacia las aguas subterráneas que acaban descargando en el río Cauca y en los paleo drenajes existentes en la zona que se encuentran cercanos al vertedero. Su ubicación también sugiere que las aguas subterráneas también fluyen hacia el vertedero, probablemente facilitando la movilización de varios elementos de los lixiviados.

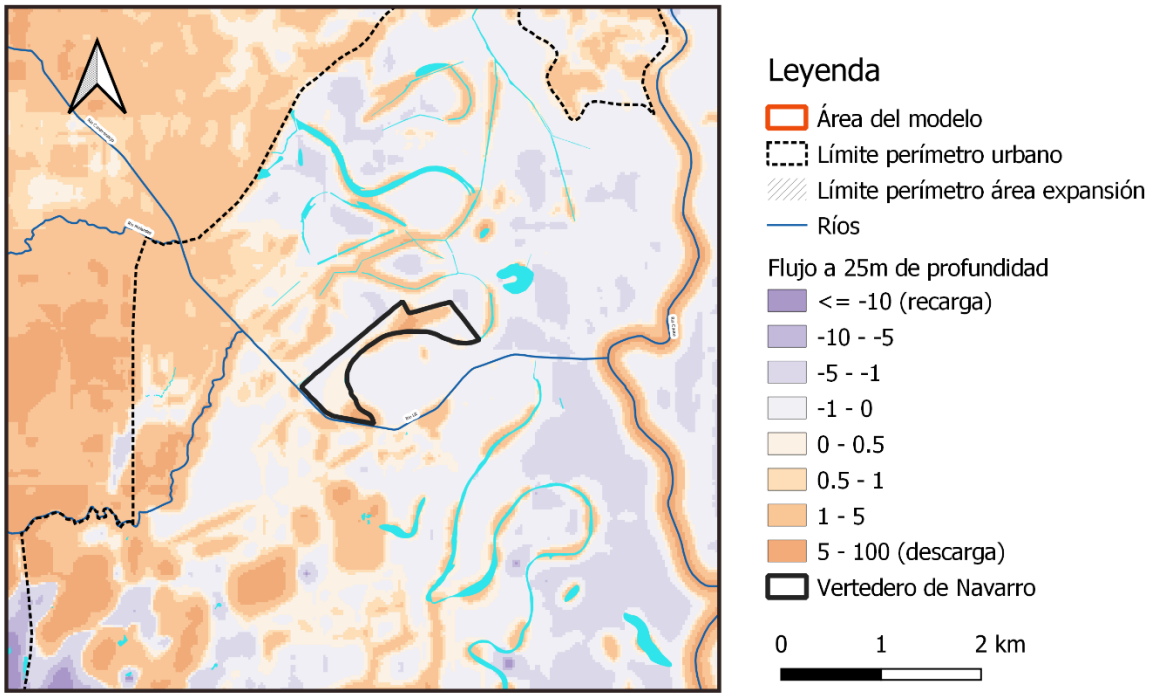


Figura 5-9 Ubicación del relleno clausurado de Navarro respecto a las zonas de recarga y de descarga a 25 metros de profundidad

Una recomendación general para este grupo de amenazas (para todas las actividades potencialmente contaminantes) es la necesidad de realizar el monitoreo a todos los puntos de la red de monitoreo de agua subterránea, para aquellos parámetros que son indicadores principales de contaminación como la conductividad eléctrica, los nitratos, los coliformes totales y los coliformes fecales, DQO, DBO y COT. Además, se recomienda instalar nuevos pozos de monitoreo cerca de las actividades potencialmente más contaminantes en las zonas de recarga del acuífero conforme a los resultados del análisis del riesgo.

Dada la importancia de ampliar el conocimiento en remediación de suelos, así como de mejorar la cooperación institucional y la articulación de los planes, se recomienda la realización de un proyecto piloto de remediación de suelos en una zona de relevancia conforme a los resultados que se obtengan de la caracterización de actuales y potenciales procesos de contaminación al acuífero y propuestas de posibles soluciones en sitios priorizados. La selección de la ubicación, del tipo de contaminación a remediar, y de la metodología a utilizar, debería ser el primer ejercicio a realizar entre las instituciones y actores que participen en el piloto, ya que este ejercicio contribuye al diálogo de saberes, al desarrollo de la confianza entre actores, y a establecer las bases de trabajo coordinado para las siguientes fases del proyecto.

5.3 Amenazas relacionadas con la gobernanza y el fortalecimiento institucional

Se realizó un diagnóstico en conjunto con los técnicos del DAGMA y el CVC, y los actores sociales. En el mismo, a través de un FODA y el análisis de causas, efectos e impactos, se analizaron las principales amenazas en cuanto a la gobernanza respecto a la gestión del agua subterránea. Los resultados de este análisis se han presentado en el capítulo 4. Se concluyó que la amenaza principal es *la gestión inadecuada de los recursos hídricos*.

Las causas son múltiples y están interrelacionadas, como se ha ilustrado en la Sección 4.3.3. En el análisis se han agrupado las causas y amenazas principales en 3 categorías:

- Articulación de planes
- Cooperación institucional, comunicación y compromiso
- Capacidad técnica y de gestión por parte del DAGMA

Articulación de planes

La justificación de hacer un PMAA cuando ya hay una serie de planes y documentos para promover una gestión integral y adecuada de los recursos hídricos, es el enfoque específico en el agua subterránea. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2014, "Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos"), la gestión de los recursos hídricos subterráneos no ha recibido la atención suficiente hasta ahora.

Consecuentemente, la articulación con otros planes relacionados a la gestión integral de recursos hídricos es esencial para promover eficacia y eficiencia, siguiendo los principios de una buena gobernanza del agua formulados por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE). En el diagnóstico, la falta de articulación se ha identificado como una amenaza importante.

> *La efectividad se refiere a la contribución de la gobernanza en definir las metas y objetivos sostenibles y claros de las políticas del agua en todos los órdenes de gobierno, en la implementación de dichos objetivos de política, y en la consecución de las metas esperadas. La eficiencia está relacionada con la contribución de la gobernanza en maximizar los beneficios de la gestión sostenible del agua y el bienestar, al menor costo para la sociedad. La confianza y participación están relacionadas a la contribución de la gobernanza en la creación de confianza entre la población, y en garantizar la inclusión de los actores a través de legitimidad democrática y equidad para la sociedad en general.* (OCDE, 2015)[2]

Los planes más importantes relacionados al PMAA y la gestión del recurso hídrico subterráneo, son el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH). El factor sobresaliente es que los planes mencionados aquí (POMCA, POT y PORH) son, sobre todo, orientados a la gestión de recursos hídricos superficiales. Sin embargo, cuando se trate de temas como el uso de la tierra, la calidad y cantidad del agua superficial en zonas de recarga y descarga o la educación ambiental, la relación entre el agua superficial y agua subterránea amerita un enfoque especial necesitando una articulación específica para evitar: i) contra

[2] *Los 3 principios centrales son: eficiencia, eficacia, y confianza y partcipacion (https://www.oecd.org/cfe/regional-policy/OECD-Principles-Water-spanish.pdf). OCDE, 2015*

productividad de objetivos, estrategias y medidas; ii) pérdida de oportunidades para acciones comunes; iii) confusión y pérdida de confianza con los actores sociales.

Sobre todo, el PORH se ha identificado como el plan paralelo más comparable y relevante para el PMAA.

*El **Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico - PORH** es el instrumento de planificación que le permite a la Autoridad Ambiental competente intervenir los cuerpos de agua, con el objeto de alcanzar y mantener las condiciones de calidad y cantidad requeridas para garantizar su funcionalidad ecosistémica y sus usos actuales y potenciales, en un horizonte mínimo de diez años.*

El ordenamiento del recurso hídrico permite que a través de los análisis que se realizan en el proceso de formulación del plan, se determine la destinación que para los diferentes usos, como el agrícola, recreativo, pecuario, industrial y el consumo humano entre otros, de esta forma se contribuye a que las fuentes mantengan al máximo sus condiciones de calidad, cantidad y también condiciones para la preservación de la vida acuática, no solo los peces sino también los microorganismos presentes en los ríos, esto significa que podemos saber la calidad y así involucrarla al momento de determinar los usos, que al mismo tiempo nos permitan seguir desarrollando actividades sociales y productivas.

(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1934-plan-de-ordenamiento-del-recurso-hidrico)

En la tabla siguiente (Tabla 5-1) se puede ver la gran complementariedad entre el PMAA y el PORH y los potenciales conflictos y oportunidades para una mejor articulación.

Tabla 5-1 Relación entre el PMAA y el PORH y las potenciales oportunidades y conflictos

PORH	PMAA	Oportunidades y potenciales conflictos
Clasificación de las aguas	Caracterización del acuífero	Entender la relación e influencia entre los cuerpos de agua superficial y subterránea, por ejemplo, la ubicación de zonas de descarga y recarga en cuanto a la cantidad y calidad, la relación hidrológica e hidroquímica
El inventario de usuarios del cuerpo de agua	El inventario de usuarios y fuentes de contaminación	Juntar a todos usuarios y fuentes de contaminación en una base de datos para poder facilitar el conocimiento sobre el sistema hídrico, ahorrar gastos de procesamiento y análisis, optimizar intervenciones y comunicar

		de una manera integral y exhaustiva.
Los objetivos de calidad a ser cumplidos y alcanzados por dichos usuarios en el corto, mediano y largo plazo	Objetivos de calidad para ciertos usos, a corto y largo plazo	Si hay una normativa diferente, es más difícil de explicar y generar conformidad con los usuarios y otros actores. En cuerpos de agua superficial y subterránea que están conectados, los objetivos sólo se pueden alcanzar si son objetivos integrales
Los usos permitidos	Los usos deseados	Ver cuadro anterior
Las posibilidades de aprovechamiento	Potencial para un mejor aprovechamiento	Hay un potencial de optimizar el uso del agua, por ejemplo, en años secos, variando entre fuentes de agua superficial y subterránea. Así se optimizarían los costos de uso y tratamiento
Programas, proyectos y monitoreo, cuyo propósito será obtener la mejor condición natural que sea posible para el cuerpo de agua	Programas y proyectos para mejorar la gestión de cantidad y calidad y la gobernanza del agua	Buscar sinergia y evitar conflictos o proyectos opuestos

Recomendación

Se recomienda analizar y obtener sinergia entre el PMAA y el PORH, comparando el diagnóstico ejecutado en el PORH, los objetivos puestos para los cuerpos de agua con relación al agua subterránea, los instrumentos y normativas para el uso, monitoreo, y cumplimiento y formular oportunidades de obtener sinergia en p.ej. monitoreo y sistema de información, comunicación externa, objetivos para cuerpos de agua relacionados y los proyectos en cada plan. Se recomienda también sincronizar los 2 planes. Este análisis se puede complementar con el POT y el POMCA.

Cooperación institucional, comunicación y compromiso

La participación y confianza entre los actores son factores claves para una buena gobernanza del agua (OCDE, 2015). Para el PMAA DAGMA también se ha identificado que la cooperación entre instituciones, la comunicación con los actores sociales y económicos y la academia son factores clave para dar frente a la amenaza central: *la gestión inadecuada de los recursos hídricos*.

La baja cooperación institucional es otro factor identificado durante el diagnóstico. Esta es causada a su vez por una comunicación deficiente y una inadecuada articulación entre instituciones a la hora de desarrollar planes o de implementarlos. De igual forma, el diálogo entre la autoridad ambiental y la academia no es suficiente y, siendo la academia un actor

importante en el desarrollo de planes, estudios, y en la investigación, ese diálogo insuficiente se convierte en vacíos de información que se transforman en planes incompletos.

Para la implementación del plan, la comunicación y cooperación con los actores sociales y económicos es esencial, a través de acciones concretas para mejorar flujos de información y con ello contribuir a aumentar la confianza entre los actores, haciendo uso de sistemas de información transparente y fácil para acceder, acciones de monitoreo participativo, talleres de formulación participativo de proyectos, visitas de campo conjuntas y la publicación del progreso de las acciones en el PMAA con indicadores claros, directos y fáciles para entender.

También se ha identificado la baja educación ambiental de la comunidad como un factor contribuyente a la inadecuada gestión. Igualmente, la educación contribuye a un buen comportamiento ambiental de todos los ciudadanos para que así los usuarios conozcan la importancia de preservar y cuidar los recursos hídricos subterráneos. Sin embargo, también con una buena educación y un alto nivel de concientización, quedarán importantes medidas o reglamentos para hacer cumplir a la normativa en casos en los que no se puede depender del cumplimiento voluntario. Ejemplos son limitaciones en la construcción de edificios u obras de infraestructura, restricciones para la recreación o el uso de agua para fines domésticos y exigencias a empresas para el tratamiento y uso racional de agua. Una buena articulación con el POT y el PORH es clave para poder implementar estas medidas. Generalmente, todos estos tipos de medidas pueden aumentar costos de producción y deben ser bien comunicadas y explicadas, incluyendo, por ejemplo, un tiempo razonable para su implementación. Igualmente, el DAGMA puede desarrollar mecanismos para promover la innovación y la aplicación de buenas prácticas ambientales y formar coaliciones con el sector social y económico. El DAGMA puede beneficiarse de experiencia internacional para diseñar e implementar estos tipos de medidas.

Se recomienda implementar una serie de medidas para mejorar la cooperación y comunicación entre instituciones y la academia, así como con los demás actores sociales. Esto puede incluir mesas técnicas comunes, campañas de comunicación e información conjuntas, el intercambio de personal, proyectos conjuntos, el monitoreo participativo, el intercambio de datos, modelos y resultados de estudios y la capacitación

Para facilitar una mejor comunicación y fortalecer la capacidad de DAGMA de actuar como una autoridad responsable, respetada y confiable, también se identificó en la fase de diagnóstico la necesidad de revisar y actualizar la Resolución 001 de 2003, con el fin de mejorar los trámites y procedimientos sobre el uso y manejo de agua entre el DAGMA y el usuario.

Se recomienda revisar y actualizar la Resolución 001 de 2003, para perfeccionar los trámites y procedimientos sobre el uso y manejo de agua entre el DAGMA y el usuario, incluyendo claros trámites y protocolos relacionados con la contaminación de las aguas subterráneas, los procesos de construcción urbanística, el uso del agua subterránea, y la perforación de pozos ilegales

Capacidad técnica y de gestión por parte del DAGMA

El DAGMA cuenta con varios grupos con funciones definidas y una visión clara e inspiradora. Además, su jurisdicción está bien definida siendo ésta sobre un territorio acotado y unificado, que es la zona urbana. Sin embargo, el DAGMA también tiene algunas debilidades en cuanto a

la capacidad de recursos humanos, al conocimiento técnico del personal, y a la coordinación interna. Estas debilidades fueron identificadas en el FODA durante el diagnóstico del plan.

El DAGMA tiene profesionales muy comprometidos en los diferentes grupos, no obstante, la gran mayoría de los profesionales son contratistas y renuevan su contrato varias veces al año. Si el contrato no se renueva y los profesionales cambian, la consecuencia es una interrupción de las actividades durante el periodo de contratación y, aún más importante, una pérdida de memoria técnica e institucional.

En cuanto al conocimiento técnico en aguas subterráneas de los profesionales, se identificó la necesidad de reforzar sus capacidades en, principalmente, i) la modelación numérica de flujo y de calidad de agua; y ii) la remediación de suelos. Adicionalmente, para facilitar la implementación del PMAA será necesario complementar el equipo técnico con personal adicional. Las calificaciones de los mismos están por definirse pero incluirán un hidrogeólogo y un experto en sistemas de información geográfica.

Un reto con el que se enfrenta el DAGMA es hacer cumplir la normativa ambiental. Durante el diagnóstico se identificaron tres aspectos que contribuyen a que el DAGMA se enfrente a dificultades para hacer cumplir la normativa: 1) la resolución que reglamenta el uso de las aguas subterráneas incluye una normativa extensa, pero en algunos artículos poco clara, como ya se ha mencionado en secciones anteriores, 2) la falta de capacidad de personal y recursos económicos para dar seguimiento y control, y 3) la falta de empoderamiento del DAGMA para aplicar los reglamentos sin estar sometido a presiones internas o externas.

La recomendación es, por lo tanto, mejorar la capacidad interna del DAGMA en cuanto a profesionales, capacidad técnica y su empoderamiento para aplicar la normativa sin presión interna o externa para el manejo de los recursos hídricos subterráneos.

En el diagnóstico se identificó como causa importante de esta amenaza, la insuficiencia de herramientas para la gestión de los recursos hídricos subterráneos. Para una gestión eficiente de los recursos hídricos subterráneos es de suma importancia contar con una serie de herramientas, que permitan acceder a la información que se requiere de forma rápida y eficiente, y que den claridad a los profesionales de la autoridad ambiental a la hora de tomar decisiones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos.

Se identificó que, si bien el DAGMA dispone de mucha información, ésta no está unificada y organizada en bases de datos digitales que permitan un acceso rápido y un análisis eficiente. En la fase de aprestamiento se encontró información en formato papel que se digitalizó y organizó en las fichas que alimentan el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) como expedientes de pozos, análisis hidrogeoquímicos y el registro de concesiones. Es importante continuar digitalizando la información que se recopila, y organizarla en un sistema de información, para que ésta sea fácilmente accesible para los profesionales del DAGMA, y para ir alimentando el SIRH. También es importante contar con un sistema de información geográfica que incluya toda la información referente a la gestión de los recursos hídricos subterráneos y superficiales.

La recomendación es trabajar en mejorar las diferentes herramientas para la gestión de los recursos hídricos subterráneos, con especial atención en establecer un sistema de información que incluya datos de información geográfica, expedientes de pozos, e información que alimente el SIRH y que sea de fácil visualización para los técnicos del DAGMA. Asimismo, que cuente con ventanas públicas para alimentar la comunicación con la academia, actores sociales y económicos

5.4 Escenarios

Los escenarios son descripciones e historias consistentes sobre posibles futuros diferentes. Se desarrollan determinando un conjunto de variables y supuestos sobre fuerzas y relaciones de cambios importantes, que pueden originar un convincente posible estado futuro del mundo. Es importante mencionar que los escenarios no son predicciones o pronósticos, sino narrativas de futuros plausibles.

Hay diferentes maneras de utilizar los escenarios. En el PMAA los escenarios se utilizaron para evaluar cómo una amenaza podría cambiar a futuro, y para evaluar la robustez de los proyectos propuestos.

Los escenarios se definieron en una jornada participativa con grupos multidisciplinarios del DAGMA, celebrada en el mes de mayo de 2019 (ver Anexo 2).

Los escenarios definidos son:

Escenario 1

En este escenario, la población del municipio de Santiago de Cali aumenta debido a la migración y al desplazamiento interno des de las zonas rurales a la zona urbana. Ese aumento de población conlleva un crecimiento de la ciudad hacia las zonas de recarga, las cuales no se protegen debidamente a causa de varios factores. Entre los factores más importantes está el aumento del área de jurisdicción del DAGMA, que si bien confiere al DAGMA más territorio a manejar, significa un problema porque los recursos humanos y financieros del DAGMA no aumentan, su estructura no cambia, y los procesos de contratación tampoco, con lo que el DAGMA no se fortalece, y no tiene capacidad para actuar en toda la jurisdicción. Además, hay una baja coordinación y colaboración interinstitucional, lo cual complica la transferencia de conocimiento hacia el DAGMA, y rebaja la eficiencia de la actuación en la gestión de los recursos hídricos. Si bien la actividad económica crece y se dispone de más recursos, no se establecen alianzas público-privadas, lo que dificulta que el DAGMA pueda implementar de forma eficaz la normativa al no encontrar colaboración de los principales usuarios del recurso hídrico. Gracias a la economía hay una mejora de las tecnologías para el manejo y uso del recurso hídrico, pero debido a la baja capacidad del DAGMA, a la poca coordinación institucional, y la poca cooperación de los usuarios, estas tecnologías no se aplican lo suficiente y la gestión de los recursos hídricos no mejora. Como consecuencia, la calidad del agua del río Cauca no es suficiente para suministrar agua a la ciudad y se requieren alternativas de abastecimiento. En cuanto al clima, hay un aumento en la frecuencia y la duración de de los fenómenos de la Niña y Niño, lo cual aumenta la presión sobre la cantidad de la oferta renovable, y provoca más momentos críticos en cuanto a escasez de agua e inundaciones.

Escenario 2

En este escenario, hay un crecimiento de la población en la ciudad, pero éste se da de forma respetuosa con el medio ambiente. Hay una política clara en cuanto a la protección del medio ambiente y de las zonas de recarga, y la ciudad crece sin ocuparlas. El DAGMA identifica e implementa estrategias y acciones de protección y preservación de las mismas para asegurar la oferta hídrica subterránea. El aumento de población afecta sobre todo la zona urbana de Cali, que se ve densificada, incluyendo las zonas de desarrollo incompleto. El DAGMA recibe más recursos económicos y puede aumentar la cantidad de profesionales especializados en recursos hídricos y otras áreas, con lo que se fortalece y está totalmente capacitado para asegurar una buena gestión de los recursos hídricos en su jurisdicción, que se ve ampliada en área. La coordinación interinstitucional es buena gracias a una mejor comunicación entre instituciones, favorecida por el aumento de profesionales del DAGMA. Esto ayuda a que se establezcan alianzas público-privadas tanto en temas técnicos y de educación o capacitación, como en términos económicos. Estas alianzas favorecen el uso de nuevas tecnologías para el manejo de recurso hídrico y se consigue que la calidad del agua del río Cauca sea buena para abastecimiento. Sin embargo, las alianzas público-privadas también tienen como consecuencia que los usuarios tienen más peso político y poder sobre cómo se desarrolla la ciudad, influyendo en la aplicación de la normativa y en la gestión del DAGMA como entidad. En cuanto al clima, la frecuencia de años Niña y Niño aumenta, así como la duración de los fenómenos, lo cual aumenta la presión sobre la cantidad de la oferta renovable, y provoca más momentos críticos en cuanto a escasez de agua e inundaciones.

Una vez definidos los escenarios, se pasó a evaluar de forma cualitativa la evolución de las amenazas en ambos escenarios. Este ejercicio sirvió para identificar las amenazas que podrían ser más importantes en los futuros definidos. En la etapa de formulación, se utilizó esta información para dar robustez a los proyectos planteados.

En las siguientes tablas se muestra la evaluación cualitativa de las amenazas en ambos escenarios. Los signos positivos indican que la amenaza ya no está o que ha disminuido, los signos negativos indican un empeoramiento de la amenaza, y los 0 indican que no hay cambio respecto a la situación actual. En naranja se han resaltado las amenazas que empeoran en ambos escenarios, que empeoran mucho en uno de los dos escenarios, o que quedan igual en un escenario y empeoran en el otro.

Tabla 5-2 Aplicación de escenarios a efectos e impactos para el tema de Oferta y Demanda

Oferta y Demanda		
Efectos & Impacto	**Escenario 1**	**Escenario 2**
Toma de decisiones erradas sobre intervenciones al uso del suelo	-	0
Uso ineficiente del agua subterránea	0	+
Afectación de la recarga	- -	+
Toma de decisiones erradas sobre la gestión del agua de la unidad C	0	0
Afectación local de la disponibilidad por intervenciones	-	+ (mejor integración entre planes)
Escasez por descenso de niveles en el acuífero	-	-
Caudales de extracción mayores a los concesionados	0	+
Disminución de agua para consumo humano	-	-
Afectación de sistemas lóticos y lénticos	-	0
Conflicto entre usuarios	0	0
Estrés hídrico en vegetación	-	-
Conflicto entre usuarios y la autoridad ambiental	-	0
Menos resilientes al cambio climático	- -	-

Tabla 5-3 Aplicación de escenarios a efectos e impactos para el tema de reducción de la contaminación

Reducción de la Contaminación		
Efectos e impactos	**Escenario 1**	**Escenario 2**
Uso inadecuado de pozos en desuso o pozos sin sellado técnico	-	+
Fugas o derrames de sustancias peligrosas	- -	0 (infraestructuras obsoletas)
Infiltración desde tanques sépticos o letrinas en el suelo (considerando Cali distrito especial urbano-rural)	- -	0 (ej. parcelaciones, rural)
Infiltración/inyección de aguas contaminadas al acuífero por medio de sistemas de recarga artificial	-	+
Afectación por otras actividades sin estudios de efectos a las aguas subterráneas	0	+
Toma de decisiones erradas sobre intervenciones al uso del suelo	-	0 (relacionadas a política)
Infiltración a acuífero por medio de fuentes superficiales contaminadas	-	+
Afectación de la Calidad del agua Subterránea	-	+
Riesgo de incendio y explosiones por sustancias peligrosas	-	0 (mejor coordinación interinstitucional y mejores planes que disminuyen vulnerabilidad)
Altos costos en procesos de remediación (aumentan los problemas relacionados con la calidad, pero hay mejores tecnologías más económicas)	0	0
Afectaciones a la salud	-	+
Conflicto entre usuarios	0	0
Conflicto entre usuarios y autoridad ambiental	-	0
Aumento costo provisión de agua para consumo humano (tratamiento)	-	+
Aumento costos por tratamientos de agua para las diferentes actividades económicas de la ciudad	-	+

Tabla 5-4 Aplicación de escenarios a efectos e impactos para el tema de Fortalecimiento Institucional y Gobernanza

Fortalecimiento Institucional y Gobernanza		
Efectos e impactos	**Escenario 1**	**Escenario 2**
Falta cooperación interinstitucional	- -	+
Practicas inadecuadas del uso del agua por usuarios (ilegalidad, contaminación potencial)	- -	+ (ej. Cobro por vertimiento > cierre de pozos)
Gestión inadecuada e insuficiente del recurso por parte del grupo de recursos hídricos de la autoridad del agua	-	0 (ej. El recomendado por un político, falta de compromiso y curiosidad)
Falta de coordinación dentro de DAGMA (organización jerárquica, cultura y forma de trabajar)	0	0
Pérdida de memoria institucional	0	+
Falta de sanciones a los usuarios	-	+
Disminución de disponibilidad por cantidad y/o calidad (más población)	-	0
Intervención inadecuada del territorio	- -	+ +
Ingresos no percibidos por autoridad del agua (por ilegalidad y falta de sanciones)	- -	- (pozos que se cierran)
Pérdida de credibilidad de la autoridad del agua	- (por falta de capacidad)	- (por falta de independencia)
Vulnerabilidad por desabastecimiento debido a calidad	-	0
Vulnerabilidad de la estabilidad de DAGMA (funcionamiento y financiamiento)	0	0
Afectación a la recarga	- -	+

6 Etapa de Formulación

6.1 Introducción, el porqué de un PMAA

El marco legal del PMAA está establecido en el Decreto 1640 de 2012 y el Decreto 1076 de 2015 por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hídricas y acuíferos, y se definen las responsabilidades de los organismos principales. Las razones más importantes para el DAGMA para formular un PMAA en la zona urbana de Cali son:

1) Entender el sistema acuífero para mejorar la gestión de los recursos hídricos subterráneos en cuanto a su calidad y cantidad
2) Promover la sostenibilidad del recurso hídrico para sustentar los servicios ecosistémicos por medio de una gestión integral del recurso hídrico y del suelo, en buena articulación con otros planes de gestión territorial y de cuencas
3) Fortalecer las alianzas con el sector público, la academia, el sector privado y las organizaciones ambientales para una mejor gestión
4) Fortalecer la capacidad del DAGMA de actuar como autoridad competente, facilitar la cooperación entre entidades territoriales y resolver conflictos entre usos y usuarios

En resumen, la meta principal es de:

"Garantizar la sostenibilidad de las aguas subterráneas en el territorio metropolitano de Cali".

Para formular el PMAA, se ha seguido la metodología establecida por el Ministerio de Medio Ambiente en 2014, en la "Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos" (MADS, 2014). En ella, se distinguen 3 fases principales para formular un PMAA: i) el aprestamiento para formar el equipo de trabajo, identificar la información disponible y faltante, e iniciar el proceso de participación de los actores; ii) el diagnostico, para entender en profundidad el sistema acuífero, identificar y caracterizar las amenazas y posibles soluciones, tomando en cuenta el cambio climático y otras incertidumbres; y iii) la formulación del plan en sí, con la definición de líneas estratégicas, programas y proyectos a corto, mediano y largo plazo.

6.2 El proceso participativo de la formulación

Con base en las amenazas identificadas en la fase de diagnóstico, se llevó a cabo la fase de formulación en la cual se definieron i) la visión a futuro de la ciudad de Santiago de Cali por parte de la autoridad ambiental, ii) las líneas estratégicas, iii) los programas y proyectos planteados para dar respuesta a las amenazas actuales y a las potenciales, y para avanzar en el conocimiento y la construcción de ciudad hacia la visión y objetivos planteados por el PMAA.

La definición de los proyectos que se presentan en este PMAA es el resultado de las propuestas de los representantes de diferentes grupos disciplinarios del DAGMA, de las propuestas e ideas de los actores sociales, y de las posibles soluciones identificadas para mitigar las amenazas que se describen en la fase de diagnóstico.

La Figura 6-1 presenta los componentes principales de la formulación en un PMAA.

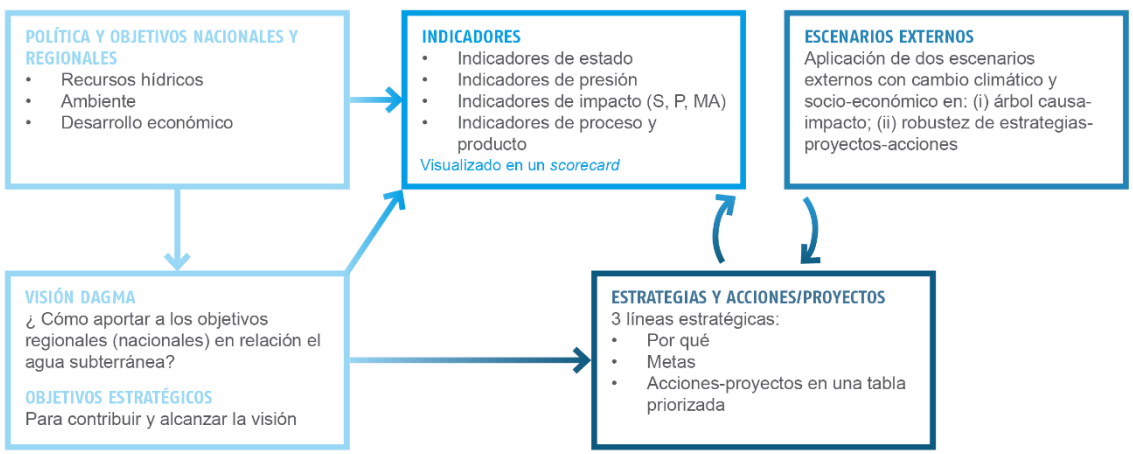


Figura 6-1 Componentes de la formulación del PMAA

Para el desarrollo del presente PMAA, la primera etapa de formulación fue llevada a cabo en las jornadas participativas con profesionales del DAGMA, que tuvieron lugar en el mes de mayo de 2019 (Anexo 2). Durante estas jornadas se abordó la visión, los objetivos del plan, y los escenarios. En encuentros posteriores con los profesionales del grupo de Recursos Hídricos se trabajó en el desarrollo de las líneas estratégicas, se evaluó la necesidad de indicadores, y se desarrollaron los programas y proyectos.

A continuación se describe la metodología para la obtención de la visión y se pasa a describir las líneas estratégicas, programas y proyectos.

6.3 Metodología y resultados de la visión

La visión del DAGMA sobre el futuro de Cali y del mismo DAGMA es un insumo importante para definir los objetivos del PMAA. Los objetivos, líneas estratégicas, programas y proyectos que se definan, tienen que estar alineados con la visión, y tienen que brindar resultados que permitan avanzar para hacer realidad los aspectos descritos en la visión.

La metodología para el desarrollo de la visión que forma parte del plan de manejo se llevó a cabo en tres etapas: (1) visión general por parte de la máxima autoridad de DAGMA, (2) taller participativo de espacialización de la visión con los profesionales del DAGMA, (3) reflexión y ajuste de la visión basado en conocimiento experto (Figura 6-2).

Figura 6-2 Etapas del desarrollo de la Visión

A continuación, se detallan las actividades que formaron parte de cada paso:

6.3.1 Visión general

El horizonte 2050

Para desarrollar la visión, se tomó el año 2050 como horizonte. Éste se considera lo suficientemente lejano como para ver cambios sustanciales respecto a la situación actual. Además, ya serán las generaciones futuras las que estén a cargo del desarrollo de la ciudad y el ambiente. Este horizonte permite poder soñar sobre un futuro deseado que no es alcanzable a corto plazo. El año 2050 es frecuentemente utilizado en el desarrollo de planes de gestión, en los que se trabaja con escenarios climáticos y socio-económicos.

La directora del DAGMA entregó una visión sobre el desarrollo de la ciudad en relación al uso del recurso de agua subterránea, haciendo énfasis en el tipo de ciudad que visualiza para el futuro, con un manejo más sustentable del recurso, y una ciudad más verde e innovadora. Los principales puntos que se mencionaron se presentan a continuación:

Elementos claves de la visión

Cali 2050

- "La capital de la costa del Pacífico"
  La ventaja comparativa es
  - Recursos hídricos y naturales
  - Sostenibilidad
  - Crecimiento verde
  - Turismo sostenible
  - Servicios de salud de alta calidad
  - Espacios conectados verde/azul – grandes corredores
  - Conexión Cali-región
  - Industrias creativas
  - Centro de conocimiento
  - Ingresos sostenibles
- DAGMA: formas de trabajar
  - Integrales
  - Fluidas/flexibles
  - Descentralizadas
  - Facilitador en vez de controlador
  - Transparente
- Sentido de lo público, cuidar lo nuestro, orgullo

6.3.2 Taller participativo de espacialización de la visión con los profesionales del DAGMA

A modo de explorar, espacializar y visualizar extensamente cada uno de los aspectos de la visión, se trabajó en dos grupos con profesionales del DAGMA, cada uno enfocándose en detalle en ciertos aspectos de la visión general. La división de los grupos se hizo de manera que ambos grupos fueran complementarios. El grupo 1 se enfocó en el desarrollo verde de Santiago de Cali, priorizando el establecimiento de áreas de protección e infraestructura verde, mientras que

el grupo 2 se enfocó en el desarrollo de la ciudad como un polo de servicios turísticos e innovación.

En una primera instancia, cada grupo trabajó explorando como se materializarían cada uno de los aspectos indicados en la visión general, utilizando un mapa de Santiago de Cali. Es importante resaltar que se trata de una visión de lo que los participantes desean para el futuro de su ciudad y el acuífero, no de lo que existe actualmente, por lo que la factibilidad de implementación no es un aspecto relevante durante este ejercicio. En la Figura 6-3 y la Figura 6-4 se presentan los resultados de la primera parte del taller participativo. Si bien al comienzo los participantes se enfocaron en planes existentes y en la factibilidad de las distintas medidas que se proponían como parte de la visión, con el paso del tiempo lograron entender la relevancia de la visión. Es así como definieron que es lo que quieren para el manejo del acuífero y el desarrollo de la ciudad, y no lo que posible o probablemente acontecerá.

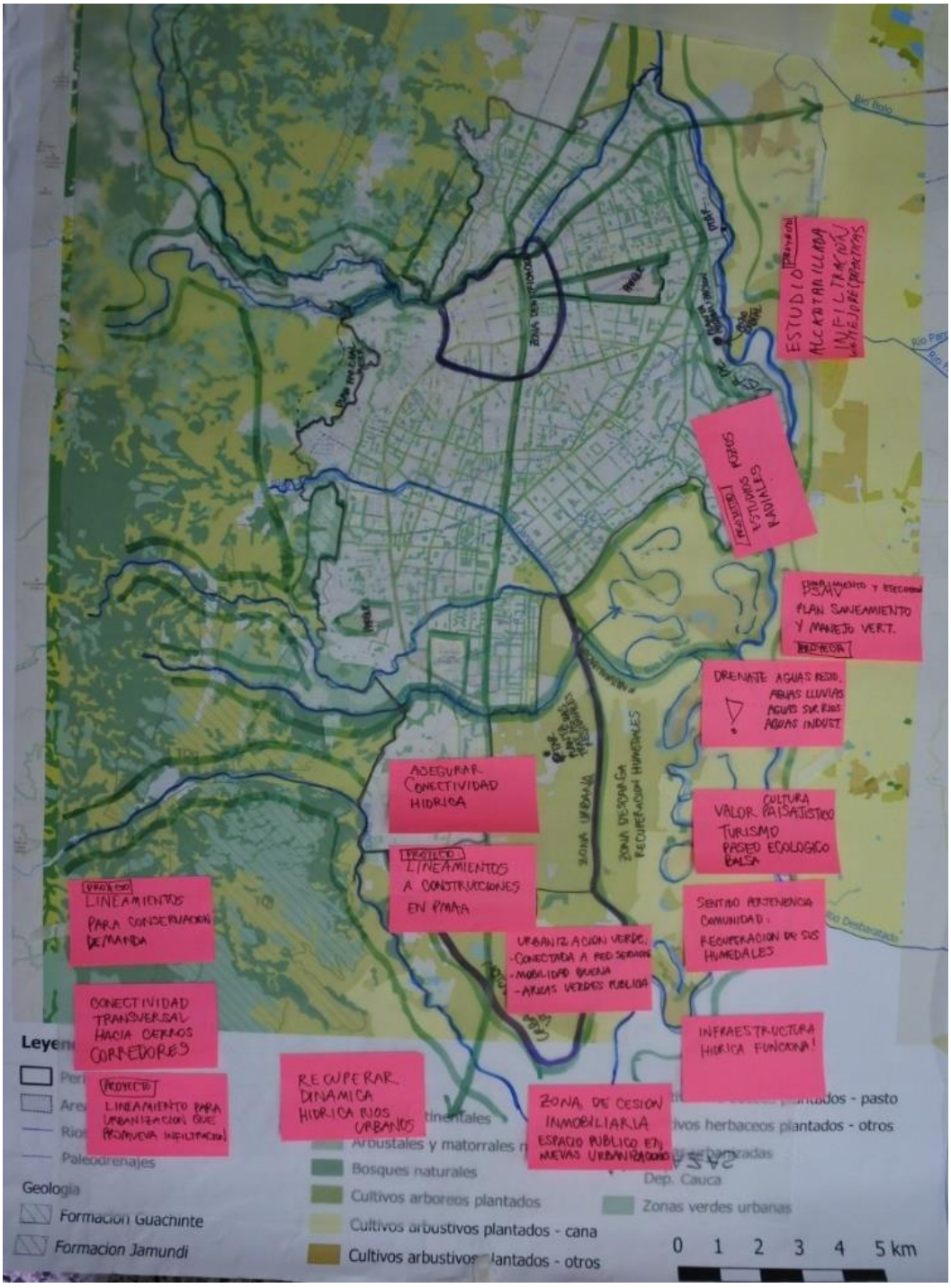


Figura 6-3 Grupo 1 - Desarrollo verde de Santiago de Cali.

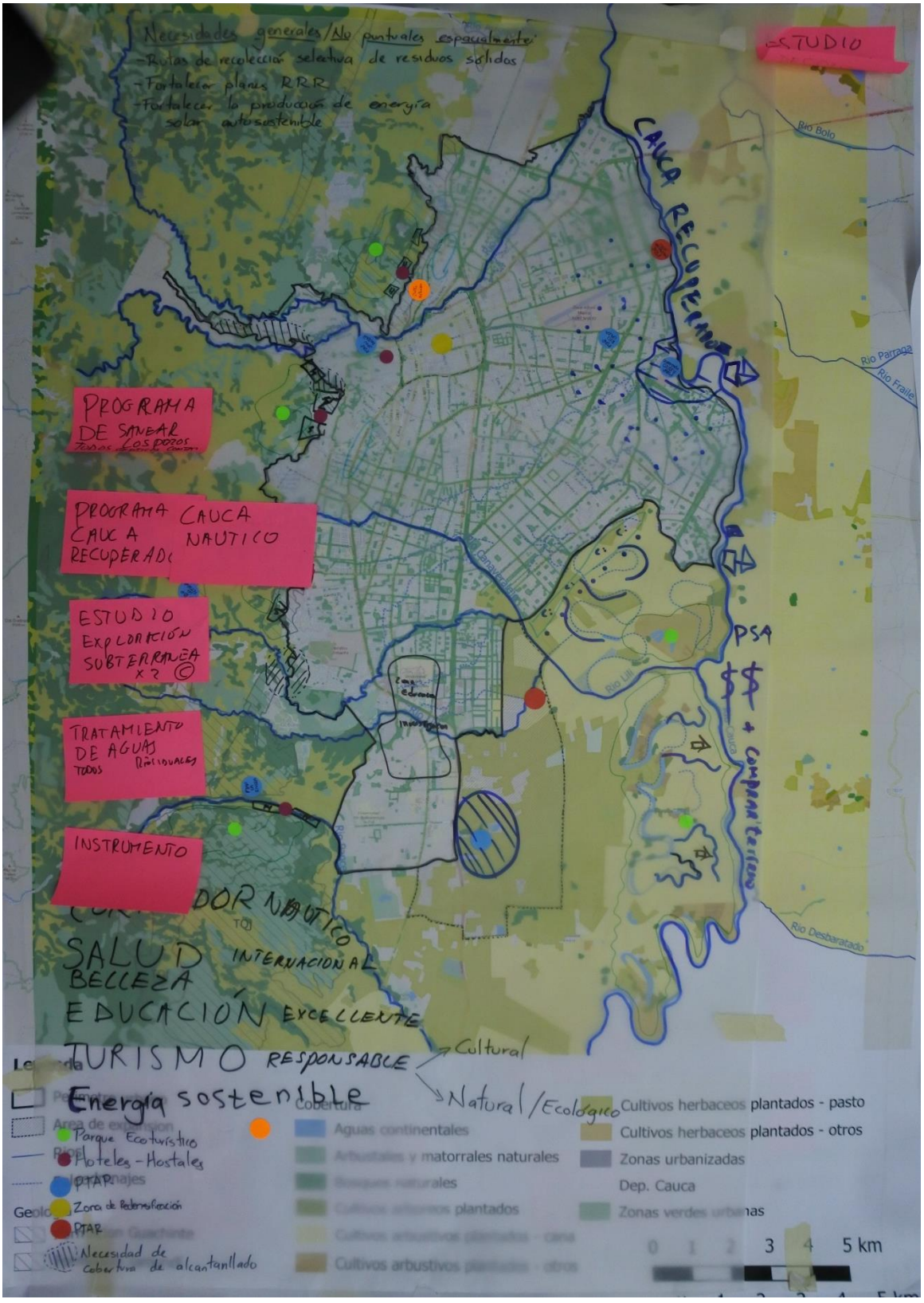


Figura 6-4 Grupo 2 - Desarrollo de Santiago de Cali como un polo de servicios turísticos e innovación.

Luego, los grupos se intercambiaron para enriquecer el trabajo de sus compañeros. De esta manera, el grupo 1, trabajó enriqueciendo el mapa de Santiago de Cali como polo de servicios turísticos y de innovación, mientras que el grupo 2 hizo lo mismo con el otro mapa. Los resultados de este segundo ejercicio se presentan en las siguientes imágenes (Figura 6-5 y Figura 6-6).

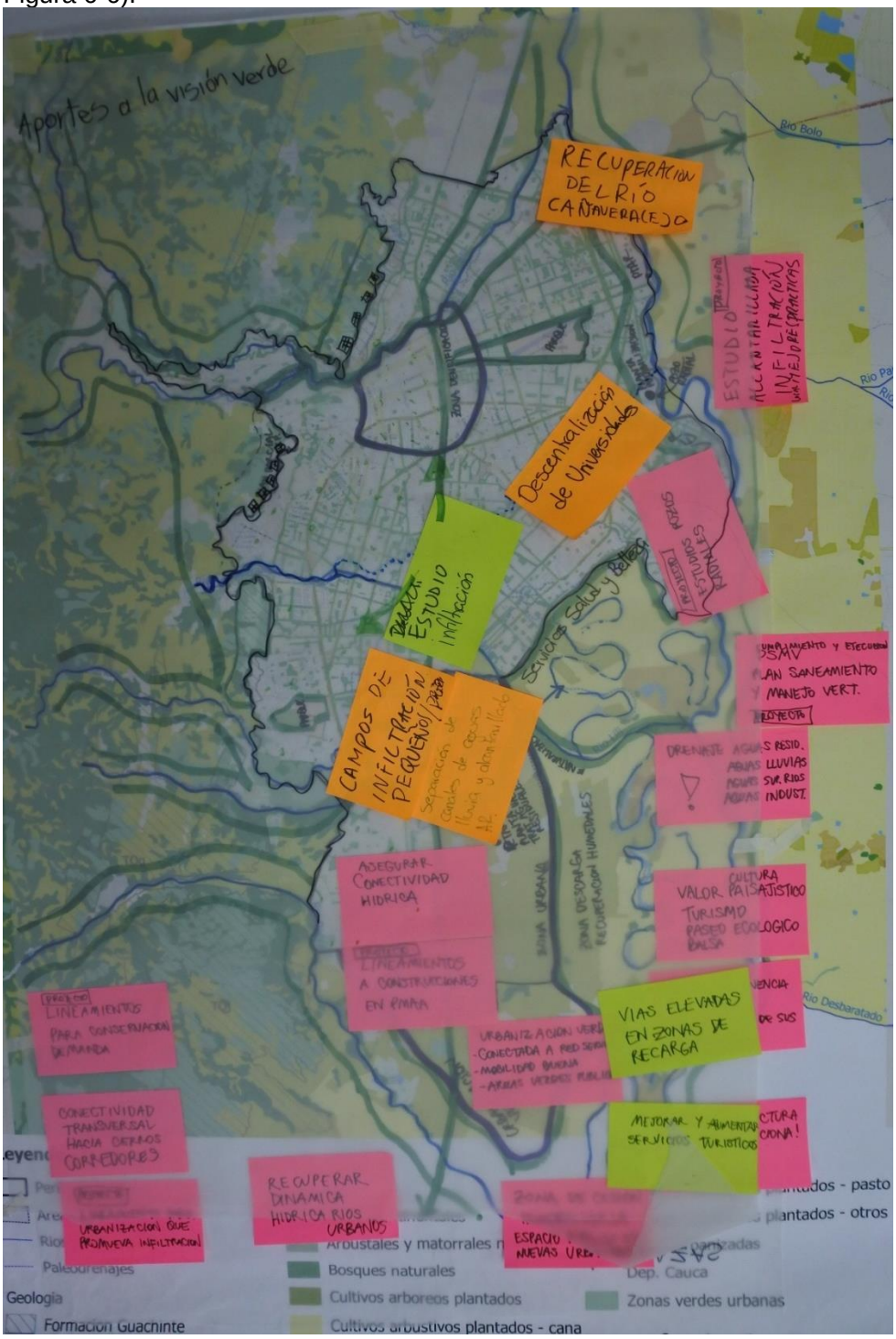


Figura 6-5 Grupo 2 - Enriquecimiento de Visión Desarrollo verde de Santiago de Cali.

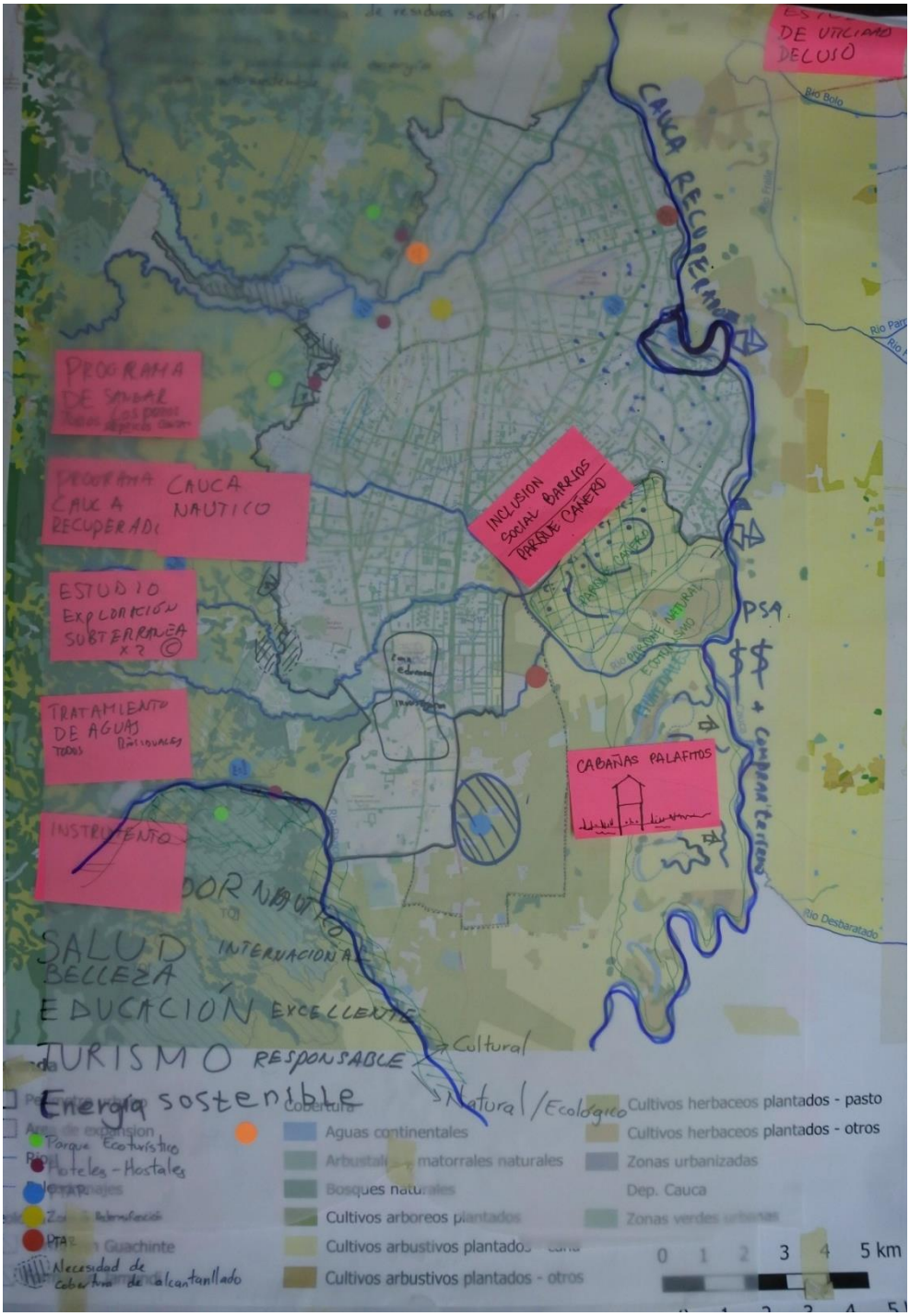


Figura 6-6 Grupo 1 - Enriquecimiento de Visión Desarrollo de Santiago de Cali como un polo de servicios turísticos e innovación.

El enriquecimiento de ambos mapas permitió ahondar en mayor detalle en algunos aspectos puntuales de interés para los actores, como la creación de pequeños campos de infiltración en el sur de la ciudad (Figura 6-5), y la inclusión social de barrios mediante un parque (Figura 6-6).

6.3.3 Conocimiento experto

Mediante conocimiento experto, se depuraron los resultados de los talleres participativos, cuidando de componer una narrativa, y de visualizarla mediante una imagen (Figura 6-7) que transmita los principales puntos de la visión. De acuerdo a esto, la visión para Santiago de Cali y el uso de su acuífero se ha formulado como la siguiente:

"En el año 2050 Santiago de Cali es la Capital del Pacífico. Cali es apreciada por la disponibilidad de recursos hídricos, así como por su buena gestión integral y sostenible de los mismos. Empresas e inversores reconocen la seguridad hídrica que les brinda Cali y esto los atrae a instalarse o invertir en la ciudad.

Es una ciudad verde, que trabaja y avanza en sostenibilidad en todo lo que tiene que ver con los recursos naturales, pero también con turismo y servicios. Cuenta con grandes corredores para garantizar la conexión entre espacios verdes y azules, lo que favorece el desarrollo de los ecosistemas en la ciudad y permite que las zonas verdes y los humedales se conviertan en espacios recreativos y atractivos que además son de gran importancia ecológica. Se desarrollan campos de infiltración cerca de los humedales para asegurar la conectividad hídrica entre el acuífero y los humedales. El inventario de humedales es actualizado y los lineamientos para su protección quedan integrados en los planes de la ciudad y de gestión del recurso. Se ha recuperado la dinámica hídrica de los ríos urbanos, eliminando los vertimientos líquidos y sólidos que los contaminan y en particular el río Cañaveralejo. El alcantarillado está renovado, y los canales de aguas lluvias y alcantarillado sanitario en la ciudad se mantienen separados y sin conexiones erradas.

El DAGMA ha crecido en varios sentidos como Autoridad Ambiental. Los recursos humanos y financieros son los necesarios para el funcionamiento óptimo de la entidad, que cuenta con una estructura administrativa robusta, efectiva y eficiente. El DAGMA trabaja de una forma transparente y coordinada con otras instituciones locales, regionales y nacionales, pero también a nivel interno. Los planes se desarrollan integrando el conocimiento de los diferentes grupos que forman la entidad, los cuales trabajan de forma fluida y flexible, para alcanzar los objetivos establecidos para la ciudad. El DAGMA se mueve por objetivos que abarcan varias temáticas relevantes, y no por tareas específicas que hay que cumplir. La posición adquirida es la de entidad facilitadora e incentivadora, y deja de ser vista como una entidad de control. Es una autoridad respetada por los usuarios y es reconocida por su buena gestión por la región y el gobierno nacional.

Los usuarios del recurso hídrico están más informados y se sienten parte de los planes de manejo del recurso, desarrollando así un sentido de lo público y de cuidar lo que es de todos. Se esfuerzan por cumplir la normativa y colaboran con los profesionales del DAGMA. Los ciudadanos y usuarios del recurso hídrico se sienten orgullosos de su ciudad y de la gestión que hace el DAGMA de los recursos naturales."

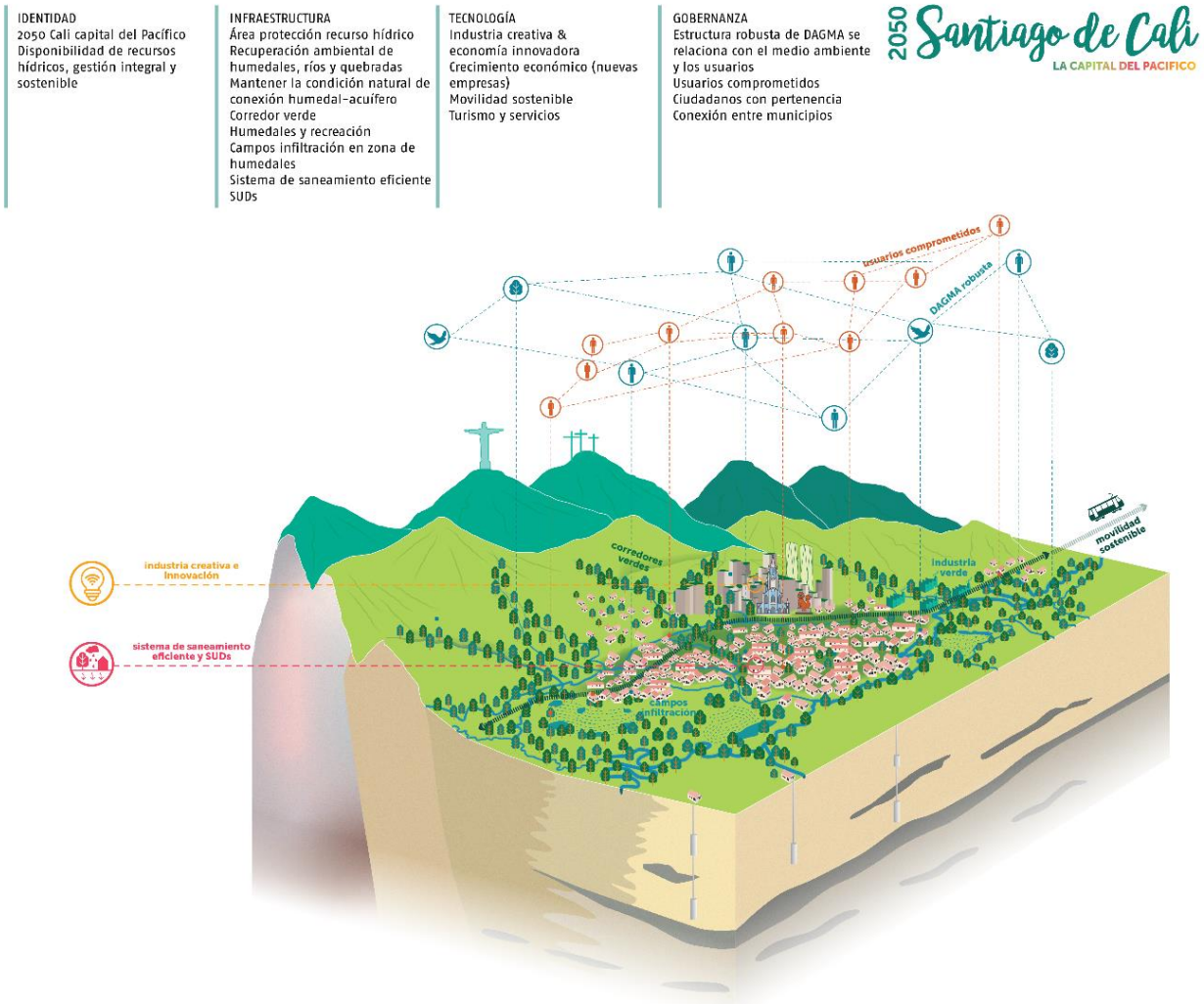


Figura 6-7 Imagen de la visión de la ciudad de Cali para el año 2050

6.4 Metodología y resultados de definición de líneas estratégicas, programas y proyectos

Una vez elaborada la visión para el futuro, se formularon las líneas estratégicas para el plan. Siguiendo los principios de planificación integral de recursos hídricos[3] se estableció una jerarquía consistente en i) definición de los objetivos que se destilan de la visión; ii) las estrategias para alcanzar los objetivos; iii) programas para componer las estrategias, y iv) proyectos para concretizar los programas a corto, mediano y largo plazo.

Los objetivos generales destilados de la visión con los que se tienen que alinear las líneas estratégicas son:

- Uso sostenible del recurso hídrico subterráneo
- Gestión integral de calidad, cantidad, oferta y demanda del recurso hídrico subterráneo para asegurar la disponibilidad del recurso para todos los usuarios incluyendo el ambiente
- Adaptación al cambio climático
- Fortalecimiento de todos los actores sociales y de las instituciones para garantizar los objetivos anteriores

Para guiar la definición de las líneas estratégicas, se evaluaron las líneas propuestas en la guía para la formulación del PMAA (MADS, 2014):

1) Generación de conocimiento e información para la gestión integral del recurso hídrico subterráneo y gestión de la demanda
2) Gestión de la oferta hídrica subterránea
3) Reducción de la contaminación del recurso hídrico subterráneo
4) Gobernanza y fortalecimiento institucional

Se considera que la línea estratégica de generación de conocimiento e información para la gestión integral del recurso hídrico es transversal a las líneas estratégicas restantes, por lo que se decidió incorporarla como parte de éstas. Además se consensuó incluir oferta y demanda en una sola línea estratégica para así abarcar mejor la gestión integral del recurso hídrico subterráneo.

Las líneas estratégicas definitivas para el presente PMAA son:

1) Gestión integral de la oferta y la demanda hídrica subterránea
2) Mantener y asegurar la calidad del recurso hídrico subterráneo
3) Fortalecer la capacidad institucional y de gobernanza del recurso hídrico subterráneo

La Figura 6-8 muestra las tres líneas y su relación con los objetivos destilados de la visión.

[3] *Vea p.e. el 'toolkit' sobre la GIRH del Global Water Partnership sobre planficacion integral a diferentes niveles (en Ingles): https://www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/Management-Instruments/Planning_for_IWRM/National_IWRM_plans/*

Figura 6-8 Líneas estratégicas que forman parte del PMAA (en los vértices del triángulo), y objetivos destilados de la visión (en el centro del triángulo)

A continuación, se presentan las 3 líneas estratégicas y los programas propuestos para cada una de ellas (Figura 6-9).

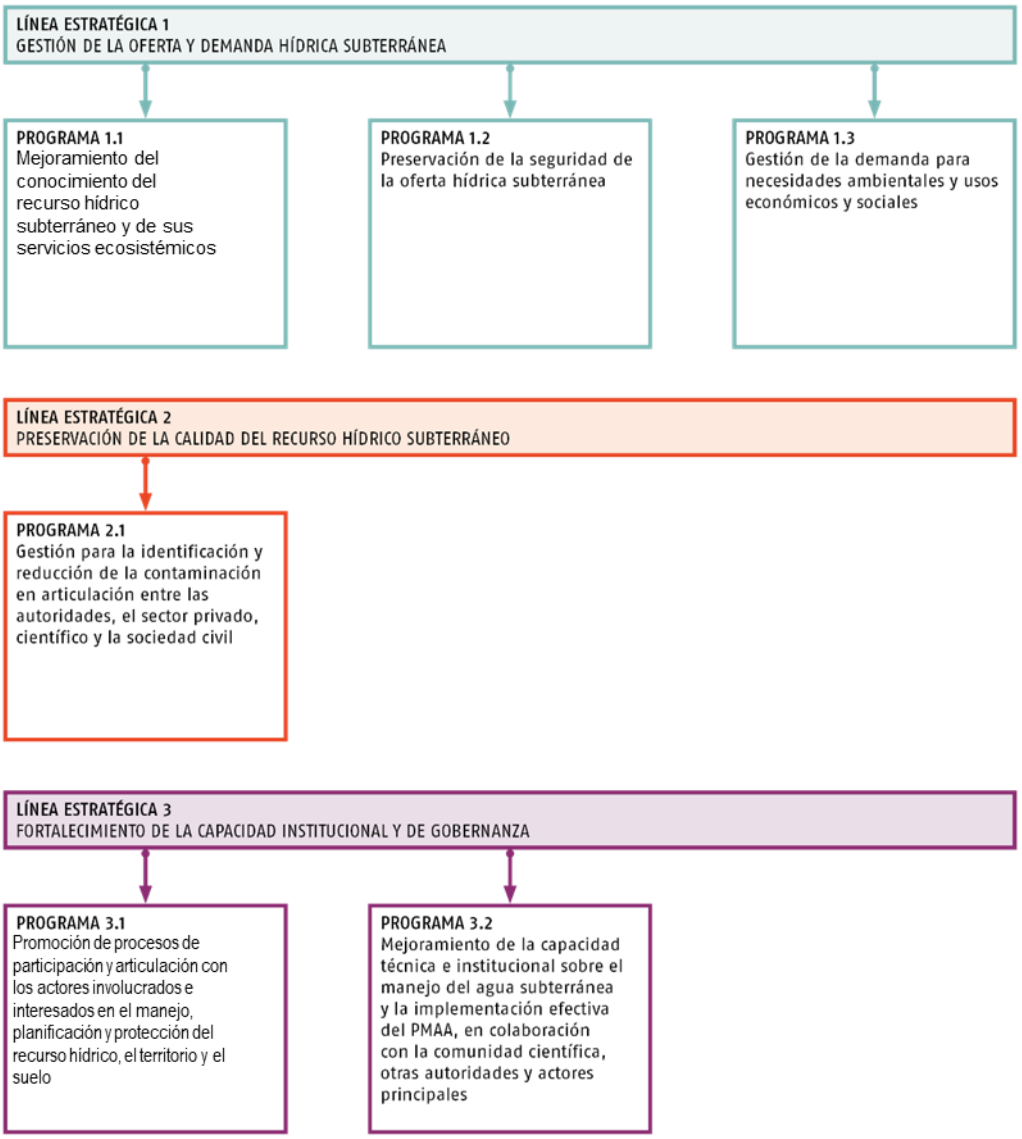


Figura 6-9 Líneas estratégicas y programas

6.4.1 Línea estratégica 1: Gestión de la oferta y la demanda hídrica subterránea

La meta principal es fortalecer la conservación de la cantidad de agua subterránea y mantener el balance entra la oferta y demanda sobre el agua subterránea en el territorio de Santiago de Cali. Se considera que, a largo plazo, el uso del agua subterránea no va a ser sustentable si no se mantiene un adecuado balance, En consecuencia, el medioambiente, los usuarios y los objetivos socioeconómicos se verán afectados. En esta línea se pretende trabajar en 3 programas, claramente conectados:

Programa 1.1: Mejoramiento del conocimiento del recurso hídrico subterráneo y de sus servicios ecosistémicos

En el programa 1.1 se distinguen los siguientes proyectos:

Proyecto 1.1.1: Evaluación de efectos en el acuífero por la construcción de pozos radiales para la filtración de lecho del rio Cauca en su margen Izquierda

Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico

Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema

Proyecto 1.1.4: Caracterización hidrogeológica de la Unidad C y evaluación de su potencial para el abastecimiento humano

A continuación se presentan las fichas para cada proyecto.

Línea estratégica 1: Gestión de la Oferta y Demanda hídrica subterránea
Programa 1.1: Mejoramiento del conocimiento del recurso hídrico subterráneo y de sus servicios ecosistémicos
Proyecto 1.1.1: Evaluación de efectos en el acuífero por la construcción de pozos radiales para la filtración de lecho del rio Cauca en su margen Izquierda
Línea Base
EMCALI y el Instituto Cinara de la Universidad del Valle llevaron a cabo un estudio piloto de investigación de filtración de lecho del río Cauca. Su propósito es conocer la potencialidad de usar el lecho y fondo del rio para filtrar y extraer agua del rio Cauca de mejor calidad y ser una alternativa para abastecer la ciudad de Cali, reduciendo los costos de tratamiento y el riesgo sanitario, debido a la variabilidad de la calidad del rio Cauca actualmente. El diagnóstico técnico resaltó la importancia de que en este piloto la fase de investigación tome el tiempo necesario, se hagan los ensayos de bombeo, la recopilación de datos y las simulaciones numéricas que se requieren para asegurar que el impacto del proyecto sobre los niveles de agua subterránea es aceptable a corto y a largo plazo y bajo diferentes escenarios climáticos, de crecimiento poblacional, y de usos del suelo. Este proyecto busca aumentar la escasa información existente sobre el impacto que los pozos radiales propuestos podrían tener sobre el acuífero.
Objetivo
Cuantificar la probabilidad de descensos de niveles en el acuífero debido al efecto de bombeo de pozos radiales y la relación con las estructuras y sistema ecosistémico cercanos
Actividades

1) Definir una propuesta detallada para la investigación con elementos técnicos para un estudio de factibilidad.
    a. Definir la metodología de análisis
        i. Utilizar el modelo numérico para modelar flujo de agua subterránea y los niveles del acuífero en un área cercana a los pozos radiales. Correr varios escenarios variando tanto parámetros del sistema acuífero y del río (conductancia del lecho del río, resistencia vertical de los primeros metros de acuífero hasta la profundidad en la que se encuentran los drenes), como variables de los pozos radiales (ubicación, número de pozos, número, longitud, profundidad y distribución de drenes horizontales, distancia al río, distancia entre pozos, caudal por pozo).
        ii. Considerar la necesidad de adaptar el modelo para que incluya pérdidas por fricción, rugosidad de la tubería, y diferentes tipos de flujo en los drenes radiales (laminar, transicional y turbulento) para poder determinar los descensos de niveles en los drenes. Con esta adaptación del modelo también se puede predecir con más precisión y bajo diferentes escenarios de diseño de los drenes, el origen del agua que está siendo bombeada.
        iii. Simular el agua bombeada por los pozos radiales con un método analítico multicapa, que pueda predecir el rendimiento del pozo y calcular el origen y el tiempo de residencia del agua que se bombea.
        iv. Con ambos métodos (modelo y método analítico) se puede cuantificar el volumen que se puede infiltrar del río, el caudal que se puede bombear de los pozos, los conos de descenso ocasionados por efecto de los pozos radiales tanto en los pozos como en el acuífero, el origen del agua y el tiempo de residencia. Dependiendo de los descensos que se consideren aceptables, pueden identificarse los rangos idóneos de las diferentes variables que definen el diseño del piloto (Actividad 3)
        v. Comparar los resultados de ambos análisis para asegurar la robustez de las conclusiones.
        vi. Determinar los parámetros de calidad del agua a monitorear, y evaluar las afectaciones de la calidad por la infiltración de agua del río. Además del monitoreo en campo, se recomienda utilizar los resultados del modelo numérico y del método analítico para evaluar las líneas de flujo y tiempos de residencia del agua subterránea y así poder predecir la calidad del agua que se extrae.

    b. Recolectar información sobre el sistema (de utilidad para el estudio de factibilidad y para la selección de un sitio para un ensayo piloto).
        i. Plantear rangos de incertidumbre para los parámetros del modelo que afectarán la interacción entre el acuífero y el río: transmisividad y espesor del acuífero, conductancia entre el lecho del río y el acuífero, resistencia vertical de los primeros metros de acuífero hasta la profundidad en la que se encuentran los drenes, diseño de los drenes, etc.
        ii. Realizar mediciones a campo (pruebas de bombeo, testificaciones geofísicas en perforaciones, estudios geofísicos en superficie, monitoreo en piezómetros instalados para el piloto) que permitan reducir la incertidumbre de dichos parámetros.

2) Identificar necesidades para el control y seguimiento a la extracción de caudales medios y altos. Diseñar una red de monitoreo de calidad y cantidad específica para evaluar los efectos del proyecto piloto. Identificar los puntos de agua cercanos al piloto y establecer un protocolo con los usuarios para poder dar seguimiento a las pruebas del piloto. De la misma forma, identificar si a largo plazo se espera la necesidad de actualizar las resoluciones existentes para poder dar seguimiento a las posibles afectaciones de los niveles y la calidad del agua causadas por el proyecto piloto de infiltración.

3) Seleccionar tramos de la franja para diseñar e implementar un ensayo piloto. Con base a los resultados de los escenarios modelados en la actividad 1a y de la información recolectada en la actividad 1b, puede escogerse la ubicación para el piloto y diseñarlo. Otros criterios para la selección de la ubicación y diseño del piloto son: ubicación planificada de los pozos radiales en el proyecto de EMCALI y Cinara, conflictos con otras infraestructuras en el subsuelo, permisos, acceso y seguridad, costos.

4) Implementar el piloto

5) Documentar el conocimiento generado sobre el acuífero en un informe que sea de utilidad para actores sociales involucrados en el proyecto de pozos radiales (EMCALI/CINARA)

Período de implementación (cronograma):
Año 1: Estudios preliminares (Actividad 1)
Años 2-6 (5 años): Estudio en sitio piloto
Año 7 (medio año): Cierre y recomendaciones.

Corto plazo (2021-2023)	Mediano plazo (2024 – 2027)	Largo plazo (2028 – 2030)
X	X	

Presupuesto: US$900.000 – US$1.400.000 - $5,000,000,000.oo

Productos

Producto: Evaluación del potencial para abastecimiento humano para Cali en tramos seleccionados en el área del municipio

Programa 1.1: Mejoramiento del conocimiento del recurso hídrico subterráneo y de sus servicios ecosistémicos

Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico.

Línea Base

El diagnóstico técnico determinó que la preservación de los conos aluviales de los ríos Pance y Cali es prioritaria para proteger la recarga del acuífero en su zona urbana. Allí, los dos componentes de la recarga son la recarga difusa y la que se da por infiltración en el cauce de los ríos y de las acequias. Podría también existir potencial de recarga a través de las formaciones terciarias de la Cordillera Occidental, en función de su nivel de conexión hidráulica con los depósitos cuaternarios de los conos aluviales a través de fracturas y del sistema de fallas. Dicha recarga no ha sido cuantificada y debe ser estudiada.
Por otro lado, existen humedales y madreviejas en las zonas de descarga, cuya conexión con el acuífero debe ser caracterizada para facilitar su manejo. Por estos motivos, se requiere profundizar el conocimiento generado en el diagnóstico técnico en cuanto a los flujos regionales y locales del agua subterránea en estas zonas prioritarias. El sistema es heterogéneo en cuanto a la presencia de formaciones geológicas, las cuales determinarán diferencias en el flujo y química de las aguas subterráneas. Por tanto, los estudios a campo para comprender procesos de recarga y descarga deben tener en cuenta dicha heterogeneidad, abarcando las formaciones geológicas más relevantes. Se recomienda que dichos estudios instalen pozos de observación de las aguas subterráneas y estaciones de medición de caudal y niveles en tramos de ríos, analizando también la hidrogeoquímica del agua superficial y subterránea.

El presente proyecto propone caracterizar la recarga del acuífero (dirección de flujo y cantidad) en los conos de los ríos Pance y Cali, tanto difusa como a través de dichos ríos. Se analiza también el proceso de descarga a humedales y madreviejas, cuya protección es central en la visión del PMAA.

Objetivo

"Mejorar la comprensión de la interacción del acuífero con ríos y ecosistemas dependientes para facilitar la gestión conjunta con aguas superficiales. Cuantificar componentes de la recarga subterránea desconocidos"
Actividades
1) Establecer pozos de observación y estaciones de medición para toma de datos a campo (a ser utilizadas tanto para evaluar recarga por ladera en Actividad 2, como la interacción con aguas superficiales en la Actividad 3). a. Diseñar el estudio de campo, seleccionando puntos de instalación de pozos y monitoreo en las cuencas de Pance y Cali i. Subdividir cada cuenca en áreas homogéneas en cuanto a variables control (gradiente, zona recarga/descarga, tipo de suelo, recarga, profundidad del agua subterránea). Cada área homogénea debería ser caracterizada en campo (Punto 1 b) por medio de mediciones de niveles, caudales e hidrogeoquímica. ii. Incluir en la zona de estudio (cuencas Pance y/o Cali) al menos las formaciones cuaternarias correspondientes a los conos aluviales y las formaciones terciarias iii. Escoger las áreas que se van a estudiar iv. En caso de instalar una zona piloto en el cono aluvial del río Cali: Generar un mapa de suelos y subsuelo bajo zonas duras para la ciudad de Cali. Caracterizar textura del suelo y permeabilidad (mm/segundo) en los primeros 2 m, por medio de mediciones a campo. b. Instalar estaciones de monitoreo y realizar mediciones de parámetros hidráulicos i. Instalar pozos de monitoreo del acuífero (al menos dos pozos por área homogénea o formación hidrogeológica, uno cercano al río y otro fuera de la influencia del mismo). ii. Obtener allí parámetros hidrogeológicos por medio de pruebas de bombeo (conductividad hidráulica o permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento) y columna litológica. Establecer una longitud de filtro del pozo de tres metros, aproximadamente 1.5 m por encima y 1.5 metros por debajo del rango de variación estacional del nivel freático. iii. Instalar estaciones de medición de niveles y caudal en ríos (definiendo al menos un trecho por área homogénea o formación hidrogeológica) y medir parámetros del río en cada trecho. c. Realizar mediciones para el balance hídrico i. Medir niveles de agua subterránea en pozos de monitoreo y niveles y caudales del río en diferentes trechos del río. Debería escogerse un trecho de río por área homogénea dentro de la cuenca (según actividad a. i.). En cada trecho, instalar dos pozos de monitoreo: uno cerca y otro lejos del río ii. Cuantificar las otras variables hidrometeorológicas (ver Actividad 2). iii. Cuantificar las pérdidas por tuberías iv. Tomar muestras de agua subterránea para caracterización hidrogeoquímica e isotópica a fin de determinar la edad del agua (y con ella origen de la recarga) y la conexión entre formaciones geológicas terciarias y cuaternarias. 2) Caracterizar la recarga por ladera (priorizar cono aluvial del río Pance y, posteriormente, cono del río Cali) por medio de trazadores ambientales y de balance hídrico. a. Por medio de análisis químicos

i. Caracterizar la hidrogeoquímica de formaciones terciarias y cuaternarias analizando parámetros químicos en muestras de agua subterránea de cada formación geológica. Contrastar, entre formaciones: magnesio, bicarbonato, sulfato, sodio, potasio, nitrato, cloruro, silicio, relaciones iónicas sodio/cloruro, sulfato/calcio, calcio/magnesio, bicarbonato/suma iones.
ii. Complementar análisis de hidrogeoquímica con análisis de isótopos de oxígeno e hidrógeno para determinar el origen de la recarga y el nivel de conectividad entre formaciones geológicas.

b. Por medio de balance hídrico
   i. Realizar el balance hídrico para cada área homogénea definida en Actividad 1 (por separado para las cuencas de Pance y Cali). Obtener valores puntuales de recarga (R), extrapolables dentro de cada área homogénea, a partir de la ecuación de balance hídrico: R= P + Q(sw on) – Ro – Etsw – Etuz – DeltaSsw – DeltaSuz
   Se recomienda hacer el balance en mm/día o mm/año. La escala debería ser: área homogénea de la cuenca Pance o Cali. La medición se recomienda diaria y después integrada anualmente.
   ii. Componentes del balance: precipitación (P), flujo de agua superficial hacia el área por medio de tributarios (Qsw on) y escurrimiento fuera (Ro), evapotranspiración en la zona no saturada (ETuz) y en cuerpos de agua (ETsw), variación del almacenamiento en ríos (Delta Ssw) y en la zona no saturada (Delta Suz).
   iii. Es importante cuantificar las pérdidas a través del sistema acueductos, las cuales pueden darse bajo la superficie (debajo de los 2m) como un caudal constante que se infiltra a través de la zona no saturada hasta alcanzar el acuífero.
   iv. Se recomienda instalar lisímetros para validar los resultados del balance de agua en el suelo).

La obtención de un valor de recarga por medio del balance de cuenca se puede reemplazar o complementar con:

v. El método de fluctuación del nivel de agua subterránea para cuantificación de la recarga. El método, válido para acuíferos no confinados, requiere conocer el rendimiento específico (specific yield) del acuífero y obtener series temporales diarias del nivel freático, en zonas no afectadas por bombeo. Instalar sensores de medición continua de niveles en pozos seleccionados para obtener mediciones diarias.
vi. La medición de trazadores ambientales (cloruros, Carbono 13-14), que permite cuantificar la recarga a partir de edad del agua subterránea en un perfil de profundidad. Las muestras deberían tomarse caudal abajo de cada formación geológica, ya que la medición puntual integra las zonas gradiente arriba de donde se realiza la medición vertical. Se requiere la instalación de varios pozos con filtros cortos, cada uno a una profundidad distinta, y el conocimiento de la porosidad y geometría del acuífero.

3) Caracterizar la recarga y descarga por interacción acuífero-agua superficial en los conos aluviales de Pance y Cali (balance hídrico basado en niveles del río) y de análisis de trazadores ambientales e hidrogeoquímica.
   a. Seleccionar trechos del río para evaluar la recarga por ríos perdedores (en cada área homogénea definida en la Actividad 1) representativos de las variables control: longitud y ancho (sección) del trecho del río, conductividad hidráulica y espesor de los sedimentos del lecho del río, duración y tasa del flujo del río, nivel del río, nivel del agua subterránea.

b. Utilizar mediciones de niveles y caudales en diferentes tramos del río (un tramo por área homogénea dentro de la cuenca) calculando la recarga a través del método de medición de caudal, tal que:
R (recarga) = QAArriba – QAAbajo + Suma Qentra – Suma Qsale – E – DeltaS/Deltat
Donde:
Q= caudal
QAArriba/Abajo= Flujo aguas arriba/abajo
SumaQentra/sale= Flujo de arroyos tributarios, efluentes urbanos e irrigación
E= Evaporación de cuerpos superficiales de agua o lechos de río
DeltaS= cambio en almacenamiento en el canal y en la zona no saturada.
Nota: Las estimaciones son más confiables donde la profundidad al agua subterránea es igual o mayor a la sección del canal.

Se recomienda complementar la estimación de la recarga obtenida con el método de medición de caudal, por medio de:

c. Comparación de niveles en el río y en pozos de monitoreo cercanos
d. Mediciones a campo con “seepage meters” para cuantificar volúmenes de infiltración a través del lecho. El método requiere réplicas para estimación del error, y mediciones puntuales en diferentes ubicaciones. Mediciones diarias o de varios días son integradas para obtener un valor anual.

4) Evaluar interacción acuífero-aguas superficiales en dos humedales en zonas de descarga
   a. Instalación de estaciones de monitoreo, mediciones y procesamiento de datos
      i. Instalar pozos de observación en la cercanía de humedales seleccionados, y divers en humedales (medición diaria de niveles).
      ii. Tomar muestras de agua subterránea y superficial (pares) para determinar conexión del acuífero con humedales, por comparación de sus características hidrogeoquímicas.

   b. Análisis de datos y modelación
      i. Determinar gradientes hidráulicos estacionales (al menos uno en época seca y otro en época húmeda) comparando diferencia de niveles entre humedal y aguas subterráneas en pozos de monitoreo cercanos.
      ii. Comparar características hidrogeoquímicas entre agua superficial y agua subterránea vecina: tipo de agua, iones mayoritarios, silicio, relaciones iónicas sodio/cloruro, sulfato/calcio, calcio/magnesio, bicarbonato/suma iones.
      iii. Evaluar la necesidad de analizar trazadores ambientales (cloruros) e isótopos de oxígeno e hidrógeno para caracterizar el origen del agua (precipitación, agua subterránea) y la conectividad entre los humedales y el acuífero por medio del gradiente hidráulico y la conductancia del lecho.
      iv. Adaptar el modelo numérico para modelar los humedales. Utilizar mediciones de parámetros hidráulicos del río y el acuífero, junto con datos de niveles en humedales y aguas subterráneas, para recalibrar el modelo numérico. Evaluar distintos escenarios de extracción de agua subterránea o de cambios en los usos del suelo para determinar el impacto sobre ecosistemas dependientes

5) Validar el balance hidrometeorológico (cuenca, mm/día y mm/año) y el cálculo de la recarga en el modelo numérico, en base a las mediciones de campo. Recalibrar parámetros del modelo numérico (recarga, paquete RIV, DRN).

Período de implementación (cronograma): Año 1: Diseño e instalación de sitios de monitoreo Actividad 1.a, 1.b, 4.a (9 meses) Años 2-6: Toma de datos en sitios de monitoreo Actividad 1.c y 4.a (5 años) Año 2: Análisis de recarga por química Actividad 2.a (6 meses). Repetir si se considera necesario Año 3-7: Análisis recarga por balance hídrico Actividades 2.b y 3 (5 años). Repetir si se obtiene presupuesto. Año 3-7: Análisis de interacción entre acuífero y humedales Actividad 4.b (5 años). Repetir si se obtiene presupuesto. Año 8: Recalibración del modelo numérico (3 meses).

Corto plazo (2021-2023)	**Mediano plazo (2024 – 2027)**	**Largo plazo (2028 – 2030)**
X	**X**	**x**

Presupuesto: US$250.000 – $1,250,000,000.oo
Productos
Producto: Estimación de la recarga proveniente de los ríos Cali y Pance - Evaluación del proceso de interacción de dos humedales seleccionados en zonas de descarga con el acuífero - Evaluación de los procesos de recarga al acuífero por flujo lateral proveniente de la cordillera occidental - Mapa de suelo y subsuelo bajo las zonas duras para Cali

Línea estratégica 1: Gestión de la Oferta y Demanda hídrica subterránea
Programa 1.1: Mejoramiento del conocimiento del recurso hídrico subterráneo y de sus servicios ecosistémicos
Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema acuífero
Línea Base
El DAGMA cuenta actualmente con una red de monitoreo de 56 piezómetros (construidos entre 2010 y 2014) de entre 10 y 30 m de profundidad. En ellos, se evalúa la variación de los niveles piezométricos y la calidad del agua subterránea del acuífero en la zona urbana. La distribución actual de los pozos de monitoreo se considera aceptable en cuanto a densidad y cobertura de la zona urbana, pero tiene algunas faltas importantes. Las recomendaciones para mejorar la red para monitoreo son: -Extender la red de monitoreo, desde el piedemonte hasta el río Cauca a la altura de los conos de Pance y Lili-Meléndez, a fin de monitorear los niveles cerca de la ladera, y posibles impactos de actividades potencialmente contaminantes (por ejemplo: botadero Navarro) y de la posible expansión del área urbana. -Realizar una única campaña de nivelación topográfica y verificar la nivelación resultante con el MDE de detalle, para garantizar que no se cometen errores que inducen a malas interpretaciones sobre la dirección de flujo y los probables impactos del uso de agua subterránea. -Reforzar el monitoreo de la calidad gradiente debajo de las principales fuentes contaminantes identificadas: rupturas en el sistema de alcantarillado (especialmente en la zona centro y norte de la ciudad alrededor del río Cali), infiltración de agua contaminada por ríos perdedores en zonas de recarga, tanques subterráneos para almacenamiento de combustible o de componentes requeridos por la industria, cementerios y minas ubicados en zonas de recarga. -Monitorear regularmente parámetros clave, mínimamente: conductividad eléctrica, nitratos, coliformes totales y coliformes fecales, DQO, DBO y COT, cloruros, nitritos, hidrocarburos aromáticos y totales. Se recomienda dar prioridad al monitoreo de zonas de recarga y zonas de descarga cercanas a ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (por ejemplo: área comprendida entre los ríos Cañaveralejo y Meléndez, paleodrenaje del río Cañaveralejo).
Objetivo

"Fortalecer la red de monitoreo existente con el objetivo de conocer mejor elementos del sistema y zonas no estudiadas hasta el momento" Nota: Todos los pozos de la red cumplirán, idealmente, objetivos de monitoreo tanto de cantidad (niveles) como de calidad.
Actividades
1) Construir nuevos piezómetros en la red. Siguiendo las recomendaciones del diagnóstico técnico (línea base), reforzar la red de monitoreo en zonas donde falta información, zonas de ladera y de futura urbanización. Seguir las siguientes recomendaciones generales: a. Diseño de la distribución espacial de los pozos i. Aplicar una metodología de triangulación para determinar la densidad de la red, considerando 1 punto por cada km2 para una red de monitoreo local. ii. La densidad de la red de monitoreo debe ser mayor allí donde existe mayor variabilidad de las variables que controlan los niveles del acuífero. Algunas variables control varían tanto espacial como temporalmente (precipitación, interacción con aguas superficiales, bombeo, condiciones de frontera, patrones espaciales y temporales de recarga y descarga), otras varían sólo espacialmente (estructura del acuífero y los parámetros hidrogeológicos como conductividad hidráulica o permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento). Se pueden construir variogramas y correlogramas para sistematizar el diseño de la red de monitoreo con base a dichas fuentes de variación. Los puntos deberán ser más densos allí donde exista mayor variación espacial de las variables control, y las mediciones más frecuentes allí donde exista mayor variación temporal. iii. La red de monitoreo de calidad puede ser más densa gradiente arriba de zonas que desea proteger (ecosistemas priorizados, zonas de extracción priorizadas, por ejemplo, para consumo humano colectivo). iv. Instalar al menos un pozo en cada formación geológica y cubrir con la red zonas de recarga (conos aluviales, formaciones terciarias) y zonas de descarga. Utilizar los mapas hidrogeológicos y resultados del modelo numérico en el diagnóstico técnico para una primera delimitación. v. Tener en cuenta los lineamientos del Protocolo Nacional propuesto por el IDEAM para redes de monitoreo para: distancia máxima entre pozos, ubicación en zonas libres de influencia de cambios antropogénicos. b. Instalación de pozos de monitoreo, con las siguientes características como recomendación: i. Cada nuevo pozo de la red debe tener un registro de sus parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica o permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento), columna litoestratigráfica y detalles del diseño. ii. El filtro de cada pozo debería estar abierto exclusivamente en la Unidad A o Unidad C del acuífero, a fin de obtener datos que permitan caracterizar cada unidad. iii. Para la Unidad A, instalar pozos de distintas profundidades: pozos con filtro en los primeros 25 m de acuífero tendrán mayor influencia antrópica. Pozos con filtro debajo de los 25 m caracterizan condiciones más naturales del acuífero, ya que podrían estar menos afectados por el efecto de galerías (someras y profundas), recarga y drenaje de tuberías, bombeos someros y procesos de contaminación en superficie. iv. La longitud del filtro en acuíferos libres debería ser 1.5 m encima y debajo del nivel de agua esperado según el rango de variación estacional, en tubería PVC de 50.8 mm de diámetro (IDEAM, 2013).

v. Tener en cuenta los lineamientos del Protocolo Nacional propuesto por el IDEAM para redes de monitoreo en cuanto a: georreferenciación, nivelación, disposiciones sanitarias, definición de zonas de protección, generación de ficha para base de datos.
vi. Procesar los datos medidos a campo y almacenarlos en una base de dato para su consulta y posterior estudio.

c. Articulación con otros proyectos
i. Tomar en cuenta los objetivos del "Proyecto 1.1.4: Caracterización hidrogeológica de la Unidad C y evaluación de su potencial para el abastecimiento humano". Incorporar pozos a la red de monitoreo que permitan monitorear el estado del acuífero en la Unidad C.
ii. Articular el diseño de la red con los objetivos y productos del Proyecto 1.1.4 de zonificación del riesgo de contaminación.

2) Instrumentación en puntos priorizados para medición de niveles, CE y pH. En cuanto a la medición continua de niveles, determinar los puntos prioritarios para la ubicación de sensores de medición continua e instalar los sensores.

3) Realizar una única campaña de nivelación topográfica bajo un sistema único de referencia (coordinación con la CVC) y verificar la nivelación resultante con el MDE de detalle

4) Elaborar un protocolo de medición, mantenimiento, control y seguimiento de la red, detallando la periodicidad y parámetros a muestrear. Tomar en cuenta las siguientes consideraciones:
- Analizar datos disponibles de los pozos (medidos a campo durante Actividad 1, y disponibles para pozos de monitoreo anteriores): litología, parámetros hidráulicos, cercanía a fuentes potenciales de contaminación. Tener en cuenta dichas características al diseñar el protocolo.
- Los muestreos de niveles (cantidad) deben realizarse al menos dos veces al año, de manera sistemática, registrando niveles estáticos para la estación húmeda y la estación seca.
- Los muestreos de calidad deben realizarse una vez por año. Medir al menos conductividad eléctrica y pH. Recomendable medir, además: nitratos, coliformes totales y coliformes fecales, DQO, DBO y COT, cloruros, nitritos, hidrocarburos aromáticos y totales.
- Los datos tomados a campo deberán ser registrados en formato digital e incorporados a una base de datos que respete los lineamientos del SIRH. La estructura de la base de datos deberá facilitar el posterior procesamiento y análisis para la detección de tendencias (tipo y magnitud), la identificación de fluctuaciones periódicas y la estimación de valores medios, caracterizando en cada caso estructuras de correlación y desvío estándar.
- El protocolo caracterizará y asignará recursos (humanos y económicos) a los siguientes elementos: equipo y personal, implementación y mantenimiento de la red, observación y toma de muestras, análisis de muestras, almacenamiento y procesamiento de datos.

5) Actividades de monitoreo: medición de variables a campo, procesamiento de datos, consulta y análisis de datos según lo requieran los otros proyectos del PMAA y procesos del DAGMA.

Período de implementación (cronograma):
Año 1: Diseño e instalación de los pozos de la red de monitoreo, campaña de nivelación topográfica Actividades 1 y 3 (1 año)
Año 2: Instrumentación en puntos priorizados, diseño de un protocolo de monitoreo Actividades 2 y 4.
Años 2-10: Monitoreo.

Corto plazo (2021-2023)	Mediano plazo = (2024 – 2027)	Largo plazo = (2028 – 2030)
X	X	x

Presupuesto: US$100.000 – 400.000 (dependiendo de la cantidad de piezómetros en cada Unidad) – 2,000,000.oo
Productos
Productos: Red de monitoreo de cantidad y calidad del agua subterránea fortalecida; Base de datos de información hidrogeológica complementada con columnas litológicas; mediciones puntuales de parámetros hidráulicos.

Línea estratégica 1: Gestión de la Oferta y Demanda hídrica subterránea
Programa 1.1: Mejoramiento del conocimiento del recurso hídrico subterráneo y de sus servicios ecosistémicos
Proyecto 1.1.4: Caracterización hidrogeológica de la Unidad C y evaluación de su potencial para el abastecimiento humano.
Línea Base
La Unidad C del acuífero Valle del Cauca es considerada, a nivel regional, una reserva estratégica de agua de excelente calidad, con prioridad de uso para el abastecimiento humano. Durante el diagnóstico técnico del PMAA, se ha caracterizado la Unidad C mediante la interpolación de datos disponibles (columnas litológicas, pruebas de bombeo). Sin embargo, se ha constatado que no se dispone de suficientes columnas litológicas profundas (que lleguen a la base hidrogeológica) y tampoco de suficientes datos de propiedades hidráulicas ya que la mayoría de los pozos están abiertos en varias unidades acuíferas. Se necesita conocer mejor la Unidad C para lograr una correcta caracterización de su reserva disponible, para lo cual es indispensable la estimación de parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica, la transmisividad y la capacidad específica, y su variabilidad en el espacio. Estos parámetros pueden estimarse mediante la obtención de nuevas columnas litológicas en las distintas formaciones geológicas y/o pruebas de bombeo en pozos abiertos sólo en la Unidad C. Se recomienda, además, caracterizar los procesos de recarga y descarga estudiando la hidrogeoquímica de fondo y los gradientes hidráulicos observados a campo.
Objetivo
"Mejorar el conocimiento de la unidad C para una mejor gestión futura" Articular las actividades de este proyecto con el PMAA Valle.
Actividades
1) Instalar pozos a ser utilizados en la caracterización de la Unidad C, para obtención de muestras (análisis químicos) y medición de niveles y parámetros hidrogeológicos. a. Selección de la ubicación de pozos e instalación. Se recomienda: i. En la distribución espacial de los pozos deberán verse representadas las zonas de recarga y descarga, así como las distintas formaciones geológicas del acuífero. Utilizar los mapas hidrogeológicos y resultados del modelo numérico en el diagnóstico técnico para una primera delimitación. ii. Priorizar la perforación de pozos y obtención de columnas litológicas en los conos aluviales cerca de la zona de ladera, donde hoy se posee escasa información sobre la morfología y características hidrogeológicas de las Unidades B y C. Realizar estudios geofísicos (sísmica) para determinar la geometría de la Unidad C en las zonas de ladera. iii. Cada pozo perforado deberá tener un registro de sus parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica o permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, capacidad específica), columna litoestratigráfica y detalles del diseño del pozo.

iv. Allí donde existe diferenciación entre Unidad A y Unidad C (confinamiento del acuífero), instalar piezómetros dobles que permitan determinar dirección y volumen de flujos de intercambio entre ambas unidades. Ya que la Unidad A y C poseen diferentes profundidades, niveles piezométricos y composición química, para su estudio se deberán hacer perforaciones de pequeño diámetro y llegar así a cada acuífero. Estas perforaciones pueden estar separadas sólo de unos metros.
v. Los pozos de observación deberán estar ubicados a cierta distancia de los pozos de bombeo para hacer pruebas de bombeo, y estar abiertos sólo en la Unidad C.
vi. En porciones libres (no confinadas) del acuífero (donde no existe diferenciación de la Unidad A y C), la longitud del filtro debería ser 1.5 m encima y debajo del nivel de agua esperado según el rango de variación estacional, en tubería PVC de 50.8 mm de diámetro (IDEAM, 2013). En porciones confinadas del acuífero, el filtro debería encontrarse totalmente por debajo del piso de la Unidad B. Se deberá examinar la columna liotestratigráfica para garantizar que la totalidad del filtro se encuentre por debajo de la Unidad B. En la llanura aluvial del río Cauca, esto será probablemente por debajo de los 130 m de profundidad.

b. Toma de datos y muestras
i. Medir en cada pozo nivel piezométrico dos veces por año, durante cinco años, en lo posible tanto de la Unidad C como de la Unidad A (piezómetros dobles).
ii. Tomar muestras y medir parámetros de hidrogeoquímica de fondo: CE, pH, magnesio, bicarbonato, sulfato, sodio, potasio, nitrato, cloruro, silicio, relaciones iónicas sodio/cloruro, sulfato/calcio, calcio/magnesio, bicarbonato/suma de iones.
iii. En las zonas de ladera donde no existe diferenciación entre Unidad A y Unidad C, instalar sensores de medición continua en los pozos de monitoreo que permitan cuantificar la recarga por el método de fluctuación del nivel de aguas subterráneas.
iv. Los pozos serán incorporados a la red de monitoreo (Proyecto 1.1.3) y seguirán su protocolo para monitoreo a largo plazo.

2) Generar la línea base de calidad e hidrogeoquímica de la unidad C.

a. Construir para cada parámetro químico mapas de mediciones puntuales, y de interpolación (por ejemplo: por medio de la construcción de un variograma y la posterior el posterior uso del Kriging). De particular utilidad es la interpretación de la distribución espacial de los iones Na+, Ca2+ (y su relación Na/Ca), HCO3-, y la relación entre CE y HCO3-.
b. Realizar campañas de medición de todos los pozos en un único año y estación (húmeda o seca). Una primera campaña de medición de parámetros químicos brindará la caracterización inicial de la hidrogeoquímica de fondo. La obtención de muestras en varios años brindará valores promedio y desvío estándar, robusteciendo el conocimiento del sistema acuífero.

3) Evaluar procesos y tiempos de recarga de la unidad C.

a. A partir de la información obtenida en la caracterización hidrogeoquímica, utilizar los mapas de valores interpolados y la información de correlaciones espaciales (variograma) para validar las hipótesis asociadas al modelo conceptual de flujo subterráneo en la Unidad C y la edad del agua. Minerales asociados a la disolución de silicatos de sodio deberían aumentar desde las zonas de recarga a las de descarga.
b. Complementar el análisis de hidrogeoquímica de fondo con análisis de isótopos de oxígeno e hidrógeno, para caracterizar el origen de la recarga y el nivel de conectividad entre formaciones geológicas.

c. Caracterizar gradientes hidráulicos entre Unidad A y Unidad C, a fin de cuantificar flujos de intercambio entre ambas unidades acuíferas.
d. Cuantificar la recarga por el método de fluctuación del nivel de aguas subterráneas en las zonas de ladera donde no existe diferenciación entre Unidad A y Unidad C. El método requiere conocer el rendimiento específico del acuífero y contar con mediciones diarias de niveles.
e. Actualizar parámetros hidrogeológicos utilizados en el modelo numérico y recalibrar. Mejorar resultados en cuanto a sistemas de flujo, zonas y volúmenes de recarga y descarga en la Unidad C. Evaluar distintos escenarios de recarga difusa y demanda de agua subterránea, y su impacto sobre la Unidad C.

4) Caracterizar litología y potencial de extracción del acuífero en la Unidad C. Esta actividad se basará en la información obtenida de los pozos instalados de la Actividad 1, con base en las pruebas de bombeo: parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica o permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, capacidad específica). Se recurrirá también a la interpretación de las columnas litoestratigráficas y el conocimiento generado en las Actividades 2 y 3. Seguir las siguientes recomendaciones para zonificar el potencial de extracción:
   a. Utilizar datos de porcentaje de permeables en las columnas litológicas (% de arenas y gravas) para generar un mapa con valores interpolados a partir de las mediciones puntuales (pozos). Definir un umbral aceptable de % de permeables (por ejemplo: 30%) por encima del cual se considera que existe alto potencial de abastecimiento en el acuífero.
   b. Generar un mapa de capacidad específica a partir de las mediciones puntuales en cada pozo. Realizar una interpolación que tenga en cuenta las formaciones geológicas, geometría y transmisividad del acuífero en la Unidad C. Superponer con el mapa de porcentaje de permeables, para identificar áreas de mayor potencial de abastecimiento del acuífero.
   c. Utilizar los datos medidos a campo para mejorar el modelo numérico. Evaluar distintos escenarios de bombeo teniendo en cuenta la demanda actual y potencial de agua subterránea. Seleccionar las áreas donde se logre maximizar el abastecimiento de agua subterránea minimizando los descensos de niveles.

Período de implementación (cronograma):
Año 1: Diseño e instalación de los pozos para mediciones en la Unidad C, Actividad 1 (1 año)
Año 2-6: Mediciones a campo, toma de muestras, Actividad 1.b (5 años)
Año 2: Análisis de hidrogeoquímica de la unidad C.
Año 2-6: Análisis de flujo subterráneo de la Unidad C (5 años)
Año 6: Caracterización del potencial de extracción de la Unidad C (6 meses)

Corto plazo (2021-2023)	Mediano plazo = (2024 – 2027)	Largo plazo = (2028 – 2030)
X	X	

Presupuesto: **US$230.000-350.000 - $1,700,000,000.oo**

Productos

- Línea base de calidad e hidrogeoquímica de la unidad C
- Evaluación de procesos y tiempos de recarga de la unidad C
- Evaluación del potencial de extracción para el abastecimiento humano

Programa 1.2: Preservación de la seguridad de la oferta hídrica subterránea

Se definió un proyecto para este programa:

Proyecto 1.2.1: Definición de determinantes para la conservación, protección y recuperación de la oferta hídrica subterránea en áreas intervenidas o a intervenir urbanísticamente en zonas de recarga

Línea estratégica 1: Gestión de la Oferta y Demanda hídrica subterránea
Programa 1.2: Preservación de la seguridad de la oferta hídrica subterránea
Proyecto 1.2.1: Definición de determinantes para la conservación, protección y recuperación de la oferta hídrica subterránea en áreas intervenidas o a intervenir urbanísticamente en áreas de recarga**.**
Línea Base
La urbanización, la reducción de zonas verdes y la deforestación son procesos que llevan a la impermeabilización del suelo o la reducción de la capacidad de infiltración de este. Antes de aprobar planes de urbanización, es importante diseñar estudios que permitan conocer su posible impacto sobre los niveles del acuífero y las líneas naturales de flujo (especialmente hacia humedales dependientes). Se deben también estudiar escenarios en los que se caracterice el impacto sobre la recarga al alterar el caudal o ubicación de cauces superficiales, y cuantificar los volúmenes drenados por infraestructura urbana (construcciones, sótanos, galerías, sistema pluvial, etc.). Una primera comprensión de dichos impactos se obtuvo por medio del diagnóstico técnico, y se recomienda realizar estudios más detallados que validen dichos resultados. Por ejemplo, el diagnóstico técnico construyó un modelo numérico que indicó que la urbanización de nuevas zonas podría causar descenso de niveles de entre unos pocos centímetros y hasta casi 2 metros, y una disminución de la recarga del acuífero de hasta 9.5Mm3/año. Esto podría verse agravado por el efecto del cambio climático. Este proyecto busca brindar lineamientos que permitan una mejor inclusión del acuífero en la ordenación ambiental de actividades en superficie, particularmente en cuanto a los potenciales impactos de la urbanización de zonas de recarga. Se espera así guiar y limitar efectivamente actuales y potenciales intervenciones urbanísticas, según los requerimientos de manejo de las áreas prioritarias para la recarga de las aguas subterráneas.
Objetivo
"Mejorar la gestión de las zonas de recarga del acuífero por medio de una toma de decisiones articulada y basada en evidencia"
Actividades
Este proyecto está diseñado para recuperar la oferta hídrica en 3 tipos de áreas: 1) zonas que ya han sido intervenidas, donde podrían requerirse medidas de recuperación de los flujos de recarga (Ej.: Cono aluvial del río Cali) 2) zonas que donde se planea o se necesita expandir el área urbana, donde podrían requerirse medidas de compensación por afectación de la recarga 3) zonas que se deberán conservar debido a la importancia de su aporte a la recarga del acuífero en su zona urbana (Ej.: cono aluvial del río Pance). Las actividades que se plantean son: 1) Evaluar la recuperación de la oferta hídrica subterránea a partir de la recuperación de zonas de recarga y priorización de esas zonas. Con esta actividad se definirá en qué zonas es importante recuperar la recarga. Con tal fin, las subactividades que se proponen son: a. Recalcular el balance hidrometeorológico del suelo con el cual se ha determinado la recarga, usando el mapa de suelos. De esta forma, se simula la recarga en condiciones naturales del suelo, y no en las condiciones actuales de impermeabilidad. Así pueden identificarse las zonas que, de manera natural, son más importantes para la recarga del acuífero.

b. Cruzar el mapa de recarga natural con el actual mapa de recarga y evaluar las áreas que se ven más afectadas por la urbanización

2) Definición de criterios y medidas para recuperar la recarga subterránea en áreas ya intervenidas.
   a. Realizar un inventario de posibles medidas para recuperar la recarga
   b. Aplicar una metodología de evaluación de potencialidad de recarga para generar un mapa de potencialidad para cada una de las medidas consideradas. La metodología a aplicar puede ser una variación de metodologías existentes que consisten en la superposición y ponderación de variables tales como la permeabilidad del suelo, la recarga, la litología, la calidad del agua, etc.
   c. Una vez identificadas las áreas ya intervenidas que tienen más potencial para la recarga, caracterizar esas zonas en cuanto a:
      i. Niveles de agua subterránea
      ii. Recarga a 25 m de profundidad en zonas de recarga
      iii. Dirección y volumen de flujos de descarga a pozos y a ecosistemas dependientes (madreviejas, humedales)
      iv. Caudal base y niveles de ecosistemas dependientes
   d. Con el modelo numérico, evaluar el cambio de las variables caracterizadas, al simular diferentes escenarios con medidas de recuperación de las áreas intervenidas
   e. Con base a los resultados, seleccionar las medidas más adecuadas que proporcionen un cambio positivo en las variables mencionadas.

3) Definir criterios técnicos y medidas para la intervención urbanística en zonas de recarga autorizadas. En el caso de las zonas en las que se planea urbanizar, la delimitación ya viene dada por los planes parciales de urbanización. La metodología a seguir para evaluar las posibles medidas a implementar puede ser la definida en la Actividad 2. Además, para definir los criterios técnicos y medidas para la intervención urbanística, evaluar aquellas medidas que:
   a. Garanticen el cumplimiento de principios del POT para Estructura Ecológica (permeabilidad, transición, conectividad, continuidad)
   b. Para cualquier medida que se sugiera implementar, hacer un monitoreo continuo de la calidad del agua que se extraiga en las diferentes fases del proyecto urbanístico.
   c. Articular este proyecto con planes de ordenamiento de superficie, estableciendo valores aceptables para las variables (Actividad 2), que no deberán ser excedidos al realizarse intervenciones

4) Fortalecer los términos de referencia para los planes de manejo de afloramiento de aguas subterráneas por intervenciones urbanísticas. Los términos de referencia tienen que incluir:
   a. Umbrales en cuanto a los valores de cambio aceptables para las variables mencionadas en la Actividad 2
   b. Brindar recomendaciones a planes de ordenamiento de superficie para una correcta conservación de la recarga.
   c. Criterios técnicos y medidas para un protocolo de monitoreo de indicadores (como mínimo los definidos en la Actividad 2).

   En la elaboración de los términos de referencia se deben revisar otros planes existentes para articulación de esfuerzos de manejo y documentar información:
   - Documentar existencia y efectividad de medidas de protección ambiental existentes en otros planes (POT Cali, POMCAs disponibles).
   - Identificar compatibilidades con este proyecto, y vacíos instrumentales relacionados con los riesgos derivados de la recarga artificial.

• Documentar recomendaciones a ser utilizadas en la mesa de trabajo (Línea Estratégica 3) para articular este proyecto con planes de cuenca y ordenamiento.
Período de implementación (cronograma): **Duración total del proyecto = 2 años.** Año 1: Revisión de datos e información disponible, Actividad 1.a (2 meses) El resto del cronograma depende del resultado de la Actividad 1.a. Por tanto, se implementarán las otras actividades dependiendo de la necesidad de información respecto al Proyecto piloto 1.1.2: - a partir de 2021 si se considera que se cuenta con suficiente información disponible para utilizar el modelo numérico actual. -a partir de 2023 si se requiere mejorar el modelo incorporando la caracterización de la recarga por medio de hidrogeoquímica -a partir de 2027 si se desea un análisis de balance hídrico. Año 1: Clasificación de zonas de recarga (Actividad 1.b (10 meses) Año 2: Recomendación de medidas de manejo, Actividad 2 (6 meses) Año 2: Recomendaciones de articulación con otros planes, Actividad 3 (3 meses). **(x)= depende de resultados de Actividad 1.a.**

Corto plazo (2021-2023)	**Mediano plazo = (2024 – 2027)**	**Largo plazo = (2028 – 2030)**
(x)	**(x)**	**(x)**

Presupuesto: US$100.000 - $500,000,000.oo
Productos
- Evaluación de la recuperación de la oferta hídrica a partir de recuperación de zonas permeables - Zonas priorizadas para la recuperación de la recarga subterránea - Documento con criterios técnicos para intervenciones en zonas de recarga

Programa 1.3: Gestión de la demanda para necesidades ambientales y usos económicos y sociales

Este programa incluye los siguientes proyectos:

Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterráneas y generación de medidas de acción para su manejo

Proyecto 1.3.2: Estimación de módulos de consumo de agua por sectores productivos.

Línea estratégica 1: Gestión de la Oferta y Demanda hídrica subterránea
Programa 1.3: Gestión de la demanda para necesidades ambientales y usos económicos y sociales
Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo
Línea Base
Un punto de agua subterránea es un lugar u obra civil que permite el acceso al agua subterránea, incluyendo pozos, aljibes, o surgencias naturales que corresponden a descargas del acuífero de acuerdo al Ministerio de Ambiente. La información recopilada y georreferenciada de las captaciones de agua facilita el desarrollo de análisis territoriales, tales como la distribución espacial de puntos de agua por unidades geológicas, por rangos de profundidad, por tipos de captación, por tipo de uso del agua, por rangos de caudales aprovechados o mapas de parámetros fisicoquímicos, entre otros (MADS, 2014). La información de las captaciones de agua facilita también analizar los niveles del acuífero y determinar zonas de recarga, descarga y de tránsito. De particular

importancia es obtener una cuantificación más precisa de la demanda de agua subterránea, ya que a partir del diagnóstico técnico de PMAA se estimó que actualmente un 50% del agua usada (superficial o subterránea) no está contabilizada.

El correcto manejo de puntos de agua requiere la recopilación de información sobre consumos, diseños, litologías, información hidroquímica, pruebas de bombeo y niveles. A su vez, se requiere clasificar los pozos según estén activos, sellados o inactivos, y cuantificar la concesión otorgada (demanda) por tipo de uso. El presente proyecto busca realizar aporte a dicha necesidad.

Objetivo

"Inventariar y plantear medidas de manejo para los puntos de aguas subterráneas aún no identificados"

Actividades

1) Identificar y cuantificar la información requerida para el registro de los usuarios inventariados por la Autoridad Ambiental en función de los lineamientos del Ministerio de Ambiente.

   En la fase de aprestamiento del PMAA se organizó la información de los usuarios inventariados en plantillas Excel para FUNIAS y SIRH. Para cada usuario se identificó la información faltante. En esta actividad se debe cuantificar esta información para poder complementarla (Actividad 4).

2) Identificar usuarios del recurso Hídrico subterráneo no inventariados y recolectar la información técnica, administrativa y jurídica necesaria, bajo el marco del registro de usuarios del Ministerio de Ambiente. La actividad consiste en realizar visitas a posibles puntos de agua subterránea en la ciudad que actualmente no están inventariados acordando con el usuario la manera en que se procederá a recopilar la información necesaria.

3) Organizar la información requerida para el conocimiento del estado y necesidades de los puntos de agua. Esta actividad hace referencia específica a los manantiales o surgencias naturales. El grupo de Ecosistemas del DAGMA dispone de una base de datos que contiene la ubicación georeferenciada de manantiales. Sin embargo, no se dispone de más información sobre las características específicas de cada manantial. Esta información es importante para poder caracterizar los flujos de recarga del acuífero y conocer el origen del agua que llega a los manantiales. Esta actividad consiste en visitar los manantiales georeferenciados en la base de datos del grupo de Ecosistemas, y recopilar información sobre caudales e hidroquímica. La frecuencia de recopilación debería ser 2 veces al año, una vez en la época seca y otra en la húmeda. Si no se ven diferencias después de las primeras mediciones, se puede monitorear los manantiales 1 vez al año.

4) Establecer e implementar medidas de acción para los diferentes tipos de puntos existentes identificados, encaminadas al cumplimiento del registro único de usuarios, su acotamiento a la normativa ambiental vigente y protección de recurso hídrico y su uso eficiente.
   a. De acuerdo a las necesidades identificadas en las actividades 1 y 2, definir e implementar las medidas de acción. Se espera que estas medidas incluyan actividades tales como: georreferenciar y caracterizar galerías filtrantes y pozos (estado activo, sellado, inactivo, consumos, diseños, litologías, información hidroquímica, pruebas de bombeo, concesiones por uso, niveles). La información deberá recolectarse en una o varias visitas si fuera necesario.
   b. Organizar la información y actualizar las plantillas Excel para alimentar la base de datos ya iniciada y organizada durante el PMAA.

Período de implementación (cronograma):

La totalidad del proyecto se puede implementar en el primer año del PMAA (corto plazo)

La actualización de la información e implementación de medidas para el manejo de los puntos de agua subterránea dependerá de las necesidades y oportunidades que surjan durante la ejecución del PMAA (mediano y largo plazo).

Corto plazo (2021-2023)	Mediano plazo = (2024 – 2027)	Largo plazo = (2028 – 2030)
X	(X)	(x)
Presupuesto: US$60.000 – 300,000,000.oo (no incluye actualización continua ni costos de procesos para implementación de medidas según la norma)		
Productos		
- Manantiales, galerías filtrantes y pozos fuera del inventario georreferenciados - Caracterización del caudal y la hidroquímica de los Manantiales - Medidas de acción planteadas para los diferentes puntos inventariados - Términos de referencia para los planes de manejo de afloramiento de aguas subterráneas por intervenciones urbanística		

Línea estratégica 1: Gestión de la Oferta y Demanda hídrica subterránea
Programa 1.3: Gestión de la demanda para necesidades ambientales y usos económicos y sociales
Proyecto 1.3.2: Estimación de módulos de consumo de agua por sectores productivos.
Línea Base
El diagnóstico técnico del PMAA estimó un volumen concesionado de aguas subterráneas de 10.9 Mm^3 en la jurisdicción de DAGMA, existiendo diferencias entre sectores en cuanto a las características de la demanda. Los principales usos del agua subterránea en la zona urbana de Santiago de Cali están asociados al lavado de vehículos, el riego de zonas verdes, jardines y áreas comunes, el uso doméstico para actividades de aseo y baterías sanitarias, y el uso industrial. Si bien el lavado de vehículos es el uso con mayor número de pozos concesionados (más del 43% de los pozos concesionados, explotando a una profundidad de promedio de 13 metros), el volumen concesionado para dicho uso es sólo de 1.3 Mm^3/año. Por otra parte, el sector industrial cuenta con menos pozos (inferior al 10% de los pozos concesionados, con una profundidad promedio de 48 metros) y consume el 68% del total del volumen concesionado de la ciudad de Cali. La definición de módulos de consumo es una herramienta de gestión que permite identificar el consumo de agua por usuario, suscriptor o unidad de producto, para dar lineamientos técnicos y establecer consideraciones para el ahorro y uso eficiente del agua. Este proyecto busca adecuar los módulos de consumo a partir de necesidades identificadas en el diagnóstico en cuanto al balance entre oferta y demanda del agua subterránea. Se busca así incentivar a los usuarios a diseñar y presentar ante el DAGMA Programas para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAAs) que estén en línea con los objetivos del PMAAA. Por ejemplo, instalando medidores de consumo, adoptando medidas de reducción de pérdidas, reúso obligatorio del agua, e implementando tecnologías de bajo consumo de agua.
Objetivo
"Establecer módulos de consumo por actividad económica que permitan avanzar hacia un uso eficiente del acuífero y el ahorro del agua" Nota: Una mejor estimación de la demanda deberá incluir considerar los bombeos existentes legales e ilegales en la estimación de la demanda, ya que se considera que actualmente un 50% del agua usada (superficial o subterránea) no está contabilizada. Antes de ejecutar el presente proyecto, se recomienda aguardar los resultados del Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo
Actividades
1) Priorización de sectores y actividades productivas para los que se adecuarán los módulos de consumo. a. Priorización basada en volumen consumido históricamente: i. Priorizar sectores de uso de las aguas subterráneas con base al porcentaje de la demanda anual total que representa cada sector (demanda del sector / demanda total de agua subterránea).

ii. Los sectores que tengan el porcentaje más alto de demanda serán prioritarios en requerir el planteamiento e implementación de medidas para el uso eficiente del agua. Por ejemplo, según el diagnóstico técnico, en 2018 el sector industrial fue el mayor consumidor, por lo que tendría la máxima prioridad.
iii. Identificar conflictos por uso del agua, por medio de una socialización interna en el DAGMA y con los usuarios, para consolidar ideas y aclarar interrelaciones entre las actividades de ambas partes en el marco del uso eficiente del agua.

b. Alternativamente, se podrían priorizar sectores y actividades productivas según los siguientes criterios:
   i. Magnitud de la presión que el sector ejerce sobre el acuífero, cuantificada como disminución indeseable o inaceptable en los niveles del acuífero atribuida al sector en cuestión. Por ejemplo: categoría de índice de uso de agua (IUA), índice de escasez, índice de vulnerabilidad hídrica (IVH) e índice de agua no retornada a la cuenca (IARC). Recibirán prioridad los sectores con un mayor impacto negativo sobre la sostenibilidad del recurso debido a la distribución espacial y temporal de su demanda.
   ii. Ineficiencia del sector en el uso que hace del agua. Recibirán prioridad los sectores que presenten más pérdidas en sus sistemas de uso del agua, y que necesiten una mayor cantidad de mejoras en su eficiencia de uso. Y conforme al orden de prioridad otorgado a cada sector para el uso del agua subterránea y a lo establecido en el Artículo Artículo 2.2.3.2.7.6 del Decreto 1076 de 2015
      1. Utilización para el consumo humano, colectivo o comunitario, sea urbano o rural;
      2. Utilización para necesidades domésticas individuales;
      3. Usos agropecuarios comunitarios, comprendidas la acuicultura y la pesca;
      4. Usos agropecuarios individuales, comprendidas la acuicultura y la pesca;
      5. Generación de energía hidroeléctrica;
      6. Usos industriales o manufactureros;
      7. Usos mineros;
      8. Usos recreativos comunitarios, e i. Usos recreativos individuales.

2) Definir la estrategia para la determinación de los módulos de consumo y estimarlos para cada uso siguiendo el orden de prioridad de la Actividad 1.

   a. Caracterizar línea base de módulos de consumo y eficiencia de uso

$$Módulo\ de\ consumo = Consumo\ actual \times \%\ de\ reducción\ del\ consumo\ (según\ metas\ planteadas)$$

   i. Cuantificar el módulo consumo actual por sector en la línea base (consumos históricos), expresado como Consumo sectorial anual de agua subterránea (m3) / Unidad de producción, convertido a las mismas unidades en que se expresará el módulo de consumo. Por ejemplo: L/m2/día para riego de zonas verdes. Considerar el consumo de agua superficial y subterránea para usuarios que se abastezcan de ambas fuentes.
   ii. Caracterizar la línea base de la eficiencia del uso del agua de cada sector (por subzona o microcuenca si fuera pertinente), a fin de categorizar y priorizar los sectores que requieran mejorar su eficiencia del agua. Para cada usuario, calcular el balance de agua del sistema a través del cual se capta, se conduce y se dispone el agua (captación, pretratamiento, conducción, tratamiento y recirculación,

almacenamiento, red de distribución, consumo, disposición final). Identificar ubicación y cantidad de pérdidas de agua del sistema y cuantificar porcentaje de pérdidas respecto al caudal captado, identificar la existencia/inexistencia de medidores, las acciones que los usuarios realizan para controlar pérdidas en cada elemento del sistema.

b. Cálculo de módulos de consumo a implementar a partir de la definición de metas de reducción de uso
   i. Establecer metas de reducción de uso del agua subterránea por sector, expresadas como % de reducción aplicado al consumo actual (línea base en 2.a). Las metas deberían apuntar a la reducción gradual (año a año) del consumo de agua subterránea, permitiendo la adopción de medidas por parte del usuario para minimizar ineficiencias en el uso del agua.
   ii. La reducción del consumo esperada según las metas será mayor para los sectores que presenten una mayor ineficiencia en su uso del agua y/o que posean un mayor impacto sobre la cantidad del recurso (niveles del acuífero).
   iii. Establecer una estrategia de organización y sistematización de la información en el Sistema de información del recurso hídrico (SIRH), que permita realizar el seguimiento y control efectivo y oportuno a las concesiones de aguas subterráneas de manera coordinada con la concesión de aguas superficiales.

.

3) Definir acciones que faciliten la implementación del Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua (PUEAA) simplificado (Decreto 1090 de 2018 –Ministerio de Ambiente). Para lo cual se recomienda:

a. Consolidar un equipo de trabajo interdisciplinario para la evaluación, aprobación y seguimiento de las concesiones y los PUEAAs
b. Establecer una estrategia de organización y sistematización de la información en el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH), que permita realizar el seguimiento y control efectivo y oportuno a las concesiones y a los PUEAAs.
c. Definir metas en relación con el número de PUEAAs aprobados sobre número de concesiones totales (%) en DAGMA.
d. Elaborar guías para usuarios que brinden lineamientos técnicos y consideraciones para elaborar y presentar PUEAAs
e. Todos los pozos de usuarios deberán contar con un medidor para registrar el consumo. Definir sistemas de medición y periodicidad de registros recomendados por tipo de usuario
f. Evaluar costos y verificar el cumplimiento de metas concertadas con los usuarios para el ahorro y uso eficiente del agua, estableciendo un sistema de incentivos y sanciones.

Período de implementación (cronograma): La totalidad del proyecto se puede implementar en 1 año (Ver presupuesto para detalle de duración de cada actividad).

Corto plazo (2021-2023)	**Mediano plazo = (2024 – 2027)**	**Largo plazo = (2028 – 2030)**
X		

Presupuesto: US$47.000 - $250,000,000.oo

Productos

- Sectores y actividades definidas para establecer módulos de consumo
- Módulos de consumo de agua para las actividades definidas

Indicadores: Sectores con meta de uso eficiente y ahorro del agua establecida; % de concesiones que poseen PUEAA.

6.4.2 Línea estratégica 2: Preservación de la calidad del recurso hídrico subterráneo

En la segunda línea se pretende preservar y mejorar el estado del agua subterránea, para su uso actual y futuro. Debido a las actividades contaminantes (ej. hidrocarburos, agroquímicos, polución en los acuíferos), es preciso mejorar la calidad del recurso hídrico subterráneo teniendo en cuenta que la inacción o la falta de estrategias de prevención y mitigación pueden provocar daños irreversibles a este reservorio valioso y común.

Se formuló 1 programa en esta línea:

Programa 2.1: Gestión para la identificación y reducción de la contaminación en articulación entre las autoridades, el sector privado, científico y la sociedad civil

En este programa se distingue los siguientes proyectos concretos:

Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes

Proyecto 2.1.2: Caracterización de actuales y potenciales procesos de contaminación al acuífero y propuestas de posibles soluciones en sitios priorizados

Proyecto 2.1.3: Estudio de las interacciones entre el sistema de alcantarillado y el acuífero

Línea estratégica 2: Preservación de la calidad del recurso hídrico subterráneo
Programa 2.1: Gestión para la identificación y reducción de la contaminación en articulación entre las autoridades, el sector privado, científico y la sociedad civil
Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes
Línea Base
El diagnóstico del PMAA identificó las potenciales fuentes contaminantes de las aguas subterráneas en la zona de estudio y generó un mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero. Como principales fuentes potencialmente contaminantes están: rupturas en el sistema de alcantarillado (especialmente en la zona centro y norte de la ciudad alrededor del río Cali), infiltración de agua contaminada por ríos perdedores en zonas de recarga, tanques subterráneos para almacenamiento de combustible o de componentes requeridos por la industria, cementerios y minas ubicados en zonas de recarga. Se cuenta con mediciones puntuales de parámetros químicos que muestran indicios de contaminación a escala local: pozos de monitoreo donde se observa conductividad eléctrica superior a los 1000 us/cm (zona centro de Cali, puntos ceranos al paleodrenaje del río Cañaveralejo y puntos ceranos al río Cali en el norte de la ciudad), valores de nitratos superiores a 10 mg/L y sitios con indicios de contaminación microbiológica. Sin embargo, falta información respecto a las características de la carga contaminante en diferentes partes del acuífero, la cual es importante para conocer el riesgo de contaminación y los potenciales impactos sobre el recurso. Este proyecto busca zonificar el riesgo del acuífero en base a las características de las fuentes contaminantes (carga, persistencia, movilidad) y la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, a fin de articular esfuerzos de gestión del acuífero con el ordenamiento actividades en superficie que garanticen la calidad de las aguas subterráneas.
Objetivo
"Producir un mapa que clasifique las fuentes potencialmente contaminantes del acuífero según su nivel de riesgo, para facilitar la articulación del manejo ambiental de actividades en superficie y del acuífero"

Actividades

1) Identificar y caracterizar las diferentes actividades potencialmente contaminantes para el acuífero e inventariarlas..

a. Caracterizar movilidad (m/día) y persistencia del contaminante (días) y cuantificar intensidad de la carga contaminante (g/L/día emitidos) para cada tipo de fuente contaminante siguiendo los siguientes pasos:
   i. Inventariar potenciales fuentes contaminantes del acuífero en la zona urbana de Santiago de Cali (mapa).
   ii. Realizar una caracterización inicial de contaminantes en base a literatura disponible (utilizar la Guía de Formulación de PMAA del Ministerio de Ambiente).
   iii. Mejorar la caracterización y adecuarla según información disponible en campo y que puedan brindar los usuarios de fuentes potencialmente contaminantes (visitas y mediciones en los sitios, ensayos realizados por los usuarios, lectura de medidores y registros históricos de inspecciones si los hubiera).

Lo anterior se realiza para las siguientes fuentes de contaminación:

- Fuentes potencialmente contaminantes en tierra, de tipo puntual (por ejemplo: residuos industriales, lagunas de tratamiento, tanques enterrados).
- Fuentes potencialmente contaminantes en tierra, de tipo difuso (por ejemplo: pérdidas en sistema de alcantarillado o tanques sépticos integradas a nivel regional).
- Fuentes potencialmente contaminantes por infiltración en tramos de ríos perdedores. Se puede caracterizar la calidad del agua superficial y/o las fuentes que emiten contaminantes al río.

Otros criterios que se pueden evaluar son: probabilidad de emisión (integridad de las estructuras de contención, profundidad de enterramiento de tanques, tasa o probabilidad de infiltración en ríos perdedores), volúmenes de contaminante emitido, área de contacto con el suelo y/o el acuífero, concentración del contaminante en la fuente.

b. Clasificar (en uno o más mapas) cada fuente contaminante según su “nivel de amenaza”, o potencial de contaminar el acuífero. Basar esta clasificación teniendo en cuenta la información obtenida en 1.a. Se recomienda recurrir a un panel interdisciplinario de expertos. La clasificación de la amenaza en los mapas se puede hacer siguiendo estas recomendaciones:
   i. Definir clases (por ejemplo: baja, media, alta, muy alta) para los criterios “movilidad”, “persistencia” y “carga contaminante” de contaminantes, y clasificar cada fuente contaminante (atributo) según dichas clases.
   ii. Decidir la geometría de los atributos en el mapa, los cuales serán clasificados según el punto anterior. Se recomienda lo siguiente: representar las fuentes puntuales en tierra como puntos, las fuentes por infiltración en ríos como líneas (si se caracteriza el río como fuente) o puntos (si se caracteriza el origen del contaminante como fuente); las fuentes difusas como líneas o polígonos.

   Se recomienda obtener uno o más mapas que se cruzarán con el mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero (DRASTIC) para calcular riesgo por fuente. Se pueden generar mapas separados para los tres criterios mencionados anteriormente (“movilidad”, “persistencia” y “carga”). Alternativamente, se puede generar una única clasificación de “nivel de amenaza” a cruzar con DRASTIC, en cuyo caso se deberá definir una metodología para agregar los tres criterios (ejemplo: suma o multiplicación de valores de cada criterio, ponderados por su peso relativo).

2) Generar un mapa de riesgo cruzando el mapa de vulnerabilidad intrínseca con el mapa (o los mapas) generados en Actividad 1. Brindar recomendaciones para la articulación de la Línea de Gobernanza, y específicamente para detallar la normativa en cuanto a los artículos relacionados con el riesgo a la contaminación.

   El mapa final deberá mostrar las fuentes potencialmente contaminantes (definidas en la Actividad 1) clasificadas según clases de "riesgo". Los valores de las clases de "riesgo" deberán integrar, a su vez, el valor asignado a cada uno de los criterios considerados relevantes. El mapa debe brindar información relevante para la toma de decisiones. Se recomienda recurrir a un panel interdisciplinario de expertos, y seguir los siguientes pasos y recomendaciones:

   a. Obtener un mapa de clases de riesgo por fuente contaminante, según la vulnerabilidad del acuífero en su ubicación (mapa de vectores SIG).
      i. Definir los criterios a tener en cuenta para asignar a cada fuente contaminante un valor de "riesgo". Se propone incluir los siguientes criterios: "vulnerabilidad intrínseca del acuífero (DRASTIC), "movilidad", "persistencia" y "carga" del contaminante.
      ii. Definir los rangos de valores, categorizados en clases, de cada criterio. Definir el peso relativo de cada criterio para la obtención del valor "riesgo" por fuente potencialmente contaminante (ejemplo: suma o multiplicación de valores de cada criterio, ponderados por su peso relativo).
      iii. Definir los rangos de valores para el índice de "riesgo" y su categorización en clases. Clasificar las fuentes potencialmente contaminantes según "riesgo". Las clases deben tener relevancia en cuanto a la toma de decisiones. (ver Actividad 4).
      iv. Realizar una comparación (validación) de los valores de riesgo obtenidos por fuente contaminante, a partir de valores observados a campo de calidad de aguas (por ejemplo: conductividad eléctrica), comenzando por la información contenida en el diagnóstico técnico del PMAA. Revisar la metodología y realizar modificaciones a la obtención del índice "riesgo" si fuera necesario. Por ejemplo, zonas donde el acuífero muestra conductividad eléctrica muy elevada deberían coincidir con la cercanía a fuentes contaminantes clasificadas como "riesgo alto".
      v. Generar recomendaciones para la toma de decisiones conjunta con planes de manejo ambiental de actividades en superficie. Adecuar recomendaciones a las necesidades y oportunidades identificadas para el Proyecto 3.1.1 (Línea Estratégica 3).

   b. Evaluar si es necesario pasar de un mapa de riesgo de vectores (puntos, líneas y polígonos limitados a la extensión de la fuente contaminante y la vulnerabilidad del acuífero donde ésta se ubica) a un mapa de zonas (extrapolación a distintas partes del acuífero según, por ejemplo, líneas de flujo). Articular con Proyecto 3.1.2 (modelación numérica).

3) Definir y priorizar medidas de monitoreo y control. Tener en cuenta las siguientes condiciones mínimas o recomendaciones para diseñar e implementar redes de monitoreo específicas.

   Nota: Se recomienda fortalecer el monitoreo del antiguo vertedero clausurado de Navarro, evaluando la posible dispersión de la contaminación hacia otras zonas. Este trabajo requeriría la articulación de esfuerzos y colaboración entre la CVC y el DAGMA.

   a. Mediciones recomendadas para una red de monitoreo específica:

i. Definir cuál o cuáles fuentes potenciales de contaminación requieren de una red de monitoreo específica de calidad (mayor riesgo de contaminación según este proyecto, en el mapa obtenido en Actividad 2).
ii. Medir en todos los puntos de la red: nivel freático, conductividad eléctrica y pH, parámetros químicos característicos de la fuente contaminante a monitorear.
iii. Periodicidad de medición acorde a la temporalidad de las variables control (tiempos de emisión en la fuente, periodicidad de las precipitaciones, caudal y niveles en el río en el caso de monitorear contaminación por infiltración a través de ríos perdedores).

b. La densidad de pozos de monitoreo debe ser mayor donde se dé una o más de las siguientes condiciones:
i. Gradiente alto debajo de las fuentes priorizadas (mayor riesgo de contaminación según este proyecto, en el mapa obtenido en Actividad 2).
ii. Alto riesgo de movilización del contaminante siguiendo el flujo subterráneo (se podría evaluar mediante el uso del modelo numérico de transporte de contaminantes, ver proyecto 2.1.2).
iii. Puntos o zonas donde el acuífero presentan indicios de contaminación según el diagnóstico técnico.
iv. Cercanía a zonas de captación de aguas subterráneas o a zonas de protección.
v. Zonas prioritarias de recarga (resultados del modelo numérico, resultados de Proyecto 1.1.2 y Proyecto 1.2.1).
vi. Tramos de ríos perdedores (resultados del modelo numérico, resultados del Proyecto 1.1.2).
vii. Vulnerabilidad intrínseca del acuífero alta o muy alta (mapa DRASTIC obtenido en diagnóstico técnico).

4) Recomendaciones para requerimiento de pozos de monitoreo a usuarios de fuentes potencialmente contaminantes (articulación con Proyecto 3.2.2: Revisión y actualización de la resolución 001 de 2003, con base en el PMAA).
a. Diseño
i. Instalar dos pozos de monitoreo por fuente contaminante: uno gradiente arriba y otro gradiente debajo de la fuente.
ii. La profundidad de los pozos de monitoreo deberá ser de 30 m o menos. Dicha profundidad se podrá adecuar según las características del acuífero y del contaminante (ver punto siguiente).
iii. Según las características de la fuente contaminante, se puede requerir más de un pozo de monitoreo, cubriendo al menos dos profundidades. Esto es especialmente importante para contaminantes de alta movilidad. Por ejemplo, el monitoreo de nitratos requerirá dos niveles de monitoreo: uno más superficial en los primeros 5 metros por debajo del nivel freático (para monitorear la calidad del agua que infiltra al acuífero), y otro más profundo a 30-35 m (para monitorear la calidad promedio en el acuífero y tendencias de acumulación dependientes de los tiempos de viaje y residencia).
b. Medición
i. El usuario deberá entregar a DAGMA mediciones una vez por año, realizadas por un laboratorio acreditado por el IDEAM.
ii. Los parámetros mínimos medidos serán conductividad eléctrica y pH y, adicionalmente, parámetros químicos característicos de la fuente contaminante. Por ejemplo: metales pesados en contaminación de origen industrial, DBO en tanque sépticos.

c. Vinculación con gobernanza

i. Realizar un taller con grupos de trabajo en DAGMA de autoridades ambientales que tengan experiencia en el requerimiento de pozos de monitoreo a usuarios de fuentes potencialmente contaminantes. Recoger recomendaciones y lecciones aprendidas en cuanto a la toma de datos, procesamiento y análisis, y a la relación entre autoridad ambiental y usuarios.

ii. Definir responsabilidades de usuarios y de DAGMA.

iii. Diseñar un sistema de incentivos y sanciones. Definir umbrales aceptables e inaceptables de contaminación de las aguas subterráneas, así como pasos a seguir pactados con los usuarios en el caso de que un sitio muestre indicios de contaminación de las aguas subterráneas.

Período de implementación (cronograma):

Año 1: Clasificación de fuentes potencialmente contaminantes según su nivel de amenaza, Actividad 1 (10 meses).

Año 2: Generación de un mapa de riesgo, Actividad 2 (6 meses),

Año 2: Definición de medidas para monitoreo y control (6 meses), recomendaciones para requerimiento de pozos de control de la contaminación (6 meses).

Actualizar de acuerdo a la información recibida de los otros proyectos del PMAA (caracterización de procesos de recarga y descarga por medio del modelo numérico de transporte, datos en la red de monitoreo fortalecida).

Corto plazo (2021-2023)	Mediano plazo = (2024 – 2027)	Largo plazo = (2028 – 2030)
X		

Presupuesto: US$100.000 - $500,000,000.oo

Productos

-Herramientas para la toma de decisiones

-Herramientas para la regulación de actividades potencialmente contaminantes para prevenir la contaminación del acuífero

- Medidas de control de actividades puntuales potencialmente contaminantes

Línea estratégica 2: Preservación de la calidad del recurso hídrico subterráneo

Programa 2.1: Gestión para la identificación y reducción de la contaminación en articulación entre las autoridades, el sector privado, científico y la sociedad civil

Proyecto 2.1.2: Caracterización de actuales y potenciales procesos de contaminación al acuífero y propuesta de posibles soluciones en sitios priorizados

Línea Base

Las principales fuentes potenciales de contaminación del acuífero fueron identificadas en el diagnóstico técnico, y caracterizadas por medio del Proyecto 2.1.1: rupturas en el sistema de alcantarillado (especialmente en la zona centro y norte de la ciudad alrededor del río Cali), infiltración de agua contaminada por ríos perdedores en zonas de recarga, tanques subterráneos para almacenamiento de combustible o de componentes requeridos por la industria, cementerios y minas ubicados en zonas de recarga. La toma de medidas de monitoreo y acciones de reversión de la contaminación deberían orientarse a prevenir el movimiento de contaminantes en el acuífero desde dichas fuentes potenciales de contaminación, hacia sitios prioritarios de protección identificados en el diagnóstico (zonas de recarga o de descarga cercanas a ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas). El diseño eficiente de medidas de protección de las aguas subterráneas requiere conocer los

procesos de transporte, considerando la interacción del flujo de agua subterránea con los procesos químicos que ocurren en la matriz del suelo y el acuífero.

El presente proyecto busca generar herramientas que orienten medidas de protección de las aguas subterráneas en sitios prioritarios. Entre dichas medidas se incluyen, por ejemplo: el refuerzo de la red de monitoreo, la delineación de zonas de protección y el manejo de actividades en superficie. Se propone el uso de un modelo numérico de transporte, basado en el modelo de flujo subterráneo creado para el acuífero en la zona urbana de Santiago de Cali.

Objetivo

"Caracterizar posibles procesos de transporte desde fuentes potencialmente contaminantes hacia sitios que poseen prioridad de protección de la calidad de las aguas subterráneas"

Este proyecto se debe implementar luego de recibir y analizar los resultados del proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes.

Actividades

1) Seleccionar sitios prioritarios para la modelación del transporte de contaminantes y la implementación de medidas de manejo de la contaminación. Se pueden seguir los siguientes pasos y recomendaciones:
    a. Definir criterios de priorización para seleccionar el o los sitios a modelar. Ejemplos de criterios: zonas identificadas en el análisis de calidad del diagnóstico del PMAA (como por ejemplo la zona de Yumbo), intensidad del proceso de contaminación existente (concentración del contaminante en las aguas subterráneas y/o nivel de desviación de estándares de calidad o de los valores esperados por hidrogeoquímica de fondo); nivel de riesgo de contaminación en la fuente según el mapa generado en el Proyecto 2.1.1; cercanía a zonas de prioridad para protección; facilidad con la que se puede modelar el contaminante (conocimiento disponible, comportamiento en flujo subterráneo).
    b. La zona que se va a modelar debe contar con información que permita la calibración y validación del modelo de transporte. Se requieren mediciones bianuales de calidad a campo en el acuífero, durante el período que se desea modelar (al menos 5 años), desde la(s) fuente(s) contaminante(s) hasta sitios prioritarios de protección (zonas de recarga, ecosistemas dependientes, captaciones de aguas subterráneas).
    c. Se recomienda seleccionar una zona que posea pozos de la red de monitoreo específico diseñada en el Proyecto 2.2.1 de zonificación del riesgo.

Nota: Se recomienda estudiar los impactos relacionados con el antiguo vertedero clausurado de Navarro, evaluando la posible dispersión de la contaminación hacia otras zonas. Este trabajo requeriría la articulación de esfuerzos y colaboración entre la CVC y el DAGMA.

2) Desarrollar el modelo numérico de Santiago de Cali para incluir transporte de contaminantes para el o los sitios seleccionados.

    a. Adecuar modelo de flujo subterráneo y desarrollarlo para modelación de transporte:
        i. Definir parámetros necesarios caracterizar el contaminante seleccionado en el modelo de transporte: sorción (coeficiente de retardación por interacción con el suelo), coeficiente de difusión molecular, dispersión longitudinal y dispersión transversal, comportamiento en el perfil vertical del acuífero (por ejemplo: líquido de combustible tiende a permanecer "flotando" en las capas más superficiales del acuífero, mientras que solvente industrial orgánico se moverá a mayor profundidad).
        ii. Mejorar parámetros en el modelo numérico actual de flujo subterráneo. Las mayores incertidumbres se relacionan a: pérdidas de acueducto; descarga en el sistema de alcantarillado, sótanos y galerías filtrantes; intercambio de agua con los ríos; morfología de la base hidrogeológica; recarga lateral.
        iii. Si se modela un proceso de contaminación por infiltración de ríos, será necesario adecuar el paquete RIV (elevación del fondo del río, nivel de agua en ríos, coeficiente

de infiltración). Esto es especialmente en los tramos perdedores identificados para los ríos Cali, Meléndez, Aguacatal, Cañaveralejo y Lili, Pance y sus derivaciones.

iv. La discretización espacial debe definirse a partir del tamaño del área modelada, con base a la ubicación de la(s) fuente(s) potencialmente contaminante(s) respecto a sitios prioritarios de protección ubicados gradiente abajo del flujo subterránea. Considerar que el modelo de flujo subterráneo fue construido con una resolución espacial de 25 m.

v. Acoplar un módulo de transporte reactivo (iMOD-MT3D u otro) para modelar las plumas de contaminantes

vi. Calibrar el modelo con mediciones a campo de concentración del contaminante en la fuente contaminante, el acuífero y las zonas a proteger

b. Definir resultados que se busca obtener con el modelo de transporte. Por ejemplo:

i. Distintos escenarios respecto a las variables control (por ejemplo: tasas de bombeo, carga contaminante en fuentes).

ii. Rastreo de partículas, líneas flujos de contaminación, distribución espacial y evolución temporal de la pluma de contaminación (curvas de iso-concentración en distintos momentos, por ejemplo, a los 6, 12, 18 y 24 meses). Adicionalmente, resultados de flujo subterráneo de agua: curvas de equi-potencial, balances de agua.

iii. Resultados de utilidad para la toma de decisiones: ubicación óptima de pozos de monitoreo, curva de avance de la contaminación en pozos de monitoreo, medidas óptimas de remediación.

3) Utilizar resultados del modelo numérico de transporte para caracterizar el proceso de contaminación de aguas subterráneas desde la(s) fuente(s) de contaminación seleccionada(s) a zonas que deben ser protegidas.

a. Definir escenarios a modelar

i. Caracterizar el contaminante en el modelo (parámetros) y su distribución espacial (concentración) en celdas contaminadas del modelo propios del escenario de modelación (línea base, escenarios de mejoras tecnológicas en control de la contaminación, escenarios de remediación).

ii. Caracterizar el proceso transporte bajo distintas condiciones climáticas (recarga) y/o tasas de bombeo.

iii. Obtener resultados para cada escenario: distribución espacial y evolución temporal de la pluma de contaminación (curvas de iso-concentración en distintos momentos, por ejemplo: a los 6, 12, 18 y 24 meses); tiempo de llegada a sitios que se deben proteger.

b. Obtener e interpretar resultados de modelación

i. Evaluar la utilidad de instalar nuevos pozos de monitoreo defensivo (ante contaminación probable o inminente) en sitios que requieren protección. Por ejemplo: modelar la curva de avance de la contaminación en pozos de observación ubicados en las líneas isócronas de 50 y 100 días, bajo distintos escenarios.

ii. Evaluar la efectividad y pertinencia de posibles medidas de remediación, a fin de retardar o prevenir la llegada de contaminantes a sitios priorizados aguas abajo.

iii. Determinar si la ubicación actual y proyectada de pozos de monitoreo detectaría la contaminación con tiempo suficiente para iniciar protocolos de protección y/o remediación, bajo distintos escenarios de bombeo y/o climáticos.

iv. Realizar un análisis de incertidumbre para los resultados, basado en rangos posibles de los parámetros más sensibles según previo análisis de sensibilidad. Por ejemplo, mediante el uso de simulaciones Monte Carlo.
v. Comparar resultados con observaciones de calidad del agua en pozos de monitoreo.
vi. Validar el modelo numérico con mediciones a campo de concentración del contaminante en la fuente contaminante, el acuífero y las zonas a proteger.
vii. Producir un informe que contenga la interpretación de los resultados, a ser utilizado en el proyecto 3.1.1 (Línea Estratégica 3) para promover procesos de participación, articulación de la gestión y educación.

4) Definir medidas y/o alternativas para el manejo de la contaminación en sitios priorizados.

a. Recomendar mejoras a la red de monitoreo de calidad de las aguas subterráneas (articulación Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema acuífero).

i. Recomendar mejoras al protocolo de toma de datos (frecuencia de medición y parámetros a medir definidos según la fuente de contaminación), almacenamiento en base de datos, procesamiento y análisis.
ii. Sugerir sitios para la instalación de nuevos pozos de monitoreo de calidad. Los pozos de monitoreo deben ubicarse gradiente arriba de los sitios prioritarios a monitorear (los que posean riesgo de ser alcanzados por la contaminación), y gradiente abajo de las fuentes potenciales de contaminación.
iii. Recomendar medidas de remediación donde sea necesario.
iv. Producir un informe que contenga la interpretación de los resultados, a ser utilizado en el proyecto 3.1.1 (Línea Estratégica 3) para promover procesos de participación, articulación de la gestión y educación.

b. Trabajar con usuarios para prevención y reducción de la contaminación (articulación con Actividad 4 de Proyecto 2.1.1)
i. En sitios priorizados según actividades 2 y 3, brindar recomendaciones a los usuarios que deben instalar pozos de monitoreo de fuentes potencialmente contaminantes. Por ejemplo: información adicional en cuanto a parámetros a analizar, frecuencia de medición, número y profundidad de los pozos de monitoreo. Brindar prioridad a estos sitios en cuanto a recursos asignados desde DAGMA para su seguimiento y evaluación.
ii. Realizar un diagnóstico de las causas por las que existe contaminación en sitios priorizados (por ejemplo: uso de tecnologías inadecuadas de tratamiento de aguas residuales, infraestructura defectuosa de transporte y/o almacenamiento de sustancias contaminantes). Mediante la instalación de mesas de trabajo con actores sociales.
iii. Diseñar soluciones y estrategias de acompañamiento en colaboración con los usuarios y planes de manejo de actividades en superficie, promoviendo procesos de participación, articulación y educación (Proyecto 3.1.1 de la Línea Estratégica 3).
iv. Utilizar el modelo numérico de transporte para evaluar la posible efectividad de las medidas propuestas para reducción de la contaminación en la fuente.
v. Producir un informe que contenga la interpretación de los resultados, a ser utilizado en el proyecto 3.1.1 (Línea Estratégica 3) para promover procesos de participación, articulación de la gestión y educación.

Período de implementación (cronograma):
Año 1: Selección de sitios para modelar (4 meses) y desarrollo del modelo numérico de transporte (4 meses)

Año 2: Desarrollo del modelo numérico de transporte y análisis de resultados (6 meses), recomendaciones para mejorar la red de monitoreo (6 meses). Año 3: recomendaciones para mejorar la red de monitoreo y trabajo con actores para reducción de la contaminación (6 meses).		
Corto plazo (2021-2023)	**Mediano plazo = (2024 – 2027)**	**Largo plazo = (2028 – 2030)**
(x) aguarda resultados del proyecto 2.1.1	**X**	
Presupuesto : **US$140.000 - $700,000,000.oo**		
Productos		
-Modelo numérico de transporte de contaminantes -Herramientas para la toma de decisiones en la regulación de actividades potencialmente contaminantes -Sitios priorizados para control de la contaminación - Medidas para el monitoreo de actividades puntuales potencialmente contaminantes		

Línea estratégica 2: Preservación de la calidad del recurso hídrico subterráneo
Programa 2.1: Gestión para la identificación y reducción de la contaminación en articulación entre las autoridades, el sector privado, científico y la sociedad civil
Proyecto 2.1.3: Estudio de las interacciones entre el sistema de alcantarillado y el acuífero
Línea Base
Las pérdidas en sistemas de alcantarillado es una problemática común para la preservación de la calidad de acuífero urbanos. Según el diagnóstico técnico y el análisis de amenazas, en Cali las zonas que requieren mayor atención en cuanto a pérdidas en el alcantarillado son la zona centro de la ciudad y la zona norte, alrededor del río Cali. Allí, el sistema de alcantarillado es más antiguo y la probabilidad de fugas de aguas residuales es más alta. Existen algunos indicadores que ayudan a identificar la ocurrencia de contaminación por fallas en el sistema de alcantarillado (conductividad eléctrica, nitratos, coliformes totales, coliformes fecales, DQO, DBO y COT). Pero estos indicadores pueden también indicar otro tipo de contaminación o pueden ser altos como resultado de un proceso de descarga del acuífero que trae contaminación de otras zonas. Por ejemplo, el área comprendida entre los ríos Cañaveralejo y Meléndez, y el paleodrenaje del río Cañaveralejo son zonas de descarga en donde la contaminación proveniente de otras zonas del acuífero puede estar concentrándose por transporte en el flujo subterráneo, manteniendo altos los indicadores de contaminación. En la zona entre los ríos Cañaveralejo y Meléndez, la contaminación observada podría deberse a un proceso de infiltración de agua de río contaminada o a fallas en el sistema de alcantarillado, ya que ambas fuentes comparten los mismos parámetros químicos clave. Caracterizar el proceso de contaminación por fallas en el sistema de alcantarillado (impacto local o regional, señalizadores químicos de utilidad para su detección), permitirá establecer sitios donde existe una correlación clara de dicha fuente con los indicios de contaminación que se puedan detectar en la red de monitoreo de calidad. Se espera así poder recomendar mejoras a la red de monitoreo y priorizar esfuerzos de rehabilitación del sistema de alcantarillado.
Objetivo
"Conocer los procesos de recarga y descarga de agua subterránea entre el sistema de alcantarillado y el sistema acuífero. Reducir la contaminación en zonas priorizadas con afectación de la calidad del agua subterránea por el sistema de alcantarillado". Nota: En caso de que no se cuente con presupuesto para realizar este estudio en la totalidad de la zona urbana de Santiago de Cali, este proyecto se puede implementar sólo en zonas donde el diagnóstico técnico identificó mayor probabilidad de pérdidas en el alcantarillado (zona centro de la ciudad, zona norte, alrededor del río Cali). Deberían recibir prioridad zonas donde se encuentren tuberías en zona de recarga o descarga cercanas a ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.

La implementación de este proyecto requiere el trabajo conjunto con EMCALI.

Actividades

1) Identificar de posibles daños en el sistema de alcantarillado por medio de información disponible

    a. Recopilar información sobre parámetros y variables relevantes para la interacción entre alcantarillado y acuífero

        i. Con base a información existente a proporcionar por EMCALI, caracterizar la distribución espacial de los elementos de infraestructura relevantes (por ejemplo: estructuras de recolección, tratamiento, transporte, uniones entre tuberías, disposición final, ubicación de tuberías que transportan efluentes tratados y no tratados) en una base de datos georreferenciada.
        ii. Cruzar el mapa de infraestructura del sistema de alcantarillado, con mapas del nivel freático promedio y estacional. Definir zona de mayor riesgo de exfiltración (por ejemplo: 3 metros por arriba y por debajo del rango de variación estacional del nivel freático).
        iii. Recopilar información histórica disponible de datos que puedan afectar la integridad de las tuberías (por ejemplo: edad, pendiente y longitud de la tubería, material, profundidad y diámetro de la tubería, posición relativa al nivel freático promedio y estacional, proximidad a sitios de tráfico pesado de vehículos, daños ya identificados en inspecciones) e incorporarla a la base de datos georreferenciada.

    b. Ubicar posibles daños en el sistema de alcantarillado por medio de análisis espacial

        i. Clasificar cada variable (definida en 1.a) en rangos posibles y clases que representen su contribución a una mayor probabilidad de exfiltración.
        ii. Realizar un análisis espacial multicriterio para asignar a cada sección del alcantarillado una clase de probabilidad de exfiltración. Establecer un umbral a partir del cual seleccionar zonas prioritarias para el monitoreo y análisis de muestras de agua subterránea.
        iii. Identificar sitios donde se perforarán pozos para caracterizar el proceso de contaminación mediante análisis de parámetros químicos.
        iv. Seleccionar sitios que sean representativos de las condiciones regionales (recarga natural, características del acuífero y suelos, topografía) y que tengan baja probabilidad de ser afectados por otras fuentes contaminantes de similares características químicas (ríos perdedores, tanques sépticos). Estos pozos serán utilizados en Actividad 1.c (Grupo 1).
        v. Actualizar la base de datos y el análisis multicriterio con base a de la red de monitoreo y de inspecciones futuras.

2) Identificar y caracterizar el proceso de contaminación en el acuífero debido a pérdidas en el sistema de alcantarillado, por medio de mediciones a campo.

    a. Seleccionar los pozos a utilizar en el análisis. Dependiendo del presupuesto, el área de estudio puede abarcar: zonas prioritarias de acuerdo al diagnóstico técnico (norte de Cali) y/o zonas de mayor probabilidad de exfiltración de acuerdo al análisis multicriterio y/o sitios donde la exploración visual con CCTV (Televisión de Circuito Cerrado, se trata de una cámara muy usada para la inspección de tuberías) identificó daños (Resultados de Actividad 1.a). Realizar un estudio de campo de duración de al menos dos años. El análisis agrupará los pozos en tres

grupos, cada uno con las siguientes características y recomendaciones para la toma de muestras:

i. Grupo 1: pozos de observación a instalar en la cercanía fallas en el alcantarillado, gradiente abajo (caracterizan el proceso de contaminación a escala local y brindan la señal química del efluente) (se recomiendan más de 3 pozos para poder hacer la triangulación y determinar la dirección del flujo). Realizar toma de muestras al menos cuatro veces por año (época seca y época húmeda) durante dos años. Para detectar posibles variaciones de importancia para el monitoreo, se recomienda además realizar mediciones mensuales o diarias (por ejemplo: medidores automáticos de niveles, conductividad eléctrica, pH, temperatura y nivel del agua) durante dos años.
ii. Grupo 2: pozos existentes en la red de monitoreo de calidad en la zona urbana de Cali (caracterizan la señal química afectada por diversas fuentes contaminantes, incluyendo el alcantarillado). Seleccionar pozos existentes que se encuentren gradiente abajo de las fallas identificadas en la Actividad 1.a. Medir niveles y tomar muestras al menos dos veces por año (época seca y época húmeda) durante cinco años.
iii. Grupo 3: pozos ubicados a profundidad mayor a 30 m en la zona urbana de Cali y/o en sitios alejados de fuentes potenciales de contaminación, donde se observa la hidrogeoquímica de fondo del acuífero. Medir niveles y tomar muestras al menos dos veces por año (época seca y época húmeda) durante cinco años.

b. Tomar muestras para análisis en laboratorio de parámetros clave.
   i. Tomar muestras para análisis.
   ii. Seleccionar, para el análisis, parámetros que actúen como señalizadores de contaminación por pérdidas en el alcantarillado. Idealmente, deberían ser compuestos que sean únicos de la fuente de contaminación, analizables, no reactivos y de concentración constante en la fuente. Posibles parámetros: PPCPs, hormonas, compuestos orgánicos volátiles, bacterias indicadoras de contaminación fecal (fecal indicator bacteria FIB), metales y radios de isótopos estables del agua (2H, 18O); químicos agregados durante su tratamiento.
c. Interpretar resultados y caracterizar el proceso de contaminación
   i. Comparar la señal química de los tres grupos (iones mayoritarios, radios de iones, compuestos señalizadores), a fin de identificar similitudes y diferencias entre grupos mediante métodos estadísticos (por ejemplo: análisis multivariado, Bray-Curtis)
   ii. Identificar procesos relevantes que ocurren en cada grupo y que podrían explicar diferencias observadas en la composición química (iones mayoritarios y compuestos señalizadores). Por ejemplo: características de la hidrogeoquímica de fondo en el sitio del pozo, condiciones de oxidación y reducción, influencia de contaminación por otras fuentes potencialmente contaminantes del acuífero.
   iii. Comparar el comportamiento estacional de los distintos grupos, y su respuesta a eventos que modifiquen las variables control: eventos de precipitación, variaciones en el nivel freático, cambios ocasionales en la presión dentro de la red de alcantarillado.
d. Realizar recomendaciones para fortalecer la red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas, en base a los resultados observados.
   i. Recomendar: parámetros químicos a analizar, frecuencia de medición, metodología de interpretación de datos de monitoreo.
   ii. Identificar zonas donde la red requiere una mayor densidad de pozos de monitoreo. Por ejemplo: en zonas priorizadas en el diagnóstico técnico (zonas de recarga y

zonas de descarga cercanas a ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas) que coincidan con fugas en el alcantarillado detectadas.

iii. Tuberías de alto diámetro con fallas severas y alta carga hidráulica deberían recibir prioridad de control y monitoreo.

3) Definir medidas y/o alternativas para el manejo de las interacciones del sistema de alcantarillado con el acuífero, incluyendo medidas de prevención, control y seguimiento de la contaminación.

a. Mejorar la red de monitoreo de calidad para una detección más efectiva del riesgo de contaminación por fugas, a partir del conocimiento generado en Actividades 1 y 2.

i. Seleccionar pozos para monitorear específicamente la contaminación por el sistema de alcantarillado, y crear para dichos pozos un protocolo de monitoreo específico. Incluir pozos ya existentes en la red de monitoreo y los utilizados en el estudio a campo (Actividad 2).

ii. Incluir los pozos seleccionados en una base de datos de actualización bianual, donde se registre información clave. Por ejemplo: distancia a la tubería más cercana gradiente arriba, nivel del agua subterránea, parámetros químicos.

iii. Instalar nuevos pozos donde los resultados de la Actividad 2.d indican que la red no es suficientemente densa.

iv. Establecer un protocolo de monitoreo y análisis basado en los patrones temporales, y la señalización química característicos de la contaminación por fugas en el alcantarillado (Recomendaciones de Actividad 2.d)

v. Construir nuevos pozos de observación en zonas priorizadas que coincidan con fugas en el alcantarillado detectadas por CCTV o por análisis SIG. Tuberías de alto diámetro con fallas severas y alta carga hidráulica deberían ser prioridad. El pozo se debe ubicar en las inmediaciones de la tubería, gradiente abajo del flujo de agua subterránea respecto.

b. Realizar un diagnóstico del riesgo de contaminación y necesidades de intervención.

i. Con base a las concentraciones de parámetros clave y dinámicas temporales, determinar si el problema de contaminación por alcantarillado se limita a las inmediaciones de fallas detectables (por CCTV), o se da a nivel regional.

i. Dar prioridad a las secciones dañadas donde se considere que existe alto riesgo de daños al recurso hídrico subterráneo, la integridad de ecosistemas dependientes o la salud de la población, recomendar a EMCALI iniciar medidas de rehabilitación de la red de alcantarillado.

c. Utilizar la información generada en 3.a para generar herramientas que permitan una mejor extrapolación de las mediciones puntuales al resto del área de estudio, si fuera necesario. Por ejemplo:

i. Refinar el análisis espacial multicriterio (base SIG) obtenido en la Actividad 1.a, para una mejor zonificación de la probabilidad de daños en el sistema de alcantarillado.

ii. Calibrar un modelo numérico de transporte en base a las observaciones en pozos de monitoreo (resultados de la Actividad 1 y 2.a), y al análisis espacial multicriterio. Identificar probabilidad de transporte de contaminantes a lo largo del acuífero.

iii. Ambas herramientas mencionadas anteriormente se pueden utilizar para identificar zonas donde se debe reforzar el monitoreo de calidad del acuífero, realizar nuevas inspecciones visuales (CCTV) y/o rehabilitar la infraestructura de alcantarillado.

iv. Utilizar el modelo numérico de transporte para identificar sobrestimación o subestimación de las tasas de exfiltración modeladas, a partir de balances de masa y observaciones a campo.

4) Definir un plan de acción armonizado con el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV)

a. Trabajar con EMCALI para identificar causas de daños en el sistema de alcantarillado y definir oportunidades de colaboración con DAGMA para tomar medidas preventivas y de rehabilitación.
b. Utilizar el conocimiento generado para definir indicadores de implementación, seguimiento y control del PSMV y priorizar tramos del sistema de alcantarillado que requieren rehabilitación.
c. Para tramos priorizados, definir responsabilidades de DAGMGA y de EMCALI, así como proyectos a incluir en el PSMV y su presupuesto, para realizar mejoras al sistema de alcantarillado.
d. Establecer un sitio piloto donde se rehabiliten daños al sistema del alcantarillado y se monitoreen resultados (duración mínima de cinco años). Definir indicadores de estado y de éxito a monitorear, en base al conocimiento generado en Actividad 1 y Actividad 2.
e. Generar un protocolo de implementación, control y seguimiento para el sitio piloto. Para el análisis de indicadores, se pueden utilizar los pozos utilizados para la Actividad 1.b, así como en la red de monitoreo reforzada y las herramientas generadas en la Actividad 2.
f. Producir un informe de lecciones aprendidas en el sitio piloto, aportando recomendaciones para nuevas mejoras al PSMV.

Período de implementación (cronograma):

Año 1: Recopilación de información sobre sistema de alcantarillado (Actividad 1, 6 meses), diseño de estudio a campo (2 meses) e instalación de pozos (2 meses).
Año 2-6: Toma de muestras a campo, análisis e interpretación de resultados, Actividades 2.b, 2.c (5 años)
Año 7: Mejoras a la red de monitoreo Actividades 2.d, 3.a (9 meses)
Año 8: Diagnóstico de necesidades de rehabilitación de la red de monitoreo y trabajo com EMCALI en PSMV (1 año)

Corto plazo (2021-2023)	**Mediano plazo = (2024 – 2027)**	**Largo plazo = (2028 – 2030)**
X	**X**	**x**

Presupuesto: US$150.000 - $750,000,000.oo (no incluye el trabajo de campo)

Productos

- Análisis de las interacciones de recarga y descarga entre los sistemas evaluando calidad y cantidad
- Daños en el sistema de alcantarillado identificados
- Plan de acción para la reducción de la contaminación con priorización de zonas
- Plan de acción ejecutado en una zona piloto priorizada

6.4.3 Línea estratégica 3: Fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza

Se enfoca en el fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza para el manejo de recurso hídrico subterráneo, de acuerdo con la visión de la autoridad de ser una entidad altamente capaz, preparada y confiable y enfocada en facilitar la participación de la sociedad civil, científica, empresarial y ambiental.

Se formularon 2 programas en esta línea:

Programa 3.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo, incluyendo actores del sector privado, el sector público y la sociedad civil

En el primer programa se distingue un proyecto:

Proyecto 3.1.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo

Línea estratégica 3: Fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza
Programa 3.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo, incluyendo actores del sector privado, el sector público y la sociedad civil
Proyecto 3.1.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo
Línea Base
La articulación y comunicación entre actores en el sector público y privado, la sociedad civil y la academia ha sido identificada como uno de los desafíos más relevantes para el PMAA. Estos procesos no se pueden abordar solamente en el PMAA y por eso este proyecto plantea la creación de una mesa de trabajo para mejorar el uso y manejo del agua subterránea, que incluya actores de diferentes sectores. Por otro lado, el uso adecuado del agua subterránea por parte de los usuarios y partes interesadas es clave para lograr un mejor manejo. Para fomentar el uso responsable y eficiente enfocado al largo plazo y al interés individual y común, la capacitación e intercambio de conocimiento entre usuarios es fundamental. Para ese fin se necesita de espacios comunes, materiales y conocimiento aplicados y también instrumentos para fomentar un uso mejor del recurso Este proyecto propone la creación y sostenimiento de una mesa de trabajo con los actores del acuífero, así como el desarrollo de una gama de canales de comunicación y de capacitación de usuarios de las aguas subterráneas.
Objetivos
- Generar espacios de participación y colaboración que permitan avanzar hacia un manejo sostenible de los recursos hídricos - Abrir y desarrollar mejores canales de comunicación para una gestión adecuada y transparente - Fomentar la colaboración entre los sectores público, privado, academia y la sociedad civil para la generación, divulgación y procesamiento de investigaciones e información relacionada con el acuífero
Actividades
1) Diseñar la estrategia de información, educación y comunicación (IEC) para las acciones del PMAA (actividades en línea) a. Identificar los actores, necesidades diferenciales de los actores y realizar el mapa de ideas-fuerza b. Diseñar la estrategia IEC c. Validar la estrategia IEC con diferentes grupos de actores d. Implementar actividades de información y comunicación para el PMAA y el manejo integral del recurso hídrico subterráneo i. Presentar los avances del PMAA en al menos 1 microprograma de televisión al año ii. Presentar los avances del PMAA por medio de difusiones en periódicos locales – como mínimo 1 al año

2) Conformar una mesa de trabajo permanente para el monitoreo participativo de los proyectos de los planes de manejo y de ordenamiento del recurso hídrico y del territorio

   a. Conformar la mesa de trabajo con los actores identificados en la Actividad 1
   b. Realizar sesiones de la mesa de trabajo – al menos una anual
   c. Realizar informe anual sobre los avances de la mesa de trabajo
   d. Realizar un evento anual para presentar avances del PMAA

3) Implementar actividades de educación para el PMAA y el manejo integral del recurso hídrico subterráneo

   a. Educación formal
      i. Preparar y concertar la introducción de la temática de aguas subterráneas en los currículos de la educación básica y media
      ii. Capacitar a los docentes y directivos docentes de las instituciones públicas del municipio encargados de la introducción de los temas en los currículos
      iii. Socializar la propuesta curricular a la red de colegios privados pedagogía
      iv. Generar un curso electivo como propuesta para los programas de las instituciones técnicas y universitarias
      v. Generar una propuesta de curso obligatorio de aguas subterráneas para carreras relacionadas directamente con el recurso
      vi. Realizar la socialización con la red de universidades de Cali mediante una mesa de trabajo
      vii. Asistencia técnica a las instituciones de educación superior para incluir el componente de aguas subterráneas en los PRAU
      viii. Generar propuestas de investigación de pregrado y posgrado para las instituciones universitarias de acuerdo a los planteamientos del PMAA
      ix. Socializar las propuestas con las instituciones educativas y acompañar la presentación de proyectos propuestos a fondos nacionales, internacionales e internos de las universidades
   b. Capacitación de actores y usuarios del recurso hídrico subterráneo
      i. Financiar a través de un fondo los PRAU ligados a la conservación de aguas subterráneas
      ii. Realizar plan de trabajo para educación con actores comunitarios, resaltando objetivos y contenidos de las capacitaciones
      iii. Realizar jornadas de formación a los actores comunitarios
      iv. Realizar plan de trabajo para educación con actores institucionales
      v. Realizar jornadas de formación a los actores institucionales
      vi. Diseñar, validar y producir herramientas para la educación de aguas subterráneas a los diferentes niveles planteados

Período de implementación (cronograma):
Comunicación: Diseño en el primer año, Implementación a partir del año 2, a lo largo de todo el PMAA.
Mesa de trabajo: Diseño en el primer año, conformación en el segundo año, implementación a partir del año 2.
Educación: Diseño en primer año, Diálogo y campañas a partir del año 2 (4-5 años).

Corto plazo (2021-2023)	**Mediano plazo = (2024 – 2027)**	**Largo plazo = (2028 – 2030)**
X	**X**	**x**

Presupuesto: US$75.000 – US$130.000 - $600,000,000.oo (dependiendo de las campañas que se hagan)

Productos

Productos: nuevos canales de comunicación; plan de comunicación, mesa de trabajo para articulación de la gestión del acuífero, comunidad y actores informados e interesados **Indicador:** canales de comunicación creados sobre total proyectado; número de canales de comunicación que cuentan con plan de comunicación, sobre total de canales creado; número de miembros convocados a las mesas de trabajo, sobre total proyectado; número de miembros que asisten a las sesiones de trabajo, sobre total convocado.

Programa 3.2: Mejoramiento de la capacidad técnica e institucional sobre el manejo del agua subterránea y la implementación efectiva del PMAA, en colaboración con la comunidad científica, otras autoridades y actores principales

Proyecto 3.2.1: Mejoramiento de la capacidad interna del Grupo de Recursos Hídricos y otros grupos relevantes del DAGMA en cuanto al manejo de recursos de agua subterránea

Proyecto 3.2.2: Revisión y actualización de la resolución 001 de 2003, con base en el PMAA, incluyendo protocolos de operación que se identifiquen necesario para mejorar los trámites y procedimientos sobre el uso y manejo de agua entre DAGMA y el usuario.

Proyecto 3.2.3: Centro de apoyo para la toma de decisiones en torno a la gestión del agua subterránea

Proyecto 3.2.4: Propuesta de fortalecimiento del laboratorio ambiental para la investigación y el monitoreo de los recursos hídricos, con un enfoque al monitoreo de la contaminación

Línea estratégica 3: Fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza
Programa 3.2: Mejoramiento de la capacidad técnica e institucional sobre el manejo del agua subterránea y la implementación efectiva del PMAA, en colaboración con la comunidad científica, otras autoridades y actores principales
Proyecto 3.2.1: Mejoramiento de la capacidad interna del Grupo de Recursos Hídricos y otros grupos relevantes del DAGMA en cuanto al manejo de recursos de agua subterránea
Línea Base
El conocimiento técnico sobre el recurso hídrico subterráneo requiere de mejoras tanto dentro como fuera del DAGMA. La gestión de los recursos hídricos en general, y específicamente de los recursos hídricos subterráneos, es cada vez más compleja e interrelacionada con asuntos de planificación ambiental, desarrollo económico y espacial. La articulación con otros actores y planes es fundamental para llegar a un mejor manejo y una ejecución exitosa del PMAA. Todo eso requiere un más alto nivel de conocimiento y comunicación interna y externa, empezando con un buen nivel básico e incluyendo a una gama de herramientas para un mejor manejo del agua subterránea. En el diagnóstico se identificó la necesidad de complementar el conocimiento técnico del grupo de Recursos Hídricos en cuanto a modelación, contaminación y remediación de suelos. También se identificó la necesidad de aumentar el número de profesionales en el grupo, y de trabajar en la continuidad de los mismos para evitar la pérdida de memoria técnica e institucional. Otro aspecto importante que se identificó es la debilidad de la normativa, y la falta de capacidad del DAGMA para hacerla cumplir.
Objetivo
“Fortalecer los grupos internos del DAGMA relacionados con la gestión de las aguas subterráneas para mejorar el conocimiento del sistema y avanzar en la gestión sostenible y colaborativa”
Actividades

1) Evaluar la capacidad (técnica, humana, financiera) interna del Grupo de Recursos Hídricos y otros grupos relevantes del DAGMA en cuanto al manejo del recurso hídrico subterráneo.

   Esto implica realizar un diagnóstico participativo interno en el DAGMA. Se sugiere documentar, para cada uno de los elementos del diagnóstico en cuanto a gobernanza del agua: problemas identificados, soluciones propuestas, indicadores de estado e indicadores de proyecto sugeridos. Para ello:

   a. Identificar grupos internos del DAGMA de mayor relevancia para la gestión de las aguas subterráneas (por ejemplo: grupos a cargo de planes de ordenamiento ambiental vinculados al PMAA).
   b. Inventariar herramientas existentes de comunicación interinstitucional y espacios de diálogo entre grupos clave.
   c. Identificar áreas de conocimiento técnico donde los recursos humanos del DAGMA presentan capacidad subóptima para la correcta gestión de las aguas subterráneas. Identificar también problemas resultantes de dicha falta de capacidad técnica.
   d. Debatir en una mesa de trabajo con miembros de grupos clave de del DAGMA y directivos del DAGMA: desafíos y oportunidades para la cooperación, procesos que fallan por falta de articulación entre grupos, factores que reducen la eficiencia en el intercambio de información.
   e. Determinar la existencia/inexistencia y/o efectividad de elementos relevantes para la memoria institucional. Por ejemplo: reemplazo frecuente de cargos de coordinación y profesionales técnicos, mantenimiento de registros de eventos clave en la gestión del acuífero (problemas encontrados, soluciones implementadas); mantenimiento de registro de información sobre procesos de diseño y de proyectos y lecciones aprendidas durante su implementación.
   f. Identificar las necesidades financieras y de apoyo interno de cargos directivos y externo (de otras instituciones, de la alcaldía, etc.) para llevar a cabo de forma efectiva el plan de acción que se genere.

2) Generar un plan de acción para el mejoramiento de la capacidad interna de grupos del DAGMA clave para la gestión del acuífero

   Definir elementos del Plan de Acción. Por ejemplo: actividades, metas, cronograma, resultados esperados, indicadores, protocolo de seguimiento para indicadores. Basar el diseño del Plan de Acción en el conocimiento generado a partir del diagnóstico interno del DAGMA (Actividad 1), teniendo en cuenta los problemas identificados, soluciones propuestas, indicadores de estado e indicadores de proyecto sugeridos.

   Se recomienda que el Plan de Acción apunte a:

   a. Definir estrategias de comunicación y divulgación del conocimiento del recurso hídrico subterráneo dentro del DAGMA
   b. Crear espacios de intercambio de información y conocimiento entre el grupo de Recursos Hídricos y otras áreas de DAGMA para favorecer la capacitación del personal en materia de aguas subterráneas.
   c. Definir protocolos para que los datos e informes de las Líneas Estratégicas 1 y 2 sean de fácil disponibilidad e interpretación para su uso en otros programas y proyectos. Generar un portal de acceso y manejo de datos de fácil acceso en línea.
   d. Definir protocolos de transmisión del conocimiento entre personal entrante y saliente de la institución.

3) Implementar el plan de acción

a. Asignar recursos en el presupuesto del DAGMA al seguimiento de los indicadores de estado y proyecto definidos en la Actividad 1 y seleccionados para el Plan de Acción.
b. Implementar espacios y protocolos generados en el Plan de Acción, y desarrollar las herramientas propuestas.
c. Documentar la evolución de indicadores cada cuatro años, a fin de facilitar su contraste con las metas establecidas en el cronograma del Plan de Acción.
d. Generar un sistema de información donde la evolución de los indicadores sea compartida internamente en el DAGMA.
e. Cada tres años, realizar una revisión participativa del Plan de Acción, modificando sus objetivos, actividades e indicadores de seguimiento a partir de lecciones aprendidas.

Período de implementación (cronograma):
Año 1: Establecimiento de línea base de capacidad técnica (Actividad 1) y definición de un programa que promueva la capacitación, el diálogo y la creación y uso de herramientas técnicas (Actividad 2) (1 año)
Años 2-4: Implementar el Plan de Acción, Actividad 3 (3 años)
Desde año 5: evaluar resultados cada 3 años, realizar modificaciones donde fuera necesario.

Corto plazo (2021-2023)	Mediano plazo = (2024 – 2027)	Largo plazo = (2028 – 2030)
X	X	(x)

Presupuesto: US$100.000 - $500,000,000.oo

Productos

- Documento de evaluación de la capacidad (técnica, humana, financiera, procesos) interna del Grupo de Recursos Hídricos y otros grupos relevantes en el DAGMA para la gestión de las aguas subterráneas
- Plan de acción para el mejoramiento
- Plan de acción implementado y grupos fortalecidos

Línea estratégica 3: Fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza

Programa 3.2: Mejoramiento de la capacidad técnica e institucional sobre el manejo del agua subterránea y la implementación efectiva del PMAA, en colaboración con la comunidad científica, otras autoridades y actores principales

Proyecto 3.2.2: Revisión y actualización de la resolución 001 de 2003, con base en el PMAA, incluyendo protocolos de operación que se identifiquen necesario para mejorar los trámites y procedimientos sobre el uso y manejo de agua entre DAGMA y el usuario

Línea Base

La Resolución 001 de enero de 2003 reglamenta las aguas subterráneas en el área de jurisdicción del Municipio de Santiago de Cali. En el diagnóstico se identificó que, si bien la normativa es extensa, en algunos aspectos como por ejemplo en cuanto a la vigilancia de empresas con actividades potencialmente contaminantes, casos con presunta o evidencia de contaminación, planes de contingencia y remediación, la normativa es poco clara y por lo tanto débil. Adicionalmente, es necesario la construcción de procesos estandarizados de control, seguimiento, evaluación de intervenciones como las derivadas de la urbanización de la ciudad, procesos sancionatorios, etc. Esta debilidad de la norma conlleva dificultades para el DAGMA para hacerla cumplir. Se requiere una actualización de dicha reglamentación, basada en el conocimiento adquirido con los profesionales de memoria institucional, lo construido durante la elaboración del PMAA, y a partir de los objetivos de las líneas, programas y proyectos.

A partir del tiempo que sería necesario invertir en las actividades aquí propuestas, se estima que la totalidad de la resolución puede ser actualizada en un período de 1 año.

Objetivo

"Actualizar las herramientas legales del DAGMA para gestión de las aguas subterráneas con base en el PMAA"

Actividades

1) Evaluar procesos para la administración, control y seguimiento del agua subterránea. Se debe tener en cuenta lo identificado en la fase diagnóstico.

2) Definir y/o actualizar los procesos que se requieran, para la adecuada administración del recurso hídrico subterráneo. Por ejemplo, crear un sistema de seguimiento que permita garantizar el cumplimiento de requerimientos en sitios de alto potencial de contaminación.

3) Considerar la pertinencia de aguardar a los resultados de proyectos clave del PMAA antes de actualizar la reglamentación (dependiendo de la urgencia con la que ésta debe actualizarse). Algunos proyectos clave para brindar lineamientos a la reglamentación del manejo del acuífero son:
   a. Proyecto 1.2.1: Definición de determinantes para la conservación, protección y recuperación de la oferta hídrica subterránea en áreas intervenidas o a intervenir urbanísticamente en áreas de recarga.
   b. Proyecto 1.3.2: Estimación de módulos de consumo de agua por sectores productivos.
   c. Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes
   d. Proyecto 2.1.3: Estudio de las interacciones entre el sistema de alcantarillado y el acuífero

4) Incorporar recomendaciones para el requerimiento de pozos de monitoreo a usuarios de fuentes potencialmente contaminantes (ver Proyecto 2.1.1). Posteriormente, definir responsabilidades del DAGMA y de los usuarios.

Período de implementación (cronograma):
.Año 2

Corto plazo (2021-2023)	**Mediano plazo = (2024 – 2027)**	**Largo plazo = (2028 – 2030)**
X		

Presupuesto: US$66.000 - $300,000,000.oo

Productos

Resolución o acuerdo actualizado para la gestión de las aguas subterráneas en Cali

Línea estratégica 3: Fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza

Programa 3.2: Mejoramiento de la capacidad técnica e institucional sobre el manejo del agua subterránea y la implementación efectiva del PMAA, en colaboración con la comunidad científica, otras autoridades y actores principales

Proyecto 3.2.3: Centro de apoyo para la toma de decisiones en torno a la gestión del agua subterránea

Línea Base

Para una gestión eficiente de los recursos hídricos subterráneos es de suma importancia contar con una serie de herramientas que permitan acceder a la información que se requiere de forma rápida y eficiente, y que den claridad a los profesionales de la autoridad ambiental a la hora de tomar decisiones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos subterráneas. Estas herramientas pueden organizarse en un centro de apoyo para la toma de decisiones. En la fase de diagnóstico se identificó que si bien el DAGMA dispone de mucha información,

ésta no está unificada y organizada en bases de datos digitales que permitan un acceso rápido y un análisis eficiente. En el PMAA se inició la organización de información (expedientes de pozos, análisis hidrogeoquímicos, registro de concesiones, columnas litológicas, etc.) en fichas que alimentan el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) del Ministerio de Ambiente. Además, se creó una base de datos de información geográfica para las aguas subterráneas (geodatos organizados en un SIG). Otras herramientas desarrolladas durante el PMAA que son de gran apoyo en la gestión de los recursos hídricos subterráneos son el modelo numérico de flujo, todos los datos y scripts organizados para crear los insumos, y las herramientas para evaluar los resultados. Estas herramientas también deberían formar parte del centro de apoyo, así como otras futuras herramientas para la gestión.

El Centro de Apoyo está estrechamente ligado a las necesidades de que surjan a partir de los proyectos del PMAA.

Objetivo

"Desarrollar herramientas que permitan contar con la información necesaria para mejorar la toma de decisiones en torno a las aguas subterráneas y superficiales"

1) Definir elementos que constituirán el Centro de Apoyo. Alinear la estrategia con lineamientos del Ministerio de Ambiente, dependencias de la Alcaldía y grupos internos del DAGMA.
   Evaluar las bases de datos existentes en las dependencias de la Alcadía y el DAGMA e identificar las características de los elementos del Centro de Apoyo para que pueda ser integrado en los sistemas existentes.

   Los elementos recomendados para el Centro de Apoyo, a ser utilizados a lo largo del PMAA, son:
   a. Plataforma espacial/sistema de información geográfica (GeoDAGMA) que incluya todos los datos con información geográfica. Esta herramienta debe desarrollarse para ser articulada con el observatorio ambiental de Santiago de Cali. Los datos mínimos que debe incluir son: fuentes hídricas, captaciones, vertimientos, puntos de monitoreo y puntos de aguas subterráneas.
   b. Base de datos con plantillas que alimenten el SIRH:
      i. Inventario de fuentes hídricas
      ii. Redes de monitoreo hidrológico
      iii. Datos históricos y en tiempo real
      iv. Usuarios del Recurso Hídrico
      v. Formulario Único Nacional de Inventario de Aguas Subterráneas, FUNIAS
      vi. Calidad del agua
      vii. Datos de calidad del agua recopilados por el IDEAM
      viii. Instrumentos de planificación
      ix. Riesgo asociado al agua
   c. Modelo numérico de flujo subterráneo existente para Santiago de Cali: a ser utilizado y mejorado a lo largo de la implementación del PMAA
   d. Modelo numérico de transporte de contaminantes en flujo subterráneo: a ser creado a partir del modelo numérico existente para Santiago de Cali (presupuesto para su desarrollo ya fue asignado en Proyecto 2.1.2).
   e. Modelo de distribución de agua superficial (tipo RIBASIM o WEAP): a ser desarrollado para mejorar la caracterización de las aguas superficiales en interacción con el acuífero.
   f. Definir herramientas para un registro efectivo de los elementos clave de memoria institucional (identificados en Actividad 1), y para un fácil acceso a los mismos.

   Por otro lado, se recomienda:
   a. Generar un Sistema de Información de procesos y trámites de control, sanciones y permisos.

b. Optimizar el procesamiento de información de resultados de laboratorio en pozos de monitoreo de fuentes potencialmente contaminantes, y su inclusión en bases de datos que faciliten su consulta e interpretación con regularidad por parte de personal de la CVC y usuarios (en proyecto 3.2.4).

2) Definir los objetivos específicos del centro de apoyo para la toma de decisiones. Se recomienda incluir los siguientes objetivos:

   a. Alimentar el SIRH
   b. Guiar la toma de decisiones con el siguiente orden de prioridades: 1) procesos relevantes en la gestión de los recursos hídricos subterráneos (identificar previamente), 2) para los diferentes proyectos del PMAA 3) para otros procesos y proyectos internos del DAGMA 4) para planes de manejo y ordenamiento ambiental ligados al PMAA.
   c. Garantizar que los datos necesarios para el PMAA y generados por el mismo sean de fácil disponibilidad e interpretación para su uso en las otras líneas, programas y proyectos.
   d. Facilitar la apropiación de las herramientas de gestión generadas en el marco del PMAA por parte del personal de DAGMA, facilitando su uso cuando sea pertinente.

3) Desarrollar los elementos del Centro de Apoyo y protocolos para su uso.
   a. Identificar los procesos más relevantes para el DAGMA en cuanto a la toma de decisiones referentes al a gestión de las aguas subterráneas.
   b. Describir los pasos necesarios para poder tomar las decisiones, identificar la información y herramientas necesarias para cada uno de esos pasos
   c. Identificar la necesidad de completar la información o adaptar las herramientas para dar respuesta a las necesidades identificadas en el punto b.
   d. Adaptar y organizar información según necesidades
   e. Para organizar la información de forma que alimente el SIRH, seguir los pasos descritos en la guía para la “Implementación del Sistema de Información de Recurso Hídrico SIRH en Colombia” del IDEAM.
   f. Para elementos ya existentes al comienzo del PMAA:
      i. Identificar proyectos del PMAA en las líneas 1 y 2 que pueden hacer uso de estos elementos para la toma de decisiones, y si es posible sus actividades específicas.
      ii. Identificar otros proyectos del DAGMA (fuera del PMAA) que puedan requerir el uso de los elementos del Centro de Apoyo.
      iii. Registrar, por ejemplo: nombre del proyecto, actividad dependiente del centro de apoyo, aporte específico esperado del centro de apoyo al proyecto (y cuándo se espera), capacidades técnicas mínimas necesarias en el personal de DAGMA.
      iv. Recibir recomendaciones e información de Proyectos del PMAA, a lo largo de su implementación, para realizar mejoras a los elementos del centro de apoyo. Por ejemplo: al modelo numérico de flujo subterráneo, modelo numérico de transporte de contaminantes.
      v. Realizar mejoras, en base a las necesidades identificadas.
      vi. Diseñar protocolos de uso.

   g. Desrrollar los elementos que no existen al momento al comienzo del PMAA. Por ejemplo: Plataforma GeoDAGMA, modelos de aguas superficiales para Santiago de Cali (RIBASIM, WEAP). Seguir las subactividades descritas en el punto f.

4) Diseñar e implementar medidas para el uso efectivo del centro de apoyo en la toma de decisiones

a. Diseñar el Centro de Apoyo de forma participativa con los diferentes usuarios para garantizar que se incluyen las necesidades de todos y que logra una apropiación del mismo
b. Facilitación de las herramientas del Centro de Apoyo para su uso en el PMAA
    i. Generar oportunidades de capacitación del personal de DAGMA para el uso del centro de apoyo y de sus elementos (bases de datos, modelo numérico, plataforma GeoDAGMA, observatorio ambiental). Por ejemplo, por medio de talleres, cursos, seminarios.
    ii. Documentar el uso del centro de apoyo en una base de datos de actualización continua, registrando mejoras necesarias que deberán ser consultadas regularmente.
c. Mejora continua de la funcionalidad del Centro de Apoyo
    i. Evaluar, una vez por año, necesidades y desafíos que surgieron durante la implementación de proyectos en el DAGMA, ligados al análisis y acceso de datos (informes generados por proyectos del PMAA y otros proyectos).
    ii. Documentar el desempeño del centro de apoyo y su utilidad para la toma de decisiones con base en las necesidades de la entidad. Recurrir al uso de indicadores, documentando su evolución cada 4 años (Por ejemplo: % de decisiones tomadas con cada herramienta/elemento del centro de apoyo).

Período de implementación (cronograma):
Año 1: Diseño de objetivos y elementos del Centro de Apoyo (Actividades 1, 3.a, 3.b)
Años 2-8: Desarrollo de elementos, implementación de protocolos para su uso y mantenimiento continuo.

Corto plazo (2021-2023)	Mediano plazo = (2024 – 2027)	Largo plazo = (2028 – 2030)
X	X	x

Presupuesto: US$300.000 ($1,500,000,000.oo) para los primeros 4 años

Productos

-Diseño del centro de apoyo con base en las recomendaciones mínimas propuestas en el PMAA
-Centro de control establecido para la toma de decisiones con base en las necesidades de la entidad

Línea estratégica 3: Fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza

Programa 3.2: Mejoramiento de la capacidad técnica e institucional sobre el manejo del agua subterránea y la implementación efectiva del PMAA, en colaboración con la comunidad científica, otras autoridades y actores principales

Proyecto 3.2.4: Propuesta de fortalecimiento del laboratorio ambiental para la investigación y el monitoreo de los recursos hídricos, con un enfoque al monitoreo de la contaminación

Línea Base

El diagnóstico del PMAA identificó distintas necesidades de monitoreo y gestión de la calidad de las aguas subterráneas, las cuales son abordadas en los diferentes proyectos de la Línea Estratégica 2. La implementación exitosa de dichos proyectos depende de la capacidad técnica del personal del DAGMA, y de la disponibilidad de recursos materiales y humanos asociados al laboratorio ambiental. Por ejemplo, para la toma de datos a campo, la medición de parámetros químicos en muestras de agua subterránea y el almacenamiento e interpretación de datos.

Para conocer exactamente cuáles serán las mejoras requeridas en el laboratorio ambiental y cuándo deberán realizarse, se necesita una planificación más detallada de las diferentes actividades de los proyectos del PMAA que la que se posee actualmente. El presente proyecto plantea pasos a seguir para identificar los elementos del laboratorio ambiental que requerirán fortalecimiento en el marco de la implementación del PMAA. Se sugieren también criterios a tener en cuenta para organizar dichas mejoras en un plan de acción.

Objetivo

"Fortalecer el Centro de Monitoreo Ambiental del DAGMA para un mejor seguimiento de la calidad del agua subterránea en Cali"
Actividades
1) Evaluar los procesos, parámetros y equipos necesarios para el control de la calidad del agua subterránea, identificando necesidades de fortalecimiento. Se deben tener en cuenta las actividades potencialmente contaminantes relevantes priorizadas. A partir de las actividades a realizar para cada proyecto, inventariar y organizar los siguientes elementos según el cronograma de implementación del PMAA: a. Equipo de laboratorio: en función de los parámetros físico-químicos a analizar y el número de muestras que se deben almacenar y procesar por mes y por año. b. Elementos de trabajo de campo: en función de las mediciones que se deben realizar a campo, tanto en actividades de la red de monitoreo como en campañas de caracterización e instalación de sitios piloto. Por ejemplo: medidores de niveles, temperatura y pH, conductividad eléctrica, equipo de titración a campo, instrumentos de medición continua. c. Procesos de registro y organización de la información generada en el laboratorio: los resultados de los análisis deben quedar organizados para que puedan ser integrados en el Centro de Apoyo (proyecto 3.2.3) y puedan ser usados en los proyectos del PMAA que usan esta información. d. Recursos humanos: horas de trabajo y capacidad técnica/profesional requerida para trabajo de campo, trabajo de laboratorio, trabajo de escritorio (interpretación de resultados). 2) Elaborar el plan de acción para el fortalecimiento del laboratorio incluyendo equipos requeridos con los límites de detección adecuados. a. Inventariar equipo de laboratorio, elementos de trabajo de campo y servicios disponibles en el laboratorio ambiental del DAGMA al comienzo de la implementación del PMAA. Realizar una estimación de la vida útil restante de los equipos disponibles. b. Inventariar equipo de laboratorio, elementos de trabajo de campo y servicios que serán necesarios para la implementación de los proyectos del PMAA, detallando el momento en el que serán necesarios (cronograma 2021-2030). c. Inventariar equipo de laboratorio, elementos de trabajo de campo y servicios que son y serán necesarios para otros planes y procesos internos del DAGMA (cronograma 2021-2030). d. Identificar oportunidades de redundancia: mejoras con las que se podrán llevar a cabo actividades tanto del PMAA como de otros planes y procesos internos del DAGMA. e. Identificar puntos de competencia entre procesos: momentos del cronograma 2021-2030 en los que el PMAA hará uso del laboratorio y sus equipos, resultado en falta de disponibilidad para otros planes y procesos internos del DAGMA. f. Considerando las fortalezas y limitaciones del DAGMA y el presupuesto del PMAA, identificar cuáles son los equipos y procesos que deberán rentarse o tercerizarse. g. Siguiendo un principio de eficiencia, invertir en equipos y procesos en el laboratorio ambiental del DAGMA, de manera tal que se maximicen oportunidades de redundancia y se minimice la competencia con otros planes y procesos internos del DAGMA.
Período de implementación (cronograma): Este proyecto debe implementarse en los primeros 6 meses del PMAA. Se requiere tomar decisiones en cuanto inversión de recursos cuanto antes, para una correcta implementación del PMAA.

Corto plazo (2021-2023)	**Mediano plazo = (2024 – 2027)**	**Largo plazo = (2028 – 2030)**

X		
Presupuesto: US$24000 ($120,000,000.oo) (no incluye el costo de inversión, sólo su evaluación y planificación).		
Productos		
Laboratorio ambiental DAGMA fortalecido con equipos apropiados y protocolo ajustado para el monitoreo de indicadores de contaminación		

6.5 Articulación

Se analiza la articulación del PMAA Zona urbana de Santiago de Cali con otros planes de manejo ambiental. Los planes consultados, disponibles oficialmente a la fecha, son: el POT, el PAMCC y el PMAA Valle. Se también se hace mención del POMCA para las cuencas hidrográficas de relevancia.

6.5.1 Plan de Ordenamiento Territorial (POT) Cali (2014)

El POT es un instrumento de ordenación ambiental que tiene por objetivo "Ordenar el territorio municipal tomando en cuenta las condiciones de desarrollo de la región, potenciando el papel del municipio de Santiago de Cali como núcleo principal de la región de ciudades, integradas y complementarias y propendiendo por su aporte a un modelo regional, en la medida de sus potencialidades, restricciones y características propias. ". En el marco de la gestión ambiental del recurso hídrico, los POTs deben ajustarse a los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), según Decreto 1640 del 2012.

El Acuerdo 0373 de 2014 define la visión, objetivo, agenda regional, y los lineamientos y elementos de un modelo de ordenamiento territorial. Ya que se trata de una reglamentación, se identifican algunos artículos de relevancia para el PMAA. Se recomienda consultarlos en detalle a medida que esto sea necesario durante la implementación de los proyectos del PMAA, así como sus mapas e instrumentos de gestión asociados, ya que reflejan prioridades y necesidades de ordenamiento de procesos en superficie (Tabla 6-1).

Tabla 6-1 Artículos del POT Cali 2014 relevantes para el PMAA

Artículos del POT de mayor relevancia para el PMAA (y aclaraciones donde se considera necesario).
Artículo 25. Suelo Urbano.
Artículo 26. Suelo Rural.
Artículo 27. Suelo de Expansión Urbana.
Artículo 63. Componentes de la Estructura Ecológica Principal (donde se incluyen "Recurso hídrico superficial (humedales, ríos, quebradas, nacimientos) y sus áreas forestales protectoras" y "Zona de recarga de acuíferos en suelo rural." Como áreas de especial importancia ecosistémica)
Artículo 64. Normas Generales Aplicables a la Estructura Ecológica Principal.
Artículo 66. Áreas Protegidas del SINAP
Artículo 69. Áreas de Especial Importancia Ecosistémica (reglamentadas por el Decreto Nacional 3600 del 2007)
Artículo 77. Suelos de Protección Forestal.

Artículo 83. Recurso Hídrico Superficial y sus Áreas Forestales Protectoras (nacimientos de agua, corrientes superficiales, humedales).
Artículo 88. Zonas de Recarga de Acuíferos en Suelo Rural
Artículo 95: Calidad de las aguas subterráneas
Artículo 103: Calidad ambiental y servicios públicos (relacionado al sistema de alcantarillado y PSMV).
Artículo 143. Planificación del Sistema de Servicios Públicos Domiciliarios y TIC (relacionado al abastecimiento de agua potable y estrategias para la gestión del riesgo por inundaciones y sequía).
Artículo 146. De los criterios para la ubicación de Servicios Públicos Domiciliarios y TIC (Por ejemplo: estaciones de bombeo, sistemas de tratamiento de aguas residuales, pozos de abastecimiento).
Artículos 147 - 152: Subsistema de abastecimiento de agua potable, en particular el Artículo 152 (Aguas Subterráneas como Fuente Alterna de Abastecimiento de Agua Potable).
Artículos 153- 157: Subsistema de recolección, transporte y tratamiento de aguas residuales (relacionado al sistema de alcantarillado).
Artículos 166 - 187: Sistema de Gestión Ambiental de Residuos sólidos
Artículos 246 - 272: Sistema de Espacio público (relacionado a la preservación de la recarga en zonas urbanizadas y a urbanizar)
Artículo 285. Área de Expansión Urbana
Artículos 359 – 364: Sistema de Servicios Públicos Domiciliarios y TIC en el suelo rural
Artículo 393: Área de Manejo Zona Rural de Regulación Hídrica (define zonas que presentan potencial para la protección del recurso hídrico)
Artículos 399 - 415: Actividades en suelo rural (incluyendo minería)

En particular, hay tres artículos en el POT que son de importancia para el PMAA en cuanto a reglamentación, ya que hacen referencia explícita al manejo de las aguas subterráneas:

- El Artículo 63, “Componentes de la Estructura Ecológica Principal”, en el cual se definen como “áreas de especial importancia ecosistémica” dos elementos de la gestión integral del recurso hídrico. Por un lado, el recurso hídrico superficial (humedales, ríos, quebradas, nacimientos) y sus áreas forestales protectoras. Por otro, las “Zona de recarga de acuíferos en suelo rural”.

- El Artículo 88, “Zonas de Recarga de Acuíferos en Suelo Rural”, las cuales son consideradas suelos de protección ambiental por su importancia en la recarga de los acuíferos. Su uso y aprovechamiento sólo se permitirá bajo las condiciones establecidas en determinados artículos del POT: Artículo 424, Artículo 425, Artículo 428, Artículo 431,Artículo 432, Artículo 433, Artículo 434, Artículo 435, Artículo 436, Artículo 437, Artículo 438, Artículo 439, Artículo, 440, Artículo 441. Se establece que “en la zona de recarga de acuíferos no se permite la instalación de rellenos sanitarios, nuevos cementerios, industrias con actividades potencialmente peligrosas para la contaminación de las aguas subterráneas, estaciones de servicios con tanques enterrados, lagunas de tratamiento de aguas residuales y aplicación sobre el suelo de productos que, al lixiviarse, por su composición física, química o bacteriológica, puedan afectar las características del agua subterránea.”

- El Artículo 95, “Calidad de las aguas subterráneas” , el cual limita la ocurrencia de actividades potencialmente contaminantes (con especial mención de estaciones de servicio) en zonas de alta y extrema vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea. También establece que en dichas zonas la autoridad ambiental debe realizar un estricto control para conservar la calidad de las aguas subterráneas. Cita los dos instrumentos existentes para la reglamentación de la gestión del acuífero: el Acuerdo C.D. 042 de 2010 de la CVC y la Resolución DAGMA 001 de 2003, y requiere

la obtención de un mapa de riesgo de contaminación de Acuíferos por medio del trabajo conjunto de DAGMA y CVC.

- El Artículo 96, “Afloramiento de Aguas Subterráneas”, el cual requiere la presentación, para su aprobación, de un plan de manejo ambiental ante la autoridad ambiental, en caso de que un proyecto de construcción o estudios de suelo evidencia que puede haber intervención directa del acuífero, ocasionando afloramientos de aguas subterráneas. El proyecto debe implementar estrategias que preserven la calidad y cantidad del recurso hídrico subterráneo, y controlen posibles afloramientos.

Los artículos del POT considerados relevantes para cada proyecto se pueden apreciar en la Tabla 6-2. Se observa que las conexiones entre ambos planes se dan para proyectos del PMAA en la Línea Estratégica 1 (Gestión de la demanda y la oferta Hídrica Subterránea) y Línea Estratégica 2 (Preservación de la calidad del recurso hídrico subterráneo). Se trata de reglamentación que zonifica el suelo según sus usos permitidos y necesidad de conservación, establece lineamientos para el uso y manejo de los recursos hídricos, y plantea lineamientos que ordenan actividades potencialmente contaminantes.. Ya que muchos proyectos de las líneas 1 y 2 del PMAA deben brindar recomendaciones para la gestión del acuífero (mucha veces ligada a su interacción con los procesos de superficie), es importante que consideren las oportunidades y limitaciones que brinda el POT en cuanto a normativa. Para ello, se recomienda realizar una revisión de la reglamentación del POT que abarque al menos (pero no necesariamente se limite a) los artículos detallados para cada proyecto en la Tabla 6-2.

Si bien el POT posee artículos y proyectos ligados a la educación, la participación y la capacitación técnica de los actores del territorio, no se encontraron conexiones explícitas con los objetivos de la Línea Estratégica 3 del PMAA (Fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza). Aun así, el proyecto Proyecto 3.1.1 del PMAA (“Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo”) crea y hace uso de instrumentos como mesas de trabajo para la articulación en la gestión, canales de comunicación y programas de educación que brindan oportunidades interesantes para aunar esfuerzos entre el PMAA y el POT.

Tabla 6-2 Artículos del POT relevantes para proyectos específicos del PMAA.

Proyecto PMAA Cali	**Artículos de relevancia en POT 2014**
Proyecto 1.1.1: Evaluación de los impactos de pozos radiales sobre el acuífero en la margen izquierda del río Cauca.	83, 95, 143, 146, 147-152.
Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico	63, 64, 66, 69, 77, 83, 88, 246-272, 393.
Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema	63, 66, 69, 88, 95, 96, 153-157, 166-168, 285, 393, 399-415.
Proyecto 1.1.4: Caracterización hidrogeológica de la Unidad C y evaluación de su potencial para el abastecimiento humano	63, 64, 69, 88.
Proyecto 1.2.1: Definición de determinantes para la conservación, protección y recuperación de la oferta hídrica subterránea en áreas intervenidas o a intervenir urbanísticamente en zonas de recarga	25, 26, 27, 63, 64, 69, 77, 88, 246-272, 285.

Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo	64, 96, 143, 147-152.
Proyecto 1.3.2: Estimación de módulos de consumo de agua por sectores productivos.	64, 143, 147-152.
Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes	64, 69, 83, 88, 95, 103, 146, 153-157, 166-187, 393, 399-415.
Proyecto 2.1.2: Caracterización de actuales y potenciales procesos de contaminación al acuífero y propuestas de posibles soluciones en sitios priorizados	64, 69, 83, 88, 95, 103, 146, 153-157, 166-187, 393, 399-415.
Proyecto 2.1.3: Estudio de las interacciones entre el sistema de alcantarillado y el acuífero	64, 66, 83, 95, 103, 143, 146, 153-157, 359-364.

Además de la reglamentación, el POT posee programas y proyectos que tienen el objetivo general de ordenar y transformar favorablemente la estructura territorial de Santiago de Cali. La relación del POT con el PMAA por medio de sus proyectos se puede comprender contrastando los objetivos de los proyectos de cada plan (Tabla 6-3):

Tabla 6-3 Relaciones temáticas entre el POT Cali y el PMAA

Proyectos del POT que se centran en…:	**…se relacionan con proyectos del PMAA cuyo objetivo es…:**
…la preservación de corredores ambientales, restauración de cuencas, de paisajes y ecosistemas prioritarios, inventariado y manejo de humedales…	…reforzar la red de monitoreo de cantidad y calidad del acuífero, estudiar las zonas de recarga para su propia conservación y la de ecosistemas dependientes.
…la caracterización y ordenamiento de actividades potencialmente contaminantes (con énfasis en el manejo de residuos sólidos y en el sistema de alcantarillado)…	…zonificar el riesgo de contaminación del acuífero y proponer soluciones de monitoreo y de manejo de la contaminación en superficie.
…el desarrollo del recurso hídrico subterráneo (nuevos pozos de explotación) para promover el abastecimiento y la resiliencia del sistema, y la promoción de prácticas sostenibles…	…favorecer un balance entre oferta y demanda del recurso hídrico subterráneo, cuantificando la recarga para su preservación, y conociendo la demanda para su gestión efectiva y eficiente.

La conexión de proyectos del PMAA con programas y proyectos específicos del POT permite identificar oportunidades concretas de colaboración y articulación, para dar soluciones a necesidades identificadas por ambos planes. Se identifican a continuación los proyectos del PMAA que poseen relación con programas y proyectos del POT. Se listan dos Proyectos Estratégicos (Tabla 6-4), tres Programas Dotacionales Estructurales desde el Sistema Ambiental (Tabla 6-5) y diez Proyectos Sectoriales (Tabla 6-6).

Tabla 6-4 Proyecto estratégicos del POT relacionados con proyectos del PMAA.

Proyecto estratégico del POT	Proyecto PMAA
Proyecto de Corredores Ambientales. (Incluyendo el Corredor Ambiental del río Pance) – Artículo 446.	Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema
Pozos para Abastecimiento de Agua a la Red Urbana en Situaciones de Emergencia o Catástrofe. (relacionado a oferta y demanda) – Artículo 448.	Proyecto 1.1.4: Caracterización hidrogeológica de la Unidad C y evaluación de su potencial para el abastecimiento humano Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo Proyecto 1.3.2: Estimación de módulos de consumo de agua por sectores productivos.

Tabla 6-5 Programas Dotacionales Estructurales desde el Sistema Ambiental del POT relacionados con Proyectos del PMAA.

Programas Dotacionales Estructurales desde el Sistema Ambiental	Proyecto PMAA
Programa de Recuperación de las Cuencas Hidrográficas (Incluye la recuperación integral de las cuencas de los ríos Cali, Lili, Meléndez, Cañaveralejo y Pance) – Artículo 458.	Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico. Proyecto 1.2.1: Definición de determinantes para la conservación, protección y recuperación de la oferta hídrica subterránea en áreas intervenidas o a intervenir urbanísticamente en zonas de recarga.
Programa Recuperación Ambiental y Paisajística de Humedales -Artículo 459.	Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico. Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes. Proyecto 2.1.2: Caracterización de actuales y potenciales procesos de contaminación al acuífero y propuestas de posibles soluciones en sitios priorizados.
Programas y Proyectos Dotacionales Estructurales de Sistema de Servicios Públicos Domiciliarios y TIC – Artículo 462.	Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema. Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes.

	Proyecto 2.1.3: Estudio de las interacciones entre el sistema de alcantarillado y el acuífero.

Tabla 6-6 Proyectos Sectoriales del POT relacionados con Proyectos del PMAA.

Proyecto Sectorial POT 2014	**Proyecto PMAA**
Plan de Restauración Ecológica y Ambiental para la recuperación de los ecosistemas degradados del municipio (Proyecto 9).	Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico. Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes. Proyecto 2.1.2: Caracterización de actuales y potenciales procesos de contaminación al acuífero y propuestas de posibles soluciones en sitios priorizados.
Actualización del inventario de Humedales (Proyecto 13).	Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico. Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo.
Planes de manejo de los humedales del municipio, priorizando los de origen natural (Proyecto 14).	Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico. Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo.
Estudios de caracterización parcial de las áreas de conservación y protección ambiental, para poder definir prioridades de conservación y criterios de manejo (Proyecto 15).	Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico. Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo.
Estudios de riesgo de contaminación de acuíferos en el marco del Plan de Manejo de Aguas Subterráneas a nivel municipal (Proyecto 18).	Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo. Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes.
Clasificación de las áreas fuentes de contaminación en zona urbana y rural del territorio municipal, identificando los contaminantes que exceden la norma de calidad del aire, y elaborando programas de reducción de	Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo. Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes.

la contaminación con el fin de desarrollar acciones y medidas que permitan reducir los niveles de concentración de los contaminantes (Proyecto 19).	
Plan de acción municipal de mitigación y adaptación al cambio climático (Proyecto 21).	Proyecto 3.1.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo
Definición de estrategias, líneas de acción e instrumentos que promuevan la construcción sostenible (Proyecto 22).	Proyecto 1.2.1: Definición de determinantes para la conservación, protección y recuperación de la oferta hídrica subterránea en áreas intervenidas o a intervenir urbanísticamente en zonas de recarga. Proyecto 3.1.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo.
Plan Maestro de Servicios Públicos Domiciliarios y TIC (Proyecto 23)	Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema. Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes. Proyecto 2.1.3: Estudio de las interacciones entre el sistema de alcantarillado y el acuífero.
Estudios necesarios que permitan definir el uso y manejo que se le debe dar a la capacidad instalada existente, así como identificar la ubicación de nuevos pozos y sus rendimientos para la utilización de aguas subterráneas como fuente alterna de abastecimiento hídrico, en el marco de la formulación del Plan Maestro de servicios públicos domiciliarios y TIC. (Proyecto 25)	Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico. Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo. Proyecto 1.3.2: Estimación de módulos de consumo de agua por sectores productivos.
Estudios técnicos, ambientales, económicos y sociales para establecer la ubicación de infraestructura para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (Proyecto 28).	Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema. Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes.
Estudios de impacto ambiental para la delimitación del área de aislamiento del Relleno Sanitario de Navarro (Proyecto 31).	Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema. Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes.

6.5.2 Plan de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático de Cali (205)

El Plan de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático de Cali (PAMCC) tiene una visión a 2040, y el objetivo de “Proponer los elementos iniciales de planificación y gestión para la adaptación y mitigación al cambio y la variabilidad climática en el municipio de Santiago de Cali, desde una mirada institucional”. En su documento, el plan identifica también otras herramientas con las que cuenta el municipio para hacer frente a las amenazas y efectos ligados al Cambio

Climático: el Portafolio de Adaptación al Cambio Climático, El Inventario Municipal de Gases de Efecto Invernadero, la Identificación de Islas de Calor, La Microzonificación Climática, la Estrategia Municipal de Desarrollo Bajo en Carbono, los resultados del proyecto Cambio Climático, Vulnerabilidad y Salud.

Los objetivos específicos del PAMCC son:

- Producir información en torno a la adaptación y mitigación al cambio y la variabilidad climática para el municipio de Cali, articulándola a los análisis ya existentes.
- Describir y analizar las condiciones del clima que generan amenazas, riesgos y desastres para la población y los ecosistemas.
- Generar elementos que orienten la toma de decisiones de ordenamiento y desarrollo territorial compatibles con el clima.

El documento caracteriza las situaciones climáticas de Santiago de Cali y sus impactos en el marco de la gestión territorial. También brinda lineamientos de adaptación y mitigación en base a los retos identificados. De especial interés para el PMAA son las oportunidades identificadas desde el Portafolio de Adaptación para Santiago de Cali, entre las que se destacan por su relevancia para el PMAA:

- Fortalecimiento del sistema de monitoreo y vigilancia hidrometeorológico e hidroclimático mediante la modernización gradual de las estaciones existentes y la ubicación de nuevas estaciones en cuencas y ecosistemas prioritarios.
- Diseño e implementación de un sistema multipropósito de alertas tempranas por fenómenos meteorológicos basado en tecnología y en comunidades para la planificación agropecuaria detallada por unidades agrológicas y la gestión de riesgos de origen natural y a la salud pública.
- Adquisición, restauración y mantenimiento de áreas estratégicas para la conservación y regulación del recurso hídrico de conformidad a lo dispuesto en la normatividad colombiana.
- Realizar un análisis de vulnerabilidad municipal frente a escenarios de déficit o desabastecimiento del recurso hídrico e incorporación de los resultados en el POT o el instrumento de planificación que se considere conveniente.
- Diseño e implementación de un programa de capacitación sobre cambio climático, con énfasis en gobernanza territorial y desde un enfoque de "formación de formadores" con el fin de conformar una "red regional de conocimiento y aprendizaje sobre cambio climático".

El diseño programático para la adaptación se presenta en cinco ejes transversales:

- Gestión del riesgo climático
- Educación y Comunicación
- Producción de información
- Articulación entre actores del territorio municipal
- Aprovisonamiento continuo de servicios ecosistémicos

El Plan de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático presenta una primera delineación de programas, cuya conexión con el PMAA se puede consultar en la Tabla 6-7. Las relaciones entre ambos planes se basaron en la descripción de actividades de cada programa en el

PMACC (no detalladas en este análisis). Es importante aclarar que el documento disponible[4] informa que el mismo “pretende informar los avances en el proceso de construcción del Plan Institucional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático para Santiago de Cali, por lo cual, presenta un desarrollo intermedio en todos sus componentes”. Por tanto, durante el tiempo de implementación del PMAA se recomienda tener en cuenta las futura actualizaciones que puedan ser publicadas, a fin de identificar oportunidades de articulación más detalladas que las presentadas aquí (Tabla 6-7).

Tabla 6-7 Articulación del PMACC con el PMAA

Programa del PMACC 2015	Proyecto PMAA
Preparación de las herramientas existentes en torno al recurso hídrico de acuerdo los retos para la gestión climática.	Proyecto 3.1.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo.
Conservación (uso sostenible, recuperación y preservación) y manejo del recurso hídrico.	Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico. Proyecto 1.2.1: Definición de determinantes para la conservación, protección y recuperación de la oferta hídrica subterránea en áreas intervenidas o a intervenir urbanísticamente en zonas de recarga. Proyecto 1.3.2: Estimación de módulos de consumo de agua por sectores productivos.
Acceso equitativo al recurso hídrico.	Proyecto 3.1.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo. Proyecto 1.3.2: Estimación de módulos de consumo de agua por sectores productivos.
Producción con criterios de sostenibilidad ambiental (tecnologías apropiadas) dando mucha importancia al manejo y cuidado del recurso hídrico.	Proyecto 3.1.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo.

Se observa que las principales conexiones entre ambos planes se dan en la Línea Estratégica 1 (Gestión de la Oferta y la Demanda hídrica subterránea) y la Línea Estratégica 3 (Fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza) del PMAA. El PMACC plantea, en sus programas, acciones ligadas al estudio de escenarios de cambio climático que permitan analizar el riesgo de déficit hídrico (tanto desde la oferta como de la demanda) y promover la adaptación. Busca realizar proyecciones para hacer frente a la posible disminución de la oferta hídrica, a controlar concesiones de agua y definir prioridades de uso para el recurso hídrico. En cuanto a la gobernanza y capacidad institucional, el PMACC propone la articulación de acciones con otros planes (como el POT y POMCH), la promoción de buenas prácticas y la capacitación de usuarios en temas de sostenibilidad.

[4] *https://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/116317/cambio_climatico*

6.5.3 Avances en el desarrollo de la formulación del PMAA del Valle del Cauca

El PMAA para la zona urbanas de Santiago de Cali y el PMAA para el Valle del Cauca se han construido de forma paralela, por lo que existe un buena articulación entre ambos planes.

El Plan de Manejo Ambiental del Acuífero Valle del Cauca (PMAA Valle) compete la escala regional de dicho acuífero, cuya jurisdicción pertenece a la Corporación Autónoma Regional Valle del Cauca. Los lineamientos y medidas de manejo ambiental que el PMAA Valle brindará al acuífero regional no necesariamente deben aplicarse en la zona urbana de Santiago de Cali, la cual pertenece a la jurisdicción del DAGMA. Sin embargo, se han realizado esfuerzos de articulación de ambos planes de manejo desde el comienzo de su formulación, siendo ambos planes también complementarios en muchos de sus componentes de aprestamiento y diagnóstico. Como consecuencia, ambos planes de manejo son idénticos en cuanto a sus líneas estratégicas, encontrándose sus programas también totalmente articulados. A su vez, muchos de los proyectos del PMAA en la zona urbana de Santiago de Cali encontrarán en el PMAA Valle un proyecto de similar o de idéntico objetivo (Tabla 6-8).

Tabla 6-8 Relaciones entre proyectos del PMAA Cali y PMAA Valle

Proyecto PMAA zona urbana de Santiago de Cali	**Proyecto PMAA Valle del Cauca**
Proyecto 1.1.1: Evaluación del potencial para abastecimiento humano para la ciudad de Santiago de Cali del acuífero en la margen izquierda del río Cauca	Proyecto 1.1.6: Evaluación del potencial para abastecimiento humano del acuífero en las márgenes del río Cauca
Proyecto 1.1.2: Evaluación de procesos de recarga y descarga del acuífero, con un enfoque al estudio de elementos que permitan avanzar hacia la actualización de los modelos conceptual y numérico	Proyecto 1.1.4: Validación de zonas de recarga y selección de cuencas que requieren intervención de la oferta y/o la demanda
	Proyecto 1.1.5: Profundización del conocimiento de la relación agua subterránea-agua superficial
Proyecto 1.1.3: Fortalecimiento de la red de monitoreo del estado del sistema	Proyecto 1.1.1: Fortalecimiento de la red de monitoreo de niveles y calidad
Proyecto 1.1.4: Caracterización hidrogeológica de la Unidad C y evaluación de su potencial para el abastecimiento humano	Proyecto 1.1.3: Mejora de la comprensión de la hidrogeología del en la Unidad C
Proyecto 1.2.1: Definición de determinantes para la conservación, protección y recuperación de la oferta hídrica subterránea en áreas intervenidas o a intervenir urbanísticamente en zonas de recarga	Proyecto 1.2.1: Implementación de medidas de preservación de la recarga
Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterránea y generación de medidas de acción para su manejo	Proyecto 1.3.1: Fortalecimiento del inventario de puntos de aguas subterráneas y generación de medidas de regularización
Proyecto 1.3.2: Estimación de módulos de consumo de agua por sectores productivos.	Proyecto 1.3.2: Mejoramiento de la eficiencia en el uso del recurso hídrico subterráneo

Proyecto 2.1.1: Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes	Proyecto 2.1.2: Fortalecimiento de la red de monitoreo de potenciales fuentes contaminantes
	Proyecto 2.1.3 Zonificación del riesgo del acuífero cuantificando la magnitud de potenciales fuentes contaminantes (en tierra y en ríos).
	Proyecto 2.2.1: Implementación de proyectos de remediación y control de la contaminación en sitios piloto (articulación con POMCA)
Proyecto 2.1.2: Caracterización de actuales y potenciales procesos de contaminación al acuífero y propuestas de posibles soluciones en sitios priorizados	Proyecto 2.1.1: Caracterización de actuales y potenciales procesos de contaminación al acuífero, y propuesta de posibles soluciones en sitios priorizados
	Proyecto 2.2.1: Implementación de proyectos de remediación y control de la contaminación en sitios piloto (articulación con POMCA)
Proyecto 3.1.1: Promoción de procesos de participación y articulación con los actores involucrados e interesados en el manejo, planificación y protección del recurso hídrico, el territorio y el suelo	Proyecto 3.1.1: Robustecimiento de canales de comunicación entre actores del PMAA.
	Proyecto 3.1.2: Creación de mesas de trabajo constituidas por diferentes actores para mejorar la articulación de la toma de decisiones ligada al PMAA.
	Proyecto 3.1.4: Capacitación de usuarios y promoción de buenas prácticas, uso eficiente del agua y prevención de la contaminación
Proyecto 3.2.1: Mejoramiento de la capacidad interna del Grupo de Recursos Hídricos y otros grupos relevantes del DAGMA en cuanto al manejo de recursos de agua subterránea	Proyecto 3.2.1: Robustecimiento de la capacidad técnica sobre el manejo del recurso de agua subterránea y la implementación efectiva del PMAA.
Proyecto 3.2.2: Revisión y actualización de la resolución 001 de 2003, con base en el PMAA, incluyendo protocolos de operación que se identifiquen necesario para mejorar los trámites y procedimientos sobre el uso y manejo de agua entre DAGMA y el usuario.	Proyecto 3.2.3: Revisión y actualización del Acuerdo 042 en base al PMAA
Proyecto 3.2.3: Centro de apoyo para la toma de decisiones en torno a la gestión del agua subterránea	Proyecto 3.2.2: Centro de apoyo para la toma de decisiones en torno a la gestión del agua subterránea

La existencia de numerosas sinergias entre ambos planes de manejo de acuíferos brinda una valiosa oportunidad para colaborar en una implementación más efectiva y eficiente de los proyectos de manejo de las aguas subterráneas a diferentes escalas. Buscando plantear objetivos en común para los proyectos del PMAA Valle y PMAA del Acuífero Valle del Cauca en la zona urbana de Santiago de Cali, se espera que se logre la sincronización de esfuerzos entre CVC y DAGMA en el manejo del recurso que ambas autoridades ambientales deben gestionar.

En muchos casos, la articulación entre planes (PMAAs) se puede dar desde el intercambio de datos e información a distintas escalas, principalmente ligado a la obtención de resultados de la

Línea Estratégica 1 (Gestión de la oferta y la demanda hídrica subterránea) y de la Línea Estratégica 2 (Preservación de la calidad del recurso hídrico subterráneo). Es el caso, por ejemplo, de la instalación e implementación de sitios piloto para comprender los procesos que gobiernan la cantidad y calidad de las aguas subterráneas, el monitoreo de niveles y parámetros químicos o la obtención de parámetros hidrogeológicos e hidráulicos a campo.

En otros casos, la colaboración entre DAGMA y CVC se puede establecer respecto a los esfuerzos respectivos de implementación del PMAA y a la construcción de una buena gobernanza del agua. Es el caso de los proyectos de la Línea Estratégica 3 (Fortalecimiento de la capacidad institucional y de gobernanza), cuyos objetivos pueden ser alcanzados más fácilmente si DAGMA y CVC intercambian experiencias y aúnan esfuerzos de gestión. Por ejemplo, intercambiando experiencias y lecciones aprendidas respecto a la elaboración y uso de instrumentos de gestión y reglamentación en base al conocimiento y recomendaciones generados en las otras dos líneas estratégicas. También se recomienda que ambas autoridades ambientales compartan frecuentemente lecciones aprendidas en cuanto a la construcción de capacidad institucional e interacciones con los otros actores del territorio.

6.5.4 POMCAs

Los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAs) son instrumentos a través de los cuales se realiza la planeación del uso coordinado del suelo, el agua, la flora y la fauna; la ejecución de obras y tratamientos manteniendo el equilibrio entre el aprovechamiento social y económico y la conservación de la estructura y el recurso hídrico.

Los ríos cuya ordenación y manejo son de mayor relevancia para el PMAA en la zona urbana de Santiago de Cali son los ríos Cali, Aguacatal, Lili, Melendez, Cañaveralejo y Pance. Existe también influencia de los ríos Arroyohondo hacia el norte de la ciudad y el río Jamundi hacia el sur. Los POMCAs en su ejecucion deberan maximizar las oportunidades de articulación con los objetivos y proyectos del presente PMAA. De igual forma, es necesario que durante la implementación del PMAA se tengan en cuenta oportunidades y recomendaciones para sincronizar esfuerzos del manejo de las aguas subterráneas con el ordenamiento ambiental de las cuencas hidrográficas, en el marco de la gestión integral del recurso hídrico. A su vez, los POMCAs deben tomar, cono insumo para la planificación de las aguas subterráneas, los proyectos y conocimientos aportados por el PMAA.

7 Conclusiones

7.1 Aprestamiento

Las aguas subterráneas en la zona urbana del municipio de Santiago de Cali están siendo utilizadas desde la década de 1940. Inicialmente, desde el año 1968 hasta el año 1995 el manejo de las aguas subterráneas estuvo a cargo de la CVC, posteriormente entre los años 1995 y 2002 el manejo se realizó en conjunto entre CVC y DAGMA y a partir del año 2003 es el DAGMA la entidad encargada exclusivamente del manejo de las aguas subterráneas en la zona.

De los más de 40 años de uso de agua subterránea para la ciudad de Cali se cuenta con información que permitió alimentar el diagnóstico del recurso para el PMAA, incluyendo columnas litológicas de pozos, pruebas de bombeo, niveles de agua subterránea, volúmenes extraídos del acuífero y concesiones para los diferentes usos en la zona.

Instituciones a nivel nacional como el SGC y el IDEAM, a nivel regional como EMCALI y el instituto CINARA fueron claves para el desarrollo del PMAA para la ciudad de Cali debido a su labor en investigación y producción de información en torno a la gestión del recurso hídrico.

Instituciones como la CVC, el SGC (anteriormente INGEOMINAS), ACODAL, SAF y el DAGMA han realizado estudios relacionados con la geología y la hidrogeología local que han sido insumos importantes para realizar el diagnóstico. La geología más reciente y detallada que se tiene para la zona urbana del municipio es producto del estudio de microzonificación sísmica para Santiago de Cali, proyecto en el cual se aumentó la escala a 1:20.000 a partir de los estudios geológicos regionales realizados por el IGAC para la región (escala 1:50.000).

Actualmente el DAGMA cuenta con una red de monitoreo de las aguas subterráneas en su área de jurisdicción cuya construcción inició en el año 2010 y que cuenta actualmente con 56 piezómetros. El análisis de la red indica que la distribución y densidad permite caracterizar los flujos de agua subterránea, sin embargo se ha identificado la necesidad de nivelar todos los piezómetros y de instalar nuevos piezómetros cercanos a las zonas de ladera, así como en otros puntos de interés.

Durante el presente PMAA se hizo una tarea de organización y sistematización en formato digital y unificado de los expedientes de puntos de aguas subterráneas inventariados en el DAGMA.

A partir de la información de los expedientes, se recopilaron columnas litológicas de los pozos en la zona urbana del municipio. Para el área de expansión, el área rural del municipio y de los municipios vecinos dentro del área de estudio, se recopilo informacin hidrogeológica de las bases de datos de CVC. Además, se digitalizaron columnas adicionales de los estudios de suelos presentes en el archivo grupo de Gestión Urbanística Ambiental del DAGMA.

La información recopilada de volúmenes extraídos de aguas subterráneas corresponde a los consumos entre los años 2013 y 2017.

La información de niveles de agua subterránea recolectada se tiene desde el año 2010 para el área urbana del municipio y desde el año 2000 para las áreas de expansión, rural del municipio y de municipios vecinos.

El volumen actual concesionado de aguas subterráneas para el área de jurisdicción del DAGMA es de aproximadamente 11 Mm3/año. El principal usuario de las aguas subterráneas es el área industrial con un volumen total del 68% de las aguas concesionadas, sin embargo, este sector representa solo el 10% de las concesiones. Por otro lado, el 45% de las concesiones están destinadas al lavado de vehículos y representan el 12% del volumen total concesionado.

Se han identificado dos frentes para la recolección de información primaria faltante: 1) Información de niveles continuos del agua subterránea que permita conocer la dinámica a lo largo del año y para las diferentes zonas hidrogeológicas de interés 2) Información hidroquímica e isotópica que permita estimar la recarga proveniente de las unidades rocosas. Dentro del desarrollo del PMAA se realizó un estudio para conseguir información referente al segundo punto (estimación de la recarga proveniente de las unidades rocosas).

A partir del inventario suministrado por el DAGMA se identificaron y categorizaron en total 655 actores sociales relacionados con el recurso hídrico subterráneo en la ciudad de Cali. Los actores fueron agrupados en ocho categorías para su caracterización. El sector con mayor número de actores es el sector de servicios con un 57% seguido del sector comercial con un 15%, los sectores institucional, industrial, productivo, construcción, académico y comunitario representan menos del 5% cada uno.

La puesta en marcha de instrumentos de planificación para la gestión ambiental, en este caso, para el manejo ambiental del recurso hídrico, pretende incorporar procesos de participación social, que garanticen la intervención efectiva de los actores sociales en la toma de decisiones durante la planeación y ejecución de dichos procesos. En tal sentido, los resultados obtenidos, durante las jornadas de socialización realizadas con los diferentes actores en el marco de la ejecución de la Fase de aprestamiento del PMAA Cali, evidenciaron la importancia de hacer partícipes a los diferentes actores en el desarrollo de este proceso, no solo por el hecho participar, sino de garantizar el ejercicio pleno de los derechos constitucionales de Participación y de un ambiente sano.

Como se ha planteado en la guía metodológica del Ministerio de ambiente, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), la fase de aprestamiento es preparatoria al proceso de formulación y se puede agregar al proceso de participación, ya que con estos ejercicios de acercamiento y conocimiento de los intereses y expectativas de los actores sociales, se sientan las bases iniciales para continuar el proceso de intercambio de conocimiento y de planificación sobre las diferentes situaciones que pueden afectar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico subterráneo.

La oportunidad de realizar reuniones por grupos de actores, facilitó el desarrollo del análisis de los intereses frente a las acciones que son necesarias realizar para dar continuidad al proceso, además de posibilitar la comunicación y difusión del proyecto a otros actores que no participaron de estas jornadas de socialización. En esta fase quedaron definidas iniciativas de apoyo y acompañamiento al proceso por parte de los diferentes actores sociales.

7.2 Diagnóstico

Caracterización hidrogeológica
Las características de los materiales que conforman los conos aluviales están relacionadas con los flujos torrenciales de los ríos asociados a cada abanico y por el tipo de rocas de las respectivas cuencas hidrográficas. El cono aluvial del río Cali se caracteriza por la presencia de una capa superficial de arcillas limosas que suprayace una serie de intercalaciones de materiales gravosos. El cono del río Cañaveralejo presenta materiales finos de origen volcánico y se caracteriza por la presencia de materiales arcillosos y limosos de varios metros de espesor con intercalaciones de capas de material orgánico y esporádicamente se encuentran lentes de arena fina y algunas gravas. El cono aluvial de los ríos Meléndez y Lili se caracterizan por la presencia de una capa superficial de materiales suprayaciendo a estratos granulares con cantos, gravas y bloques de rocas diabásicas con intercalaciones de materiales finos predominantemente arcillas duras. Por último, el abanico de Pance se caracteriza por la presencia de una pequeña capa de materiales limosos no mayor a 4 metros de espesor suprayaciendo a un estrato muy duro compuestos de gravas y cantos en matriz arcillosa.
Las Unidades A y C están claramente diferenciadas bajo el río Cauca, en la zona de llanura aluvial, donde la Unidad B alcanza espesores de hasta 70 metros. En este sector, La Unidad A también alcanza sus espesores máximos, entre 70 y 80 metros. En los abanicos aluviales la Unidad B se pincha, y las Unidad A y C aparecen conectadas formando un solo acuífero.

En cuanto a las transmisividades del acuífero, hacia el piedemonte y la parte media alta de los conos aluviales se encuentran valores de entre 5 y 30 m^2/ día, delimitando acuíferos relativamente pobres o de poco espacio. En la parte distal de los conos aluviales, la transmisividad aumenta, con valores entre 30 y 100 m^2/día. Los valores máximos de entre 100 y 400 m^2/día se localizan hacia el este de la zona de estudio en las cercanías al río Cauca, en la zona de descarga del acuífero, estos valores coinciden con la zona de mejores características hidrogeológicas.

Recarga
Para la zona urbana la recarga difusa por precipitación (y retorno de riego allí donde hay cultivos) promedio anual se estima aproximadamente en 140mm que equivalen a 15Mm^3. En la zona de expansión la recarga difusa es de 460mm que equivalen a 7.5Mm^3. Para todo el término municipal, la recarga anual por precipitación y retorno de riego se esima en 400mm que equivalen a unos 100Mm^3.

Un componente de la recarga antrópica de acuíferos en áreas urbanas son las filtraciones de agua que pueden darse por fugas en las tuberías subterráneas. Para el año 2017, se estima un total de 770 mm/año de recarga al acuífero proveniente de las fugas por tuberías en el sistema de acueducto. Esto representa el 82% de toda la recarga que llega al acuífero.

Sistemas de flujo de aguas subterráneas
En el cono de Pance las isopiezas divergen en la dirección de flujo, lo que indica un sistema de recarga de gran magnitud. La recarga proviene principalmente del Río Pance, cuyo lecho está compuesto principalmente por materiales gruesos limpios, facilitando la interacción del río con los sedimentos del cono. A la entrada del perímetro urbano, el curso del río cambia de oeste a este en dirección norte-sur. En este punto ocurre gran infiltración de agua subterránea hacia el cono aluvial del Pance. Adicionalmente, la densa red de acequias en el sector de Pance contribuye con la recarga del cono aluvial.

La parte alta del cono de río Cali también representa una zona de recarga, en menor magnitud que el cono de Pance. La dirección del flujo es en dirección Oeste - Este hacía el río Cauca, aunque el curso del río tiene una dirección predominante suroeste – noreste. Las principales zonas de recarga se dan en la parte alta del cono y la recarga directa por infiltración es muy baja ya que casi todo el cono se encuentra en zona urbana construida.

Para Cali se identificó una zona prioritaria de recarga, ubicada principalmente en el cono aluvial del río Pance. La recarga en esta área representa el 82% de la recarga total del acuífero en la ciudad, y de acuerdo al sistema de flujo alimenta el acuífero y se mueve a través de él hacia el norte hasta el paleodrenaje del río Cañaveralejo, el cual tenía su desembocadura en el sector del actual paso a Juanchito. Por esto, la recarga que ocurre en esta área es importante para gran parte de la ciudad, ya que sus aguas se dirigen a zonas donde existen pozos de agua para los diferentes usos concesionados, y hacia la zona de descarga en el este de la ciudad: donde actualmente se estudia el potencial del acuífero para el consumo humano en la ciudad de Cali, y donde existen cuerpos de agua como madreviejas y humedales que dependen de esta descarga de agua subterránea para mantener sus niveles y por consiguiente los servicios ecosistémicos que prestan.

Calidad del agua
Los parámetros analizados como indicadores de contaminación indican afectaciones en algunos puntos que se pueden resumir en zonas de la ciudad en donde se requiere más atención y mejorar los datos para realizar el monitoreo de la calidad: el área comprendida entre los ríos Cañaveralejo y Meléndez, el paleodrenaje del río Cañaveralejo, la zona centro de la ciudad y la zona norte alrededor del río Cali. La contaminación microbiológica en la ciudad de Cali puede darse principalmente por rupturas en el sistema de alcantarillado que producen infiltración de aguas contaminadas al acuífero, sin embargo, los indicadores en algunos puntos pueden deberse a una fuente puntual de contaminación que solo fue medida en determinado muestreo pero que no se mantiene en el tiempo. Otra fuente potencial de contaminación para las aguas subterráneas en la ciudad que debe ser monitoreada en mejor detalle son los ríos en las zonas de recarga, donde el agua que entra en el área acuífera se infiltra haciendo parte de la recarga por ríos.

Existe la necesidad de realizar muestreo y análisis de calidad del agua subterránea a todos los puntos de la red de monitoreo de agua subterránea para aquellos parámetros que son indicadores principales de contaminación como la conductividad eléctrica, los nitratos, los coliformes totales y los coliformes fecales, COT, DBO y DQO. Realizar estos análisis por lo menos dos veces al año, continuamente, solo con los parámetros seleccionados permitirá hacer un monitoreo más eficiente, contar con los datos necesarios para el seguimiento, y poder evaluar si existen zonas con tendencias al aumento en la contaminación.

Modelo numérico
Se desarrolló un modelo numérico estacionario y otro transitorio con datos mensuales, ambos para el periodo enero de 2007 a diciembre de 2017. El modelo numérico estacionario se calibró y sirvió de base para el transitorio. Los resultados de los modelos (niveles del agua subterránea, zonas de recarga y descarga, líneas de flujo, balance hídrico), fueron de gran importancia para caracterizar el sistema hidrogeológico y posteriormente correr escenarios climáticos y de usos del suelo para caracterizar las amenazas. En cuanto a la edad del agua, el modelo está estimando que el agua en la Unidad A tiene entre 100 y 900 años, y en la Unidad C hasta 2500 años. Según algunos datos de isótopos, la edad del agua de la Unidad C parece ser bastante más antigua (unos 15.000 o 30.000 años).

Balance hídrico

Según el balance hídrico en la zona urbana, la principal entrada de agua se da a través de las pérdidas de acueducto (56% equivalente a 70.2Mm^3/a). Las otras entradas son el agua infiltrada por los ríos (22% equivalente a 27Mm^3/a), el flujo regional (10% equivalente a 12.7Mm^3/a), y la recarga por precipitación (12% equivalente a 14.9Mm3/a). La principal salida es la que se da a través de los sistemas de drenaje urbano, ya sea el alcantarillado, los sistemas pluviales, sótanos o galerías filtrantes (79% equivalente a 148.1Mm^3/a), seguida por el flujo regional (14% o 25.8Mm^3/a), los pozos (4% o 7.5Mm^3/a), el drenaje hacia acequias (3% o 4.7Mm^3/a), y los ríos (1Mm^3/a). Además, el flujo de agua desde la Unidad C a la Unidad A se ha identificado como un flujo de suma importancia. La oferta renovable disponible puede considerarse como la suma de la recarga difusa y la recarga por los ríos, es decir, 112.2Mm^3/a.

El volumen almacenado en la Unidad A se ha estimado como el volumen total almacenado en los poros de todos los sedimentos que conforman la Unidad A. Este volumen de agua no es equivalente al volumen extraíble sino al total almacenado. El valor se estima en 1120Mm^3.

El IEAS considerando la recarga por precipitación y pérdidas de acueducto se estimó para las 3 cuencas en un 20% para la cuenca del río Cali, un 10% para la cuenca del los ríos Lili-Meléndez-Cañaveralejo, y un 6 % para la cuenca del río Pance (Jamundí). Considerando que las pérdidas por acueducto pueden cambiar a futuro, si el IEAS se calcula usando solamente la recarga por precipitación, los valores del IEAS son los siguientes: Cuenca del río Cali: 128%, Cuenca de los ríos Lili-Meléndez-Cañaveralejo: 28% y Cuenca del río Pance: 7%.

Para la zona urbana el IEAS se calculó utilizando diferentes valores para la recarga según los componentes considerados (recarga por precipitación, reacarga por pérdidas de acueducto, recarga por los ríos) y las extracciones promedio de agua subterránea de la zona urbana. Así, los valores obtenidos varían de un 9% si se consideran todos los componentes de la recarga, a un 65% si solamente se considera la recarga por precipitación.

Componente social

En el proceso de conocer la realidad de los actores sociales que conviven con las dinámicas de la ciudad y la relación que puedan tener estas con el acuífero, se logró identificar amenazas y riesgos relacionados con las aguas subterráneas a través de la metodología dialogo de saberes, que además, permitió Identificar necesidades y aportes en torno al conocimiento y gestión de las mismas en la ciudad. Se identificó que los actores sociales participantes reconocieron el potencial de las aguas subterráneas como una alternativa para la supervivencia y pervivencia de las generaciones y encontrándose motivados y con expectativas de continuar con el proceso del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero de Santiago de Cali.

Es importante resaltar que, se evidenció la necesidad de construir conocimiento en conjunto con instituciones y la comunidad en general como un medio para reforzar el tema del recurso hídrico subterráneo, debido a que este es poco conocido y existe una limitación en el número de personas que pueden llegar a trabajar e intervenir sobre el tema de manera profunda, lo que genera que el recurso hídrico continúe siendo vulnerable ante las acciones cotidianas que pudiera realizar la comunidad y afecte el aprovechamiento del acuífero.

7.3 Amenazas

Las principales amenazas sobre el acuífero y las aguas subterráneas identificadas en el PMAA se pueden agrupar en los siguientes temas:

- Amenazas relacionadas con la oferta y la demanda
- Amenazas relacionadas con la contaminación de las aguas subterráneas
- Amenazas relacionadas con la gobernanza y el fortalecimiento institucional

Oferta y demanda

Las dos amenazas identificadas y que están estrechamente relacionadas son el cambio de la condición de zona de recarga del suelo y el descenso de niveles. Las causas principales de estas amenazas son i) el cambio climático, ii) la impermeabilización de zonas de recarga, iii) la toma errada de decisiones sobre las intervenciones de usos del suelo por falta de conocimiento sobre afectación al acuífero por obras urbanísticas, las relaciones entre las aguas superficiales y las subterráneas, el proceso de recarga, o los procesos de infiltración y drenaje hacia y desde las tuberías, iv) la gestión no integral de los recursos hídricos por falta de conocimiento sobre los temas mencionados en el punto anterior, y v) la extracción excesiva de caudales de aguas subterráneas.

Los efectos e impactos de las amenazas identificadas son i) las pérdidas económicas por la necesidad de perforar pozos más profundos, ii) el menor flujo ambiental a ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas que puede llevar a pérdidas económicas por el reemplazo de servicios ecosistémicos, y iii) la escasez hídrica, falta de agua para los usuarios y conflictos por el uso del agua.

Contaminación de las aguas subterráneas

La principal amenaza es la afectación a la calidad del agua subterránea derivada de fugas o derrames de sustancias peligrosas, infiltración desde tanques sépticos o letrinas en el suelo, infiltración o inyección de aguas contaminadas por medio de sistemas de recarga artificial o de fuentes superficiales contaminadas, o filtraciones al acuífero desde del sistema de alcantarillado. Las causas de estas amenazas se relacionan con una debilidad en la aplicación de la norma por parte de los usuarios, y una debilidad en la descripción y protocolo de los procesos de control, que llevan a la autoridad ambiental. Otras causas se relacionan con el desconocimiento de los efectos de actividades potencialmente contaminantes en superficie, o por la deficiencia en la regulación de ciertas actividades contaminantes. Otras causas están relacionadas con la falta de profundización en el análisis del transporte de contaminantes en el agua y en los procesos de remediación, lo que lleva a una toma de decisiones errada sobre intervenciones y usos del suelo. Otra causa importante es la falta de conocimiento sobre las relaciones entre aguas superficiales y subterráneas, y otra el incumplimiento por parte del usuario de la norma. Finalmente, las fallas en el sistema de alcantarillado son obviamente la causa principal de las filtraciones de aguas grises y negras al acuífero. Los impactos derivados de estas amenazas son el riesgo de incendios y explosiones por sustancias peligrosas, los altos costos en procesos de remediación, las afectaciones a la salud, las afectaciones a los ecosistemas asociados, los conflictos por usos del agua entre usuarios y la autoridad ambiental, y el aumento de costos de provisión de agua por el aumento de costos de tratamiento de las aguas.

Gobernanza y el fortalecimiento institucional

La gestión inadecuada de los recursos hídricos y la pérdida de memoria institucional, que se constituye como la principal amenaza, junto con la desarticulación entre los diferentes planes e instrumentos de reglamentación y manejo, y el aumento de extracciones de agua subterráneas

ilegales. Las causas son la inadecuada cooperación interinstitucional que se da por la baja articulación y una comunicación insuficiente, el poco diálogo con la academia, la inadecuada promoción de procesos participativos con los actores y usuarios, la insuficiente educación ambiental de los actores, los bajos costos del agua subterránea, la insuficiente capacidad del DAGMA relacionada con la falta de recursos humanos, conocimiento técnico y coordinación interna junto con la temporalidad de los profesionales y su consecuente pérdida de memoria institucional. Otra causa es que el DAGMA no dispone de herramientas adecuadas para la gestión eficiente de los recursos hídricos, tales como un sistema de información procesos y trámites de control, sanciones y permisos. Otra causa importante es la financiación inadecuada, que a su vez tiene como efecto la deficiente gestión, ya que no existen los recursos necesarios para llevar a cabo el tipo de proyectos que DAGMA requiere. Los principales impactos son la afectación de la calidad del agua subterránea y el cambio en la condición de recarga/descarga del suelo.

7.4 Formulación

Durante la fase de formulación se consiguió desarrollar una visión para la ciudad de Cali para el año 2050, a partir de la cual se obtuvieron los objetivos a futuro. Estos objetivos se resumen como: 1) Uso sostenible del recurso hídrico subterráneo, 2) Gestión integral de calidad, cantidad, oferta y demanda del recurso hídrico subterráneo para asegurar la disponibilidad del recurso para todos los usuarios incluyendo el ambiente, 3) Adaptación al cambio climático, y 4) Fortalecimiento de todos los actores sociales y de las instituciones para garantizar los objetivos anteriores.

En línea con estos objetivos se definieron las tres líneas estratégicas para el PMAA: 1) Gestión integral de la oferta y la demanda hídrica subterránea, 2) Mantener y asegurar la calidad del recurso hídrico subterráneo y 3) Fortalecer la capacidad institucional y de gobernanza del recurso hídrico subterráneo. Para cada línea se definieron programas y proyectos.

Finalmente se evaluó la articulación de los programas y proyectos propuestos por el PMAA de Cali, con los programas y proyectos propuestos por los siguientes planes: POT, Plan de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático, POMCAs y avances en el desarrollo de la formulación del PMAA para el Valle del Cauca.

Componente social
Los actores sociales manifestaron que la implementación de programas de educación ambiental dirigidos al recurso hídrico subterráneo, no pueden ser entendidos como capacitaciones o jornadas esporádicas, sino como el entramado de proyectos con objetivos y lineamientos claros dirigidos a entregar conocimientos claves en aguas subterráneas a la comunidad en general. Ya que, hacer del recurso hídrico subterráneo un conocimiento común es un factor clave para garantizar un adecuado uso, manejo y utilización del mismo en la actualidad y para las generaciones futuras.

Componente de comunicaciones
El objetivo de la comunicación en el desarrollo del PMAA se enfocó en diseñar una estrategia que integró a los diversos actores sociales, usuarios directos e indirectos del recurso hídrico subterráneo, instituciones aportantes del proyecto, entidades relacionadas directa e indirectamente con el agua subterránea, ciudadanía en general y por supuesto a las áreas de Comunicaciones del DAGMA y la CVC, porque fue a través de su revisión, validación, visto bueno y canales de comunicación que se difundió toda la información del PMAA.

Cabe destacarse que en el avance del plan se evidenció que existía un actor social fundamental que debía estar presente en todo el proceso, el cual no se visualizó inicialmente como un actor, sino como un canal y fueron los medios de comunicación (radio, prensa, tv, etc). En la ciudad de Cali existe una fuerte empatía entre ellos y la población, y esto permite que la información se difunda y llegue a lugares y zonas donde solo los medios pueden hacerlo.

Fue así como se estructuró el alcance de la comunicación para el PMAA, a través del diseño e implementación de la estrategia de comunicación en las fases establecidas: aprestamiento, diagnóstico y formulación. Haciendo uso de un formato que se denominó plan de medios, en el que se registraron las diferentes actividades realizadas, el actor o los actores a los que se direccionó la convocatoria, el canal o medio través del cual se efectuó la difusión, el producto y finalmente la fecha de realización de la jornada y/o actividad.

Destacando algunos aspectos de cada fase, en aprestamiento se requirió la gestión de espacios de difusión en medios de comunicación local, con el fin de posicionar el tema del recurso hídrico dentro de la comunidad en general. Siete medios de comunicación entre radio y televisión accedieron a entrevistar y emitir en vivo y en directo a los expertos en la materia; la experiencia fue enriquecedora para todos porque se trató de la primera oportunidad para los técnicos de hablar en público del tema, para los medios el abordar un tema tan complejo que no habían conocido anteriormente, despejando dudas, aprendiendo términos y visualizando una realidad nunca antes presentada.

En la fase de diagnóstico se realizó una actividad de gran interés y expectativa denominada “Salida de Campo”, en la cual se convocó a los diferentes actores sociales al recorrido por la ciudad de Santiago de Cali, visitando lugares estratégicos relacionados con el recurso hídrico subterráneo. En dicha actividad se contó con el acompañamiento de expertos del DAGMA, CVC y la Fundación Deltares de Holanda, quienes explicaron la teoría vista en las anteriores convocatorias al igual que la dinámica de las aguas subterráneas en la ciudad y la relación con el entorno.

En la fase final de formulación, la asistencia se mantuvo incluyendo la participación activa de la representante del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

El proceso de participación de los actores en todo el desarrollo del plan permitió a los diferentes actores sociales conocer nuevos aspectos del recurso hídrico subterráneo y reconocer la influencia que cada uno puede ejercer en su preservación, uso y manejo. El proceso fue interesante para las instituciones para valorar el tiempo que los actores dedicaron a la participación activa, y de forma general fue una gran oportunidad para la ciudad para contar con la colaboración de los actores sociales y las instituciones en el desarrollo del PMAA.

Los actores también manifestaron que los proyectos deben contar con una fuerte red institucional que permita que la información brindada se interiorice desde las etapas básicas de formación de las personas. En este orden de ideas, es pertinente contar con un grupo de actores informados, capacitados, conocedores de la situación actual del acuífero y constructores de la realidad para que los proyectos propuestos prosperen, y se direccionen al fortalecimiento organizacional y estructural disposición de conocimientos empíricos y técnicos que custodien la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo.

8 Bibliografía

ACODAL, & DAGMA. (1998). Estudio de Aguas Subterráneas en el municipio de Santiago de Cali.

ACODAL, UNIVALLE, CVC, & DAGMA. (2004). Identificación de vertimientos puntuales y tomas de agua en los cauces de los ríos Meléndez, Cañaveralejo y quebradas afluentes en el perímetro urbano del municipio de Santiago de Cali.

Alcaldía de Santiago de Cali (2015, 2016, 2018). Cali en Cifras

Amezquita Naranjo Ingeniería & CIA S.C.A. (2008). Exploración geotécnica para reforzamiento Jarillón río Cauca Santiago de Cali.

Balwant, W., Klaus, B., Ramakar, J., Rafig, A. (2018). Impact of urbanization on groundwater recharge and urban water balance for the city of Hyderabad, India. International Soil and Water Conservation Research. Volume 6, Issue 1, March 2018, Pages 51-62

Bradbury K. Drippes W. Hankley C. Anderson M. Potter K. (2000). Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge. University of Wisconsin. 84 pp. Wisconsin, USA.

Cámara de Comercio de Cali (2017). Informe Calidad de vida, Cali cómo vamos. Cámara de Comercio de Cali. Santiago de Cali.

Carmona, A., & Muñoz, L. (2004). Plan de manejo ambiental para el humedal urbano lago Panamericano ubicado en la ciudad de Santiago de Cali.

CI Ambiental. (2011). Complemento estudios de licuación para Santiago de Cali y áreas de influencia.

CIAT, DAGMA, & CVC, C. A. R. del V. del C. (2015). Estudio para la Microzonificación Climática para el Municipio de Santiago de Cali.

CIAT (2017). Construcción de escenarios de Cambio Climático Departamental, Valle del Cauca. Metodología y resultados. Elaborado por METEOSIM S.L.

CINARA, UNIVALLE, & IHE. (2008). Urban Water Management For the City of Cali, Diagnosis Report. Sustainable Water Improves Tomorrow's Cities Health - SWITCH Project.

CINARA, CVC, & DAGMA. (2018). Informe de análisis del sector empresarial de Cali.

Civita, Massimo y Maio, Marina de. (1990). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian" combined" approach.

Consorcio jarillones y dragados 2011. (2012). Estudio de Susceptibilidad y Mitigación del Fenómeno de Corrimiento Lateral en la margen izquierda del río Cauca.

Contreras, R. (2006). Plan de manejo ambiental humedal Marañón, El Hormiguero, Cali.

CUSTODIO, E. (1994). Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas. Cuenca del Guadalquivlr. Informe IGME. Inédito

CVC, C. A. R. del V. del C. (2000). Plan de Manejo para las Aguas Subterráneas en el departamento del Valle del Cauca.

CVC, & UNIVALLE (2000). Caracterización del río Cauca tramo Salvajina – La Virginia, (11).

CVC & Ambiental (2006). Fundación Mundo.

CVC, C. A. R. del V. del C., & Ambiental, F. M. (2006). Plan de manejo ambiental Humedal Navarro, Municipio de Santiago de Cali.

CVC & UNIVALLE (2007). El río Cauca en su valle alto: un aporte al conocimiento de uno de los ríos más importantes de Colombia

CVC, C. A. R. del V. del C., & Muñoz, L. (2007). Plan de recuperación el humedal “Antiguo cauce del río Melendez” ubicado en el municipio de Santiago de Cali.

CVC, Faneca Sánchez, M. Delsman, J., Werner, M., Céspedes, G., Stigter, T., Fernandez, A. (2016). Evaluación de las aguas Subterráneas en Condiciones climÁtiCas ExtremaS en el Valle del cauca. Informe técnico resultado 2c – Caracterización y modelación del sistema hidrogeológico del Valle del Cauca

DAGMA. (2005a). Plan de manejo ambiental Humedal Urbano Lago de Los Cisnes - Babilla.

DAGMA. (2005b). Plan de manejo ambiental Humedal Urbano Lago de Los Cisnes - Garzas.

DAGMA. (2006). Plan de manejo ambiental integral Humedal Cañasgordas.

DAGMA, & Fundación Río Cauca. (2006). Plan de manejo ambiental Relicto Boscoso Zanjón del Burro

DAGMA, & Fundación Río Cauca. (2007). Plan de manejo ambiental río Melendez.

DAGMA. (2010). Informe de caracterización de los humedales Charco Azul, El Pondaje, La Babilla, Las Garzas y Panamericano.

DAGMA. (2011). Informe de caracterización de los humedales Charco Azul, El Pondaje, El retiro, La Babilla, La Riverita, Las Garzas, Limonar y Panamericano, 2011, 1–23.

DAGMA. (2011). Informes de caracterización de aguas e índice de calidad de los ríos Aguacatal, Cali, Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Pance.

DAGMA. (2011b). Informe de caracterización humedal Las Garzas, 1–16.

DAGMA. (2012a). Informe de caracterización de aguas e índice de calidad de los humedales Babilla, Charco Azul, Pondaje, Limonar, Las Garzas, El Retiro, La Riverita y Panamericano.

DAGMA. (2012b). Informes de caracterización de aguas e índice de calidad de los ríos Aguacatal, Cali, Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Pance, 2012, 1–62.

DAGMA. (2013a). Índices de calidad de agua de ríos y humedales de Cali para el primer semestre del año 2013.

DAGMA. (2013b). Índices de calidad de agua de ríos y humedales de Cali para el segundo semestre del año 2013.

DAGMA. (2015). Índice de calidad de los ríos Aguacatal, Cali, Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Pance.DAGMA. (2013a). Índices de calidad de agua de ríos y humedales de Cali para el primer semestre del año 2013.

DAGMA. (2016a). Informes de caracterización de aguas e índice de calidad de los ríos Aguacatal, Cali, Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Pance (Sem. 1).

DAGMA. (2016b). Informes de caracterización de aguas e índice de calidad de los ríos Aguacatal, Cali, Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Pance (Sem. 2).

DAGMA. (2017a). Informe técnico del laboratorío ambiental del DAGMA - Red piezométrica (Vol. 2016).

DAGMA. (2017a). Informes de caracterización de aguas e índice de calidad de los ríos Aguacatal, Cali, Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Pance (Sem. 1, Sem. 2).

Diaz-Granados, M., (1998). Curvas sintéticas regionalizadas de intenstidad-duración-frecuencia para Colombia. https://www.scribd.com/doc/249526743/Vargas-Diaz-Granados-CurvasIDF-

1998

Doerfliger n., Jeannin P. Y. & Zwahlen F. (1997). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). Environmental Geology, Vol. 39 (2).

EMCALI. (2013). Informe de gestión 2013 EMCALI EICE ESP.

EMCALI. (2014). Informe de gestión 2014 EMCALI EICE ESP.

EMCALI. (2015). Informe de gestión 2015 EMCALI EICE ESP.

EMCALI. (2016a). Informe de gestión 2016 EMCALI EICE ESP.

EMCALI. (2016b). Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos – PSMV EMCALI.

EMCALI. (2017). Programa de uso eficiente y ahorro del agua - PUEAA.

Erazo, L. J. (2017). Evaluación de la amenaza asociada a las condiciones geotécnicas que causan daños a la red de acueducto de EMCALI, Santiago de Cali.

Faneca Sanchez, M., Zahid, A., Oliemans, W. (2019) Determining the Potential for Managed Aquifer Recharge (MAR) for the Bengal Basin, Bangladesh. Topic no: 4 (223#). ISMAR10 Proceedings Book.

Foster S., Hirata R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. s.l. : Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences

Fundacion Oiko, & CVC, C. A. R. del V. del C. (2010). Plan de Manejo Ambiental Laguna Charco Azul.

Fundación Pacífico Verde. (2010). Diagnóstico del estado actual de los diques en el distrito de Aguablanca.

García, M. (1995a). Mapa contornos de isomadurez en las formaciones Guachinte y Ferreira.

García, M. (1995b). Mapa estructural al tope del Oligoceno y localización de prospectos de gas asociados a mantos de carbón de las formaciones Guachinte y Ferreira.

García, M. (2010). Balance Hídrico de las Aguas Subterráneas - Municipio Santigo de Cali, (20).

Garcia, M., & Molano, M. (2015). Informe de calidad y niveles de la red de piezometros municipio de Santiago de Cali.

Gleeson, T., Befus, K., Jasechko, S. et al. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. Nature Geosci 9, 161–167. https://doi.org/10.1038/ngeo2590

Global Water Partnership (GWP), IWRM toolbox on management instruments: https://www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/Management-Instruments

Hidro-Occidente. (2005). Estudio de amenaza por inundación del área con régimen diferido de navarro y su entorno, de vulnerabilidad y de estado de las obras de mitigación existentes.

Hidro-Occidente. (2012). Mapas de la modelación de amenaza por inundaciones en la ciudad de Cali por el río Cauca y sus tributarios.

ICESI, & DAGMA. (2010). Diagnóstico de los impactos de las escorrentías naturales y artificiales en la comuna 22.

INGEOMINAS & CVC (1971). Hidrogeología del Valle del Cauca entre Santander y Quilichao y el Sonso.

INGEOMINAS (2001). Mapa Geológico del Departamento del VAlle del Cauca.

INGEOMINAS. (2003). Inventario de procesos morfodinámicos del sector de los cerros de Cali.

INGEOMINAS, & DAGMA. (2005). Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Santiago de Cali.

JAM Ingeniería y Medio Ambiente. (2017). Estudios hidrológicos en la Fase I para la reglamentación de las corrientes hídricas en la comuna 22, quebrada, derivaciones, subderivaciones 4, 5 y 6 del río Pance, área del municipio de Santiago de Cali.

Jaramillo Llorente MF. (2006). Aplicación metodológica para la estimación de la recarga potencial por precipitación para la zona centro del departamento del Valle del Cauca. Universidad del Valle, 125pp. Cali, Colombia.

Keizer, J. (1954). Estudios geológicos en la región de Jamundí entre los ríos Guachinte y Jordán.

Lopez Cardona, M. (2006). Análisis de deformación tectónica en el piedemonte de las cordilleras central y occidental Valle del Cauca, Colombia - Contribuciones Paleosísmicas.

MADS. (2014). Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos.

MADVT. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH).

Margat, J. (1968). Vulnerabilite des nappes d'eau souterrune a la pollution (Groundwater Vulnerability to Contamination). Bases de al cartographie (Doc.) 68 SGC 198HYD, BRGM, Orleans

Mario García (1995a). Mapa contornos de isomadurez en las formaciones Guachinte y Ferreira.

Mario García (1995b). Mapa estructural al top del Oligoceno y localización de propsectos de gas asociados a mantos de carbón de las formaciones Guachinte y Ferreira.

Narváez G; León G. (2001). Caracterización y zonificación climática de la Región Andina. Meteorología Colombiana 4:121–126

Nivia, A (1996). El Complejo Estructural Dagua, registro de deformación de la Provincia Litosferica Oceánica Cretácica Occidental en un prisma acrecionario. Conference: VII Congreso Colombiano de GeologíaAt: Sociedad Colombiana de Geología, Apartado Aéreo 14074, Bogotá, ColombiaVolume: VII Congreso Colombiano de Geología Memorias, III, páginas 54-67

Nivia A. (2001). Mapa Geológico del Departamento del Valle: Cali, Colombia. Ingeominas escala 1:250.000

Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, OCDE, (2015), Principios de Gobernanza del Agua de la OCDE

Osorio Morales, J.S. (2018) Estimating the role of block mountain recharge in alluvial aquifers. MsC Thesis IHE.

Ramos, J. (2011) Analysis of aquifer vulnerability and water quality using SINTACS and geographic weighted regressionAugust 2011Environmental Earth Sciences 66(8)

Rueda, M. y Betancur, T. (2006).Evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en el Bajo Cauca Antioqueño. https://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/9340

SAF, & DAGMA. (2000). Estudio cantidad y calidad de acuíferos en el área urbana de Santiago de Cali.

Tovar, M., R.,Rodriguez, (2004). Vulnerability assessment of aquifers in an urban-rural environment and territorial ordering in León, Mexico Geofísica Internacional, october-december, año/vol. 43, número 004 Universidad Nacional Autónoma de México Distrito Federal, México pp. 603-609

(2) (PDF) Vulnerability assessment of aquifers in an urban-rural environment and territorial ordering in León, Mexico. Available from:

https://www.researchgate.net/publication/28078987_Vulnerability_assessment_of_aquifers_in_an_urban-rural_environment_and_territorial_ordering_in_Leon_Mexico [accessed Apr 24 2020].

Villamil Echeverry, L.A., y Walteros, C. (2018) Convenio Interadministrativo No. 0191 de 2017 Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) – Universidad del Valle

Universidad Tecnológica de Berlín, & OSSO - Univalle. (2000). Evaluación de los niveles potenciométricos en el acuífero de Cali.

9 Anexos

9.1 Anexo 1

Relación de documentos entregados de la fase de aprestamiento

General	Nombre del producto	Descripción	Formato	Ruta
Expedientes de puntos de agua	**Expedientes**	699 expedientes de puntos de aguas subterráneas escaneados y marcados	711 archivos pdf	
Plantilla SIRH	**Formularío Único Nacional de Aguas Subterráneas – FUNIAS**	801 puntos en pestaña FUNIAS, 308 puntos con información de niveles y 648 puntos con información de construcción	Excel	\Productos digitalización\SIRH y digitalización final\20180807_Subterraneas - Registro FUNIAS V2017.11.15_V3 20180214.xlsm
Plantilla SIRH	**Registro de concesiones-vertimientos**	305 concesiones para personas naturales, 461 concesiones a personas jurídicas	Excel	\Productos digitalización\SIRH y digitalización final\20180807_Subterraneas - Registro Concesiones-Vertimientos V2017.11.15.xls
Plantilla SIRH	**Registro Unidades – Puntos de Monitoreo - Mediciones**	834 análisis de laboratorío para 293 pozos de producción, 129 análisis de laboratorío para 56 piezómetros	Excel	\Productos digitalización\SIRH y digitalización final\20180807_Subterraneas - Registro Unidades-Puntos Monitoreo-Mediciones V2017.11.15_V2-Piezometro.xls \Productos digitalización\SIRH y digitalización final\20180807_Subterraneas - Registro Unidades-Puntos Monitoreo-Mediciones V2017.11.15_V2-Produccion.xls
Otros	**Perfiles de litología y diseño**	271 perfiles litológicos, 382 diseños	Excel	\Productos digitalización\SIRH y digitalización final\20180807_Perfiles_Litologia_Diseno.xlsx
Otros	**Pruebas de bombeo**	879 pruebas de bombeo correspondientes a 610 puntos	Excel	\Productos digitalización\SIRH y digitalización final\20180807_Prueba de bombeo.xlsx

Otros	**Informes de construcción de los piezómetros de las cuencas Melendez y Cauca**	13 piezómetros	13 archivos pdf	\Productos digitalización\Piezometros Cuencas Melendez (PMM) y Cauca (PMC)\
Otros	**Registros eléctricos en los pozos**	extraídos de los expedientes: 29 registros	Word	\Productos digitalización\Registros Electricos Pozos\
Otros	**Inventario de expedientes**	Descripción de la información escaneada y digitalizada. Permite filtrar por número de expediente, código de pozo y tiene información del número de archivos pdf que contienen información del punto, si es una galería filtrante, los pozos de monitoreo para ese pozo (en caso de tener) y observaciones relevantes.	Excel	\Productos digitalización\20180807_Inventario Expedientes.xlsx
Otros	**Inconsistencias en nombres expedientes**	Archivo que contiene inconsistencias encontradas entre el nombre físico del expediente en la carpeta y el contenido real de cada uno	Excel	\Productos digitalización\Inconsistencias en nombres expedientes.xlsx

9.2 Anexo 2

9.2.1 Variación diaria de la precipitación

La variación diaria de la precipitación se calculó utilizando los datos de precipitación diarios de 15 estaciones ubicadas dentro del polígono de estudio. Estos datos se extrajeron de la base de datos GeoCVC. Para determinar la variabilidad espacial en la zona, se interpolaron los datos diarios medidos en las estaciones para el periodo enero de 2007 a diciembre de 2017 (Figura 9-3). La interpolación de estos datos no puede hacerse de manera directa ya que la variabilidad espacial de la precipitación diaria es muy alta. Para evitar posibles errores al interpolar valores de precipitación muy distintos, los valores diarios se normalizaron con el promedio mensual en cada celda, que fue establecido a través de una interpolación con Kriging de las precipitaciones promedio mensuales en cada estación. A continuación, se detalla la metodología aplicada:

- Calcular los valores promedio mensuales de cada estación con los datos diarios disponibles. Cada estación disponía de una serie de datos de diferente extensión temporal; algunas estaciones tienen datos disponibles desde 1965, aunque la mayoría empezaron a medir o reportar datos más tarde.

- Hacer un mapa de la precipitación promedio mensual utilizando el método Universal Kriging (UK). Dicho método de interpolación (UK) fue aplicado debido a la relación entre precipitación y elevación del terreno (como se muestra en la Figura 9-1). El variograma (un ejemplo para el mes de abril se puede encontrar en la Figura 9-2) determina la correlación espacial de los valores de precipitación en las estaciones. Para las precipitaciones mensuales la correlación espacial es alta, y llega hasta 20-25 km. Se espera que cuando se haga la correlación de la precipitación diaria esta correlación sea mucho más pequeña. La relación entre precipitación y elevación, y el variograma se determinaron para cada mes.

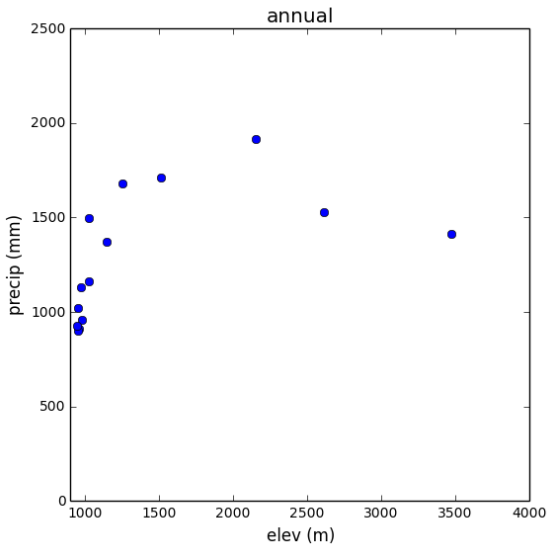


Figura 9-1. Relación de las precipitaciones anuales con la elevación para las estaciones en la zona sur del Valle

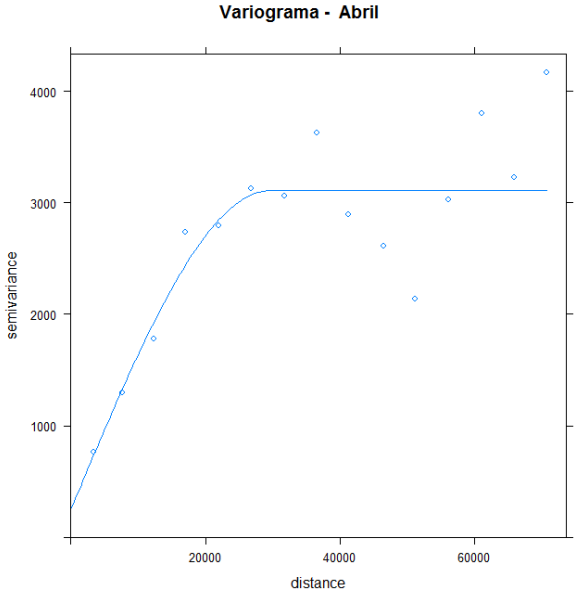


Figura 9-2. Variograma de la precipitación promedio mensual en Abril

- Utilizando el variograma de cada mes se interpoló la precipitación mensual con Universal Kriging (UK) y se obtuvo un mapa de precipitación y un mapa de la varianza de los valores interpolados.

- Para determinar la precipitación diaria escalada, se calculó por cada día y en cada estación la relación entre el valor diario registrado, y el valor promedio mensual.

$$P_t^* = \frac{P_t}{P_M}$$

Ecuación 9.1

Donde P_t es la precipitación diaria registrada en una estación, P_M es la precipitación promedio mensual en la misma celda de la estación del mapa de precipitaciones mensuales. P_t^* es el valor de precipitación escalada.

- Los valores escalados diarios por estación se interpolaron para obtener un mapa diario. La interpolación se hizo con el método de interpolación de la distancia inversa ponderada (IDW).

- En el último paso se calcularon los mapas de precipitación multiplicando los valores escalados e interpolados con la precipitación promedio mensual de cada celda.

Los últimos tres pasos se repitieron para cada día para obtener mapas con la distribución de la precipitación diaria (Figura 9-3).

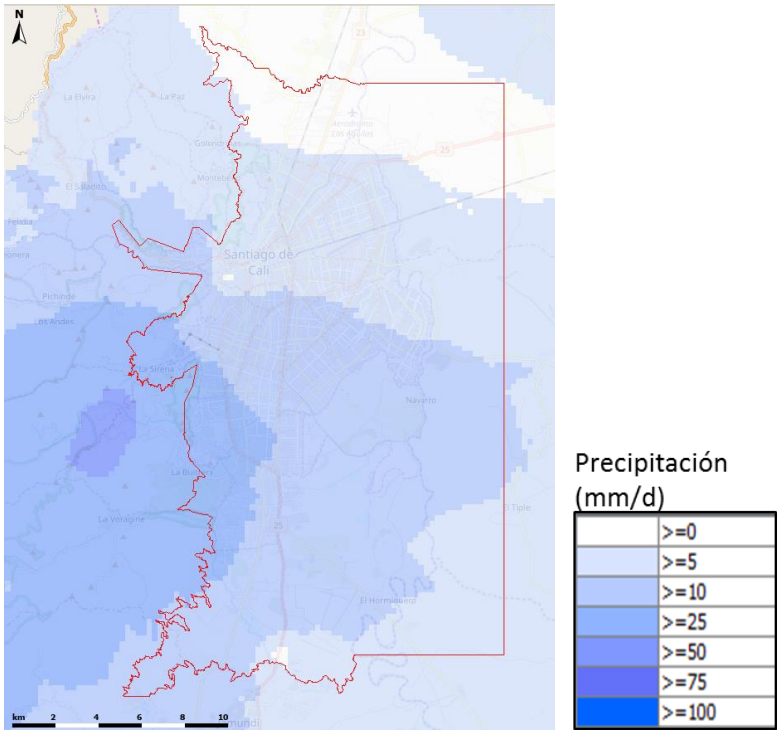


Figura 9-3 Ejemplo de un mapa de la precipitación diaria interpolada (mm/día). Se muestra el día 5 de septiembre de 2015.

9.2.2 Variación diaria de temperatura y evapotranspiración potencial

Para el balance hidrometeorológico, la evaporación (*E*) diaria es el segundo insumo climatológico. Hay varios métodos para estimar *E*, entre ellos la utilización de tanques evaporimétricos, o fórmulas de *E* como la de Penman-Monteith, Thornthwaite, y Hargreaves. Debido a la carencia de estaciones evaporimétricas con datos confiables, y a las pocas estaciones climatológicas con suficientes datos que permitan calcular la *E* con Penman-Monteith, el cálculo de *E* se hizo con la fórmula de Hargreaves que precisa de menos datos.

$$E_t^{pot} = 0.0023 \mathrm{R}_g (\mathrm{T}_t + 17.8) \sqrt{T_t^{\max} - T_t^{\min}}$$

Ecuación 9.2

Donde E_t^{pot} es la evaporación potencial de referencia diaria y T_t, $\mathrm{T}_t^{\max}$, $\mathrm{T}_t^{\min}$ la temperatura promedio, máxima y mínima en día t. El factor de radiación global, R_g se puede sacar de tablas y es función de la latitud de la zona.

Para calcular la temperatura diaria (promedio, máxima y mínima) se utilizaron las estaciones que miden estos parámetros, sin embargo, existen 5 estaciones climatológicas de las cuales se tienen datos de 1. La Tabla 9-1

Tabla 9-1 muestra los datos disponibles en las estaciones. Cabe destacar que en la mayoría de las estaciones los datos no están disponibles para todo el período de análisis.

Tabla 9-1. Estaciones con datos de temperatura

Código	Nombre	T promedia	T máxima	T mínima
2612700203	Aepto Abonilla	Si	Si	Si
2622600201	La Buitrera	Si	Si	Si
2614900201	Miravalles	Si	Si	Si
2612000109	Pitayo	Si	Si	Si
2622320201	Univalle	Si	Si	Si
2611800201	Ciat Quilichao	Si	Si	Si
2614100102	El Placer	Si	Si	No disponible
2620000202	Garzonero	Si	Si	Si
2612700201	Ing Manuelita	No disponible	Si	Si
2614100204	Santa Lucia	Si	Si	Si
2622110201	El Topacio	Si	No disponible	No disponible
2621900201	La Independencia	Si	No disponible	No disponible
2622400201	La Teresita	Si	No disponible	No disponible

La temperatura en el área de estudio tiene una marcada correlación espacial, así como una relación fuerte con la altitud. La relación con la altitud (o gradiente adiabático) se establece a través de una regresión entre los valores anuales en cada estación y la elevación del terreno. En el Valle geográfico del río Cauca el gradiente adiabático calculado es de -0.55 ºC, –0.61 ºC y -0.69 ºC por cada 100 metros de altitud para los datos de temperatura mínima, promedio, y máxima respectivamente (CVC, 2016). Con este gradiente adiabático se pueden trasladar los valores diarios a una altitud cero (nivel del mar) e interpolarlos utilizando el método de las distancias inversas ponderadas (IDW). Una vez que los valores están interpolados y se ha obtenido un valor por celda, se pueden transformar otra vez los valores de temperatura utilizando la altitud y el gradiente adiabático. Con las grillas de temperatura interpolada se puede calcular la evaporación potencial por celda.

9.2.3 Estimación del riego para las zonas de cultivo

Otro insumo importante en el cálculo del balance hídrico es el riego. En la zona de estudio el riego se aplica principalmente en los cultivos de caña de azúcar, y en la zona urbana para el riego de zonas verdes. Se debe considerar que aunque la zona urbana cuenta con zonas verdes que son irrigadas, en la zona de estudio, las zonas con mayor riego corresponden a las zonas de cultivo intensivo localizadas a la margen derecha del río Cauca, principalmente con caña de azúcar (ver Figura 9-4). Aunque en términos generales todos los cultivadores de caña de azúcar siguen un patrón de riego similar, los detalles sobre volúmenes y regímenes de riego varían según su necesidad. Aunque DAGMA y la CVC tiene datos sobre el caudal de aguas subterráneas y el régimen de bombeo concesionados, se desconocen los volúmenes totales utilizados para el riego, así como el régimen que se aplica en la práctica.

CVC (2016) desarrolló estudios de balance hídrico de la zona no saturada para diferentes esquemas de riego. El esquema más representativo corresponde a un riego programado, en el cual se aplica durante los 180 días aproximados de la época seca. La dotación diaria se calcula en función de la precipitación promedio multianual, así como la lámina de agua estimada que requiere el cultivo anualmente (i.e. 1800 mm por año para la caña de azúcar). Por lo tanto, si la precipitación multianual fuera cero, el riego diario tendría que ser de 10 mm/día, pero esto no ocurre. En realidad, si la precipitación promedio multianual es de unos 900 mm para una celda con cultivo de caña, se requiere una dotación de riego diaria de 5 mm/día durante los 180 días

(correspondientes a la época seca). Este valor se ajusta para cada celda del modelo según sea la precipitación promedio multianual en esa celda.

9.2.4 Estimación de la infiltración y la escorrentía

Cuando la precipitación llega a la superficie se divide principalmente en tres flujos; la infiltración, la escorrentía hipodérmica y la escorrentía superficial. Para este cálculo de la recarga, consideramos la escorrentía hipodérmica y la superficial como una sola ya que ambas no llegan a la zona saturada del suelo sino que alimentan las aguas superficiales o se evaporan. El agua que se infiltra sí puede potencialmente llegar a la zona saturada del suelo.

Como primera estimación y para calcular la escorrentía superficial diaria se utilizó un umbral de escorrentía diario; un valor constante por debajo del cual no se produce escorrentía y por encima del cual la escorrentía se calcula simplemente como la precipitación total diaria menos el valor del umbral. No obstante, como este umbral depende de características como la pendiente, las propiedades del suelo y la cobertura vegetal, es necesario utilizar una metodología que pudiera representar estas características y su variación espacial en el área. Para esto se aplicó el método de Número de Curvas de Jaramillo Llorente (2006). Así, la escorrentía q (mm) se calcula con la ecuación:

$$q = \frac{(P - \lambda S_{\max})^2}{(P + \lambda S_{\max})} \quad \forall\ P > \lambda S_{\max}$$

$$q = 0 \quad \forall\ P \leq \lambda S_{\max}$$

Ecuación 9.3

Dónde P es la precipitación (mm) y $S_{\max}$ (mm) es un parámetro que se obtiene a partir del número de Curva (CN). $\lambda S_{\max}$ define la cantidad de lluvia necesaria para la iniciación de la escorrentía (el umbral). En la formulación original, el parámetro λ tiene un valor de 0.2, aunque Ponce y Hawkins (1996) sugieren que este valor se puede estimar teniendo en cuenta condiciones locales. En cuencas colombianas, Díaz-Granados (1998) ajustaron el valor a 0.05, valor que se utilizó en este estudio. El valor de $S_{\max}$ se puede calcular con el número de curva:

$$S_{\max} = 25.4 \times \alpha \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)^{\beta}$$

Ecuación 9.4

Dónde CN es el Número de Curva asignado a cada celda. El valor de 25,4 es para transformar el resultado a milímetros, ya que esta ecuación se definió en los Estados Unidos y está en pulgadas. Los factores α y β dependen del valor de λ. Si $\lambda = 0.2$, ambos tienen un valor de 1, mientras que para un valor de $\lambda = 0.05$, los valores son $\alpha = 1.33$ y $\beta = 1.15$ (Jaramillo Llorente, 2006).

Para hacer el cálculo de la escorrentía superficial hay que asignar un Número de Curva (CN por sus siglas en ingles) a cada celda. El CN se puede determinar en función de la textura del suelo, la pendiente, la cobertura, y las condiciones del suelo previas al momento del cálculo. Así, dependiendo de si las condiciones del suelo son secas, húmedas, o normales, se utilizará una metodología u otra. En la Figura 9-4 se muestra el mapa de coberturas de la zona de estudio.

A continuación, se describe la metodología utilizada para el cálculo en situaciones normales: El primer paso es evaluar el grupo hidrológico al que pertenece cada celda según la relación entre la escorrentía y la infiltración, que a su vez dependen de la textura del suelo y la pendiente. Los grupos hidrológicos van de A a D, siendo el grupo A el que tiene más infiltración.

La

Tabla 9-2 muestra los grupos hidrológicos, dependiendo del tipo de suelo (derivado del mapa de los tipos del suelo de la CVC, ya que no se cuenta con un mapa detallado para la zona urbana), y de la pendiente. El siguiente paso es asignar un Número de Curva según el tipo de cobertura del suelo y del grupo hidrológico. Tanto los números de curva (Tabla 9-3) como el grupo hidrológico se adoptaron de Bradbury (2000) y Jamarillo Llorente (2006), aunque los tipos de suelo y las clases de cobertura se ajustaron según la información de la que se disponía.

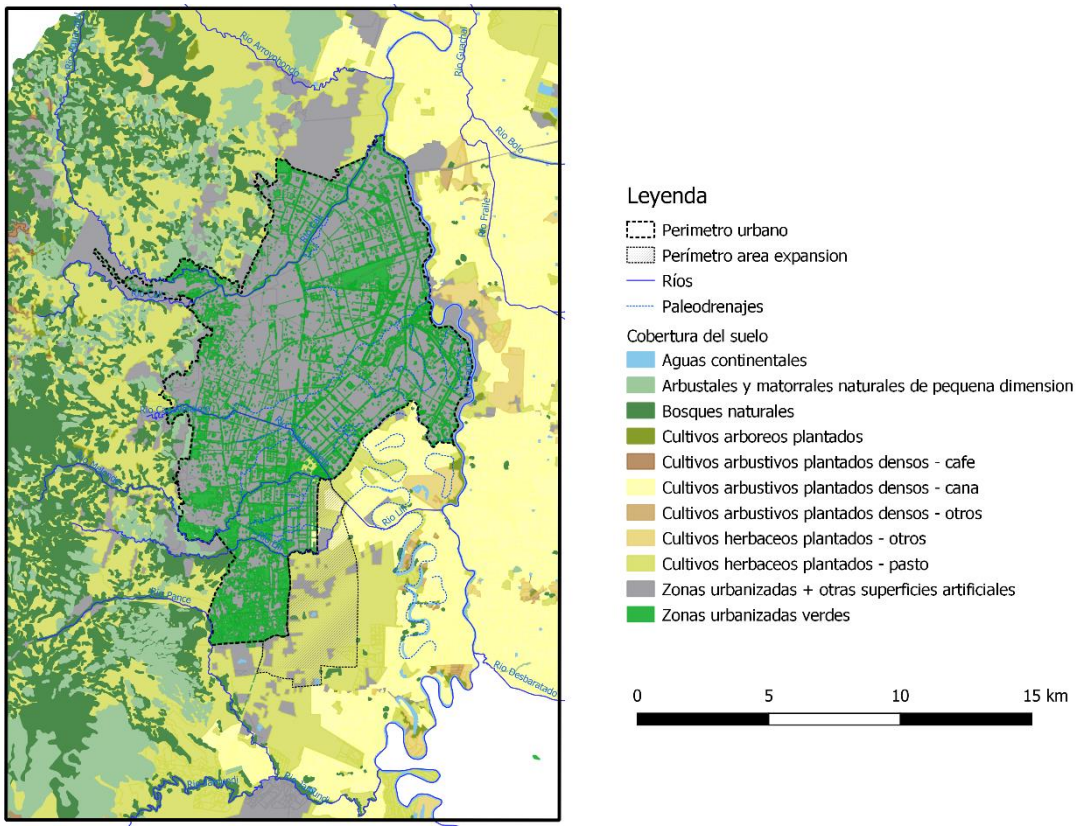


Figura 9-4 Mapa de cobertura del suelo en la zona de estudio.

Tabla 9-2 Grupo hidrológico en función de la textura del suelo y pendiente

Tipo de Suelo	Pendiente (%)					
	< 3	< 12	< 25	< 50	< 75	> 75
Suelos Arenosos Finos	A	A	B	B	B	C
Suelos Areno-Francosos	A	A	B	B	C	C
Suelos Franco-Arenosos	A	B	B	B	C	C
Suelos Francos	A	B	B	C	C	C
Suelos Franco-Arenosos Finos	A	B	B	C	C	C
Suelos Franco-Limosos	B	B	C	C	C	C
Suelos Franco-Arcillo-Arenosos	B	B	C	C	C	C
Suelos Franco-Arcillosos	B	B	C	C	C	D
Suelos Franco-Arcillo-Limosos	C	C	C	C	D	D
Suelos Arcillo-Arenosos	C	C	C	D	D	D
Suelos Arcillo-Limosos	C	C	D	D	D	D
Suelos Arcillosos	D	D	D	D	D	D
Suelos pedregosos, urbanos sin suelo, o sin información	D	D	D	D	D	D

Tabla 9-3 Número de curva en función de la cobertura del suelo y el grupo hidrológico

Cobertura del suelo	Grupo Hidrológico			
Cobertura	A	B	C	D
Cultivos arbóreos plantados	36	60	73	79
Arbustales y matorrales naturales y otras áreas naturales	39	61	74	80
Herbazales naturales	39	61	74	80
Cultivos arbustivos plantados densos - café	59	74	82	86
Cultivos arbustivos plantados densos - cana	59	74	82	86
Cultivos arbustivos plantados densos - otros	25	55	70	77
Cultivos herbáceos plantados - pasto	62	71	78	81
Cultivos herbáceos plantados - otros	62	71	78	81
Bosques naturales	59	74	82	86
Zonas urbanizadas + otras superficies artificiales	81	88	91	93
Aguas continentales	100	100	100	100

En condiciones húmedas, así como en condiciones secas, hay que ajustar los valores del número de curva asignados a cada celda. Un suelo se considera seco cuando la relación entre la humedad del suelo S y la humedad máxima S^{max} es menor a 0.6. Un suelo se considera húmedo cuando el suelo está saturado ($S/S^{max} > 0.99$). La humedad del suelo se calculó a través del balance hídrico del suelo, que se presenta en la siguiente sección. Las fórmulas para calcular el número de curva en condiciones secas y húmedas son:

$$CN_{seco} = 0.000001442 \times CN_{normal}^4 - 0.0002543 \times CN_{normal}^3 + 0.0207 \times CN_{normal}^2 - 0.007679 \times CN_{normal} + 2.0967$$
$$CN_{humedo} = -0.0000006203 \times CN_{normal}^4 + 0.0001607 \times CN_{normal}^3 - 0.02033 \times CN_{normal}^2 + 2.0105 \times CN_{normal} + 3.6543$$

Ecuación 9.5

Por cada día de cálculo se establece el comportamiento de la infiltración (en mm/día) y de la escorrentía (en mm/día) con la fórmula,

$$q = \frac{(P + D - \lambda S_{\max})^2}{(P + D + \lambda S_{\max})} \quad \forall\ P + D > \lambda S_{\max}$$
$$q = 0 \quad \forall\ P + D \leq \lambda S_{\max}$$

Ecuación 9.6

En donde *P* es la precipitación diaria (mm/día), y *D* es la dotación de riego (mm/día) en las zonas de cultivo o pastos. Según la teoría del número de curva, la infiltración *I* (mm/día) se calculó con la fórmula:

$$I = P + D - q$$

9.3 Anexo 3

Una de las actividades llevada a cabo dentro de la recolección de información primaria para completar la información faltante identificada en la fase de Aprestamiento, es la identificación de la existencia de recarga proveniente de las rocas de la ladera en el sistema acuífero.

Esta actividad se considera como una actividad inicial que ha permitido conocer la importancia de los flujos provenientes de las formaciones rocosas en el balance hídrico. A partir de las conclusiones, se han definido actividades en proyectos del PMAA..

Entre las razones por las cuales se consideró prioritaria esta actividad se encuentran:

- Además de la recarga difusa o areal proveniente directamente de la infiltración de la lluvia en el subsuelo hasta alcanzar la tabla de agua, se considera que el agua infiltrada en las zonas rocosas de la cordillera por medio de las fallas y fracturas puede ser otro componente importante de la recarga. Esta agua puede infiltrarse directamente por fracturas de las rocas o por medio de los ríos, en zonas donde los mismos sean interceptados por una falla, hasta llegar al acuífero. También se cree que por medio de las áreas meteorizadas en la parte superior de la formación terciaria (Formación Guachinte) en la cordillera occidental, se puede producir un escurrimiento desde las rocas que también puede aportar a la recarga del sistema.

- La recarga por rocas es en general un componente poco estudiado dentro de la estimación de la recarga del acuífero y se piensa que en algunas zonas, debido a la geología, al sistema de fallas, y a zonas meteorizadas en áreas y profundidades considerables puede ser un componente importante a estimar.

- Además del impacto al balance hídrico, la estimación de esta recarga ayudará también a afinar el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero en la zona urbana de la ciudad.

- Las zonas de ladera de la ciudad, son de las áreas con presión más fuerte para nuevas urbanizaciones en la ciudad, por lo cual es importante estimar las afectaciones que pueden presentarse al sistema acuífero debido a la impermeabilización de las zonas erosionadas en las formaciones terciarias.

- Dentro del PMAA Cali se ha un modelo numérico para la ciudad. En ejercicios futuros, la estimación de la recarga en ladera podrá ser adicionada como un componente de recarga lateral a la modelación para mejorar el detalle de la modelación y el balance final.

- Si bien, en el momento no es posible hacer un análisis detallado a lo largo de toda la cordillera en la zona urbana de Cali, este estudio da un primer indicio del comportamiento de estas formaciones y permite tener una idea de los flujos que pueden fluir por estos sistemas.

- Además del impacto para el PMAA Cali, esta actividad también permite tener indicios sobre estos comportamientos y su importancia en otras zonas en el Valle, con características geológicas y estructurales similares.

9.3.1 Métodos para el estudio

A lo largo del flanco derecho de la cordillera occidental en las intermediaciones de la zona urbana de Cali, se encuentran dos formaciones terciarias: la Formación Guachinte, y la Formación Jamundí, formaciones con profundidades meteorizadas de hasta 50 metros. En la zona norte de la ciudad en la cordillera se encuentran también los Flujos de Terrón Colorado que también puede aportar mediante flujos sub-superficiales al sistema. De estos tres sistemas, se ha seleccionado ubicar el análisis en la formación Guachinte, siendo la más extensa en la zona urbana y sobre la cual se encuentran las mayores presiones de urbanización.

Para entender los flujos regionales del agua subterránea, determinar el origen del agua que llega a los acuíferos, y estimar el volumen de recarga que proviene de las rocas, se plantean 3 métodos; hidrogeoquímica, isotopía y análisis de sensibilidad con un modelo numérico. De estos tres métodos, se presentan los resultados de los 2 primeros.

Con los datos hidroquímicos se hizo una caracterización de las aguas y de la evolución del agua en el sistema hidrogeológico.

Los datos isotópicos permitieron entender mejor la procedencia de la recarga del agua subterránea y la dinámica de la misma.

Por otro lado se plantea a futuro realizar un análisis de sensibilidad del modelo numérico del acuífero bajo la zona urbana de Santiago de Cali, a la conductividad hidráulica de las formaciones Terciarias y a la Formación Volcánica. Con este análisis de sensibilidad se puede obtener un rango de posibles volúmenes de recarga que llegan al acuífero a través de las formaciones mencionadas.

9.3.2 Hidrogeoquímica

Para evaluar la evolución de los iones y caracterizar las aguas, se deben determinar las concentraciones de iones en ríos, manantiales, precipitación y agua subterránea, preferentemente a lo largo de una línea de flujo subterráneo regional, es decir a lo largo de un perfil aproximadamente perpendicular a la ladera. La información hidrogeoquímica que puede ser de utilidad para el objetivo de este estudio es:

- Concentración de los iones mayoritarios:
  - HCO_3, y Si: se espera ver una relación entre la elevación a la cual se ha tomado la muestra, y la concentración de bicarbonato y la de silicio, esperando que las muestras tomadas a más profundidad bajo el terreno tengan unas concentraciones más elevadas debido a tiempos de residencia del agua más largos.
  - Otros iones como el Ca, Mg, Na, SO_4, Cl, K, etc y las relaciones entre ellos (Ca/Na, Mg/Ca, Cl/HCO_3) ayudarán a caracterizar las aguas de las diferentes unidades acuíferas.

- Conductividad eléctrica: La relación entre la CE y el HCO_3 revela información sobre el tiempo de residencia del agua. Valores altos de CE y de HCO_3 denotan tiempos de residencia elevados que se espera van a encontrarse en los pozos profundos. En aguas superficiales es interesante ver la evolución temporal de la CE a lo largo del año. Una CE relativamente constante puede indicar que el flujo base de los ríos a lo largo de todo el año está compuesto por agua subterránea con unos tiempos de residencia similares. Por lo contrario, si la CE aumenta en los ríos en la época seca, puede significar que el agua

subterránea que compone el flujo base en la época seca tiene un tiempo de residencia más elevado y que ha estado más tiempo en contacto con la roca.

- Presión de CO_2: una presión de CO_2 baja y una concentración alta de Si, indican que el agua tiene un tiempo de residencia alto y que se recargó en una zona con poca actividad biológica en el suelo, lo que puede asociarse a temperaturas bajas y cotas altas.

9.3.3 Análisis isotópicos

Los isótopos estables proporcionan información sobre la zona en la que se recargó el agua subterránea y sobre los procesos o reacciones que ha sufrido en su paso por el sistema hidrogeológico. Los isótopos radioactivos pueden dar información sobre la edad del agua.

La abundancia relativa entre el isótopo “raro” y el isótopo “común” del H y el O es de los trazadores más usados en hidrogeología para determinar el origen del agua subterránea. Los valores isotópicos se expresan como desviación isotópica que es la diferencia de abundancias relativas entre la muestra y el estándar (Vienna Standard Mean Ocean Water). Si se dispone de una Línea Meteórica de Agua Local (LMAL) formada por las desviaciones isotópicas de ^{18}O y ^{2}H de muestras de lluvia tomadas a diferentes cotas, pueden compararse los valores obtenidos en las nuevas muestras con la LMAL, y determinar la altitud a la que se infiltró el agua y recargó el acuífero.

Los contenidos isotópicos de ^{18}O y ^{2}H en la precipitación también pueden variar a lo largo del tiempo debido a cambios en la temperatura. Por lo tanto las estaciones lluviosas y secas pueden afectar los contenidos de ^{18}O y ^{2}H. En el caso del Valle del Cauca, la Agencia Internacional de Energía Atómica (Osorio Morales, 2018), determinó que las fluctuaciones de los contenidos isotópicos son mayores debido a las estaciones que a la diferencia de altitud, lo que sugiere que debe determinarse la LMAL usando muestras de precipitación distribuidas en el tiempo.

Otro marcador que puede utilizarse es el exceso de deuterio, que es la diferencia entre D y ^{18}O. El exceso de deuterio es característico de la precipitación de cada lugar. En el caso de que se encuentren valores de exceso de deuterio en las aguas subterráneas muy diferentes de los que se encuentran actualmente en la precipitación, puede indicar que esa agua se recargó en épocas pasadas en las que el clima era diferente.

Para determinar la edad del agua, radioisótopos naturales como el ^{14}C y el tritio (T) pueden ser importantes. Los periodos de semi-desintegración son de 12,26 años para el T y de 5730 años para el ^{14}C, lo que permite datar aguas más recientes con T y aguas más antiguas con ^{14}C.

Para corregir el aporte de ^{14}C por calizas se utiliza el ^{13}C, ya que los dos se fraccionan por los mismos procesos, como puede ser la disolución de minerales o el aporte de materia orgánica. En esta zona del Valle no hay calizas pero puede que haya un aporte de materia orgánica en el suelo en el que se infiltra el agua de lluvia. Por lo tanto es recomendable determinar el contenido en ^{13}C en las muestras y también conocer el ^{13}C del CO_2 del suelo local.

9.3.4 Puntos de muestreo

En total se consideraron 16 puntos de muestreo comprendidos en dos campañas de monitoreo. Se buscó monitorear agua de lluvia, manantiales, ríos, pozos cercanos a la ladera, y pozos profundos con filtros a más de 100 metros de profundidad. También se decidió decidió distribuir

los puntos de monitoreo entre el cono aluvial del río Cali y el cono aluvial de los ríos Lili-Meléndez-Cañaveralejo, con puntos siguiendo las líneas de flujo subterráneas. Se escogieron estos dos sistemas porque el análisis de las líneas de flujo (capítulo3.2.6.) y la hidrogeoquímica de fondo (capítulo 3.2.9.) mostraron que se trata de los dos sistemas de recarga más importantes del acuífero, y que presentan características hidrogeoquímicas distintas.

Durante la primera campaña, del 1 de mayo al 27 de mayo del 2019, se muestrearon 12 puntos, los cuales incluyeron muestras de precipitación, el río Cali, el río Cañaveralejo, manantiales y pozos. Durante la segunda campaña, el día 30 de diciembre del 2019, se muestrearon 4 puntos que comprendieron pozos y el río Cali. La siguiente tabla muestra la información disponible de los puntos de muestreo.

Tabla 9-4 Puntos de muestreo

Código	Nombre	Fuente	Profundidad (m)	Fecha	Este (m)*	Norte (m)*
C1	El Silencio	Precipitación	-	1-5-2019	1052564	869992
C2	Río Cali	Río	-	1-5-2019	1059218	873387
C3	Río Cañaveralejo	Río	-	1-5-2019	1056530	868957
C4	Manantial Cañaveralejo	Manantial	-	1-5-2019	1056559	868937
C5	PMCa1	Pozo	28.8	9-5-2019	1060845	874522
C6	vc-1397 (Colgate)	Pozo	285.0	9-5-2019	1063114	875267
C7	vc-1232 (GERT)	Pozo	70.0	9-5-2019	1063375	876057
C8	vc-1280 (U.R. Lourdes)	Pozo	40.0	15-5-2019	1058047	866957
C9	vc-1305 (Gamma)	Pozo	80.0	15-5-2019	1063048	869850
C10	vc-642 (EMCALI Naranjos)	Pozo	370.0	22-5-2019	1066692	871030
C11	Manantial Puente Blanco	Manantial	-	24-5-2019	1057800	875804
C12	Las Brisas	Precipitación	-	27-5-2019	1054362	868337
C13	vc-814a (Well)	Pozo	25.0	30-12-2019	1060802	874871
C14	vc-829 (Well)	Pozo	22.0	30-12-2019	1060153	873963
C15	vc-902 (Well)	Pozo	18.0	30-12-2019	1057887	866958
C16	Río Cali	Río	-	30-12-2019	1059021	873643

* Coordenadas en MAGNA-SIRGAS / Colombia West Zone.

A continuación, se presentan la ubicación de los puntos de monitoreo para la primera campaña.

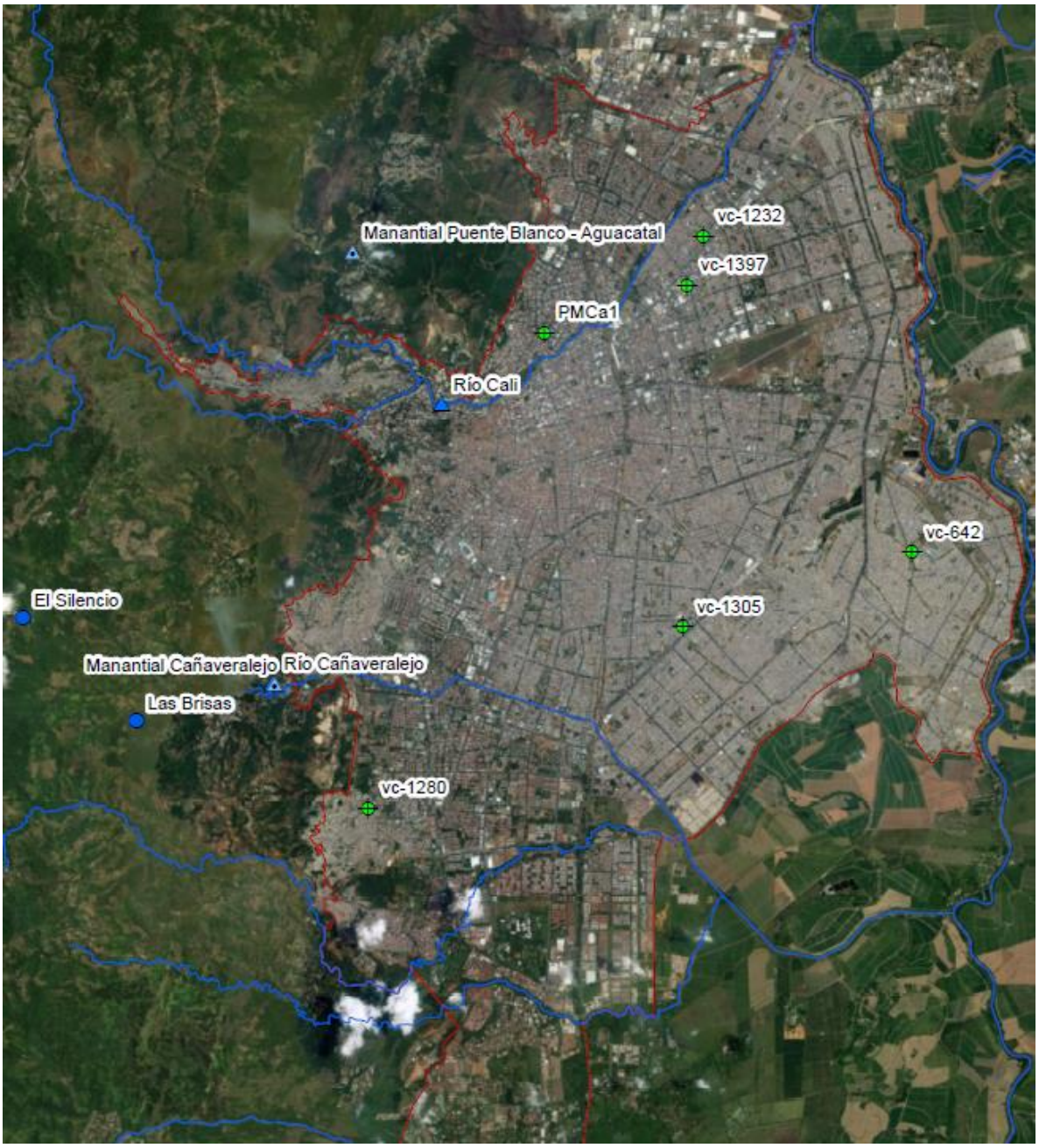


Figura 9-5 Puntos de muestreo de la primera campaña

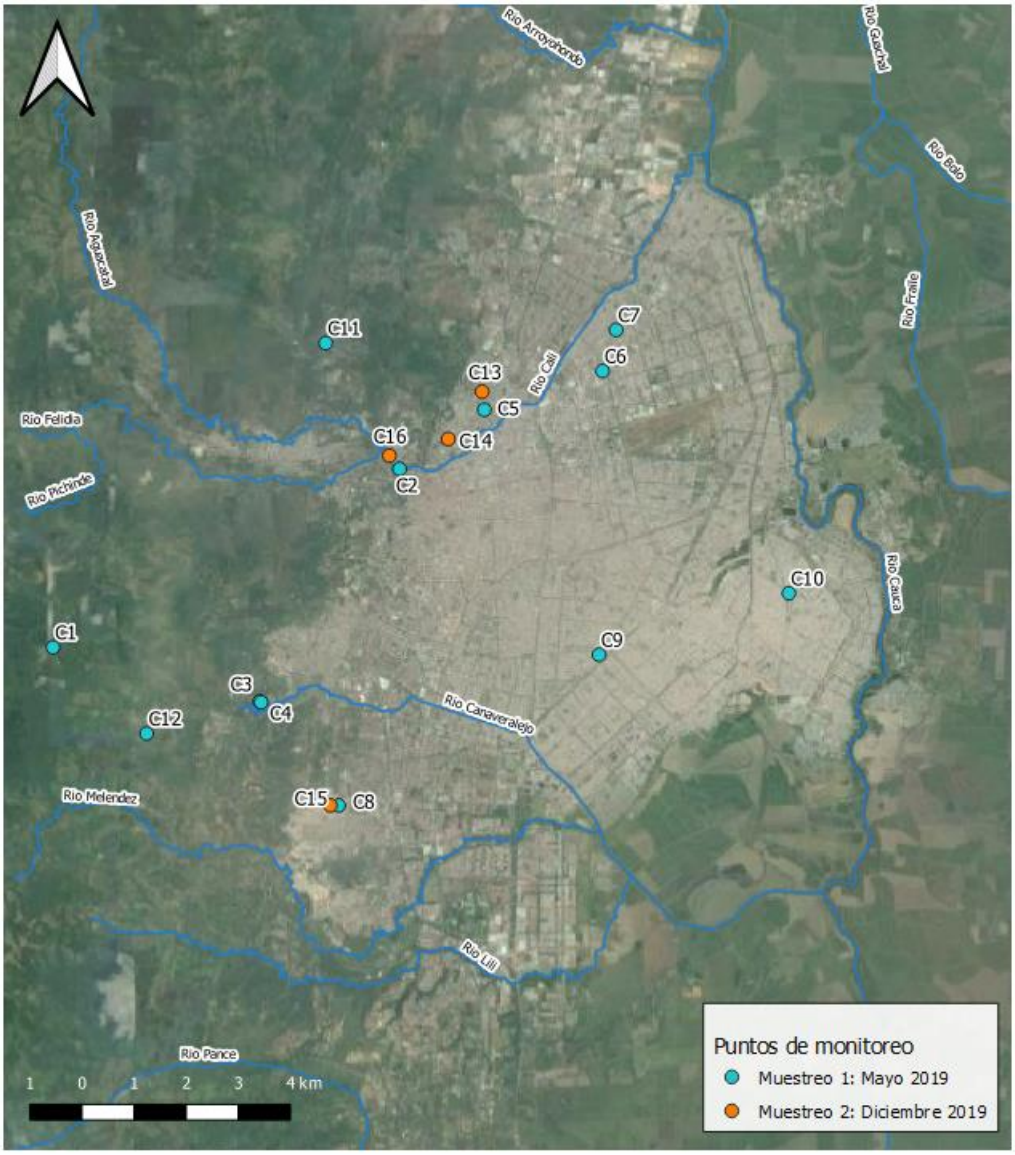


Figura 9-6 Puntos de muestreo de las dos campañas

9.3.5 Análisis de resultados

Las siguientes tablas presentan la compilación de los resultados obtenidos en los 16 puntos de muestreo evaluados.

Tabla 9-5 Resultados del monitoreo y análisis – Parte 1

Código	EC	pH	Temp	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO_4	NO_3	Alk	Fe	Mn	Al	Si	As	F	Na/Cl	Ca/HCO_3	Sum Cat	Sum An	E.B.
C1	14.6	5.64	24.4	0.016	0.008	0.027	0.004	0.019	0.022	0.004	0.016	0.001	0.000	0.001	0.003	0.000	0.001	0.822	1.717	0.088	0.083	4.15
C2	152.1	7.75	20.4								0.919							-	-	-	-	-
C3	187	7.51	23.4								1.639							-	-	-	-	-
C4	310.7	6.53	24.9	0.314	0.009	0.866	0.757	0.162	0.150	0.013	2.698	0.000	0.000	0.000	0.489	0.000	0.001	1.943	0.321	3.569	3.173	6.03
C5	409.2	7.12	26.9	0.411	0.017	1.243	1.115	0.669	0.237	0.000	3.838	0.003	0.023	0.001	0.500	0.000	0.003	0.614	0.324	5.196	4.982	2.16
C6	616.8	7.54	26.6	1.158	0.082	1.430	1.362	1.154	0.284	0.001	5.158	0.013	0.005	0.000	0.553	0.000	0.005	1.003	0.277	6.860	6.881	-0.28
C7	558.2	7.37	27.3	0.896	0.012	1.326	1.358	0.841	0.403	0.070	4.238	0.000	0.001	0.000	0.411	0.000	0.003	1.066	0.313	6.277	5.955	2.74
C8	401.7	7.14	26.4	2.659	0.097	0.387	0.333	0.776	0.007	0.000	3.358	0.012	0.007	0.004	0.579	0.000	0.024	3.426	0.115	4.232	4.149	0.81
C9	641	6.96	26.6	2.529	0.096	1.146	1.457	1.075	0.208	0.001	5.598	0.012	0.005	0.001	0.708	0.000	0.007	2.352	0.205	7.865	7.090	5.28
C10	743.1	7.83	27.6	4.169	0.545	0.864	0.428	3.443	0.006	0.001	3.639	0.006	0.006	0.000	0.728	0.000	0.004	1.211	0.237	7.322	7.095	1.54
C11	282	6.82	25	0.570	0.006	0.649	0.621	0.156	0.175	0.023	2.278	0.001	0.001	0.001	0.511	0.000	0.002	3.647	0.285	3.119	2.808	5.40
C12	25.86	6.05	24.6	0.023	0.040	0.025	0.010	0.020	0.021	0.002	0.160	0.001	0.000	0.003	0.005	0.000	0.001	1.156	0.156	0.134	0.223	-22.76
C13	630.8	7.85	29.3	0.862	0.008	1.400	1.473	0.705	0.488	0.018	4.001	0.001	0.002	0.001	0.386	0.000	0.000	1.221	0.350	6.623	5.701	7.98
C14	183.7	6.63	25.8	0.648	0.022	0.382	0.178	0.116	0.107	0.015	1.164	0.000	0.000	0.000	0.649	0.000	0.000	5.577	0.328	1.791	1.509	8.68
C15	203.6	6.71	27.2	1.001	0.051	0.292	0.167	0.087	0.025	0.001	1.475	0.004	0.002	0.000	0.591	0.000	0.000	11.442	0.198	1.982	1.613	10.35
C16	117.6	7.34	21.3								0.656							-	-	-	-	-

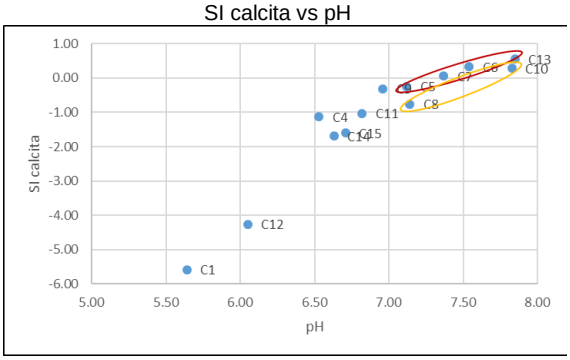
Nota: EC en µS/cm, Temp en °C, aniones y cationes en mmol/l.

Tabla 9-6 Resultados del monitoreo y análisis – Parte 2

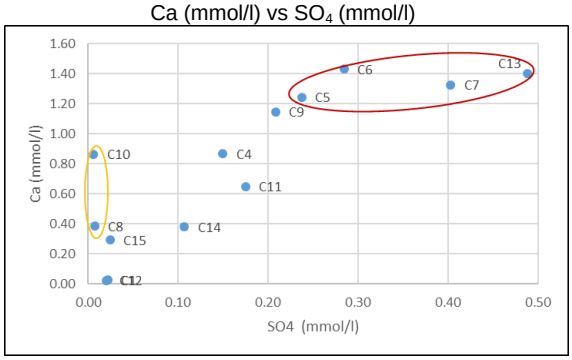
Código	CO2(g)	SIcc	SIdol	SIgyp	SIflu	SAR	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$	E3H	$\delta^{13}C$	^{14}C_Uncorr	^{14}C_Uncorr_Age	^{14}C_Norm	^{14}C_Norm_Age
C1	-2.596	-5.576	-11.872	-4.689	-6.863	0.088	-9.908	-68.808	1.526					
C2	-3.008						-10.835	-74.294	1.219					
C3	-2.501						-10.300	-71.750	< 0.8					
C4	-1.318	-1.135	-2.199	-2.654	-4.665	0.247	-10.008	-70.341	0.972					
C5	-1.754	-0.249	-0.391	-2.375	-3.634	0.268	-10.867	-76.250	< 0.8	-14.597	95.089	405	92.712	608
C6	-2.056	0.323	0.777	-2.285	-3.166	0.693	-10.567	-73.778		-13.876	72.660	2566	70.844	2769
C7	-1.962	0.055	0.279	-2.154	-3.642	0.547	-9.886	-69.133		-13.389	97.414	210	94.979	414
C8	-1.825	-0.757	-1.430	-4.267	-2.306	3.134	-9.767	-70.262	< 0.8	-11.166	15.329	15065	14.946	15269
C9	-1.436	-0.314	-0.371	-2.516	-3.040	1.567	-9.757	-70.747		-9.578	76.460	2156	74.548	2360
C10	-2.488	0.279	0.418	-4.097	-3.533	3.668	-10.399	-72.842		-16.967	2.018	31352	1.968	31555
C11	-1.679	-1.032	-1.952	-2.683	-4.419	0.506	-9.788	-71.074	1.028					
C12	-2.053	-4.261	-8.806	-4.776	-6.257	0.124	-16.157	-119.698						
C13	-2.464	0.545	1.292	-2.063	-10.007	0.508				-15.756	73.260	2500	72.570	2576
C14	-1.765	-1.686	-3.565	-3.031	-11.543	0.867				-11.878	91.880	680	90.660	787
C15	-1.733	-1.597	-3.282	-3.775	-8.536	1.478				-17.160	48.490	5814	48.100	5879
C16	-2.737						-10.699	-72.866						

Con la información de las tablas anteriores, se realizaron los siguientes gráficos (ploteo de puntos y diagrama de Piper) para representar las relaciones entre los diferentes elementos y poder realizar los análisis hidrogeoquímicos.

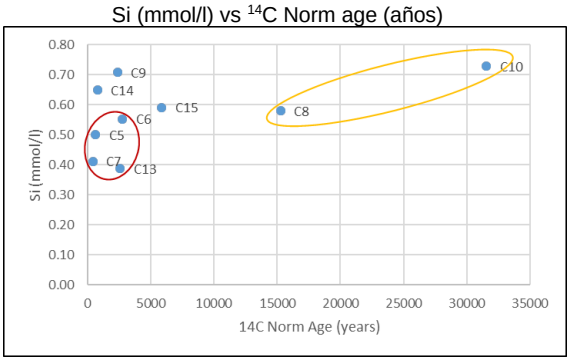
SI calcita vs pH



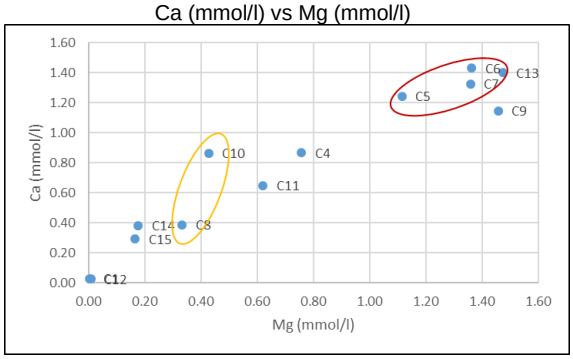
Ca (mmol/l) vs SO_4 (mmol/l)



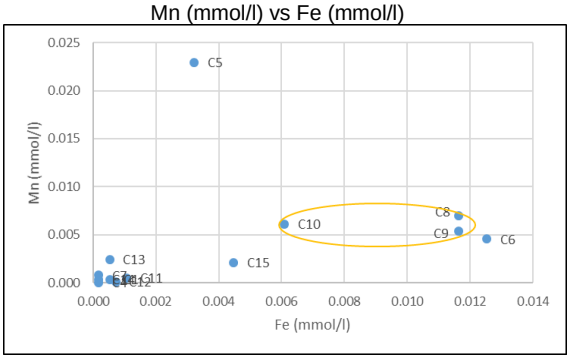
Si (mmol/l) vs ^{14}C Norm age (años)



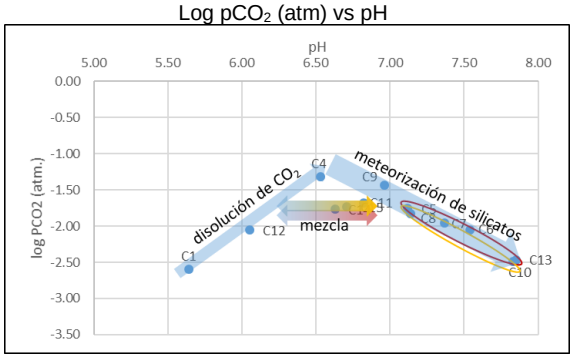
Ca (mmol/l) vs Mg (mmol/l)



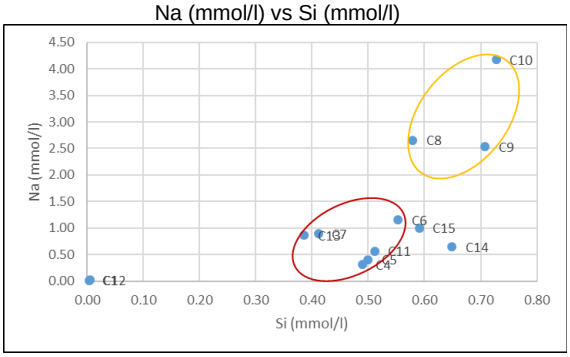
Mn (mmol/l) vs Fe (mmol/l)



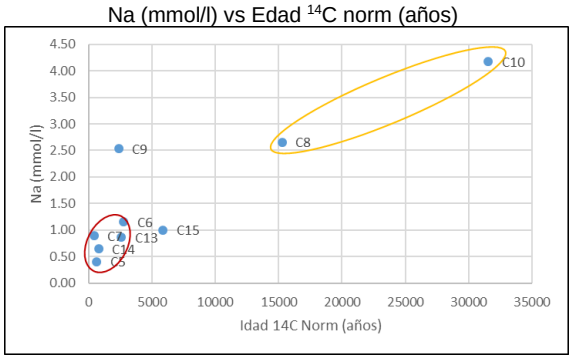
Log pCO_2 (atm) vs pH

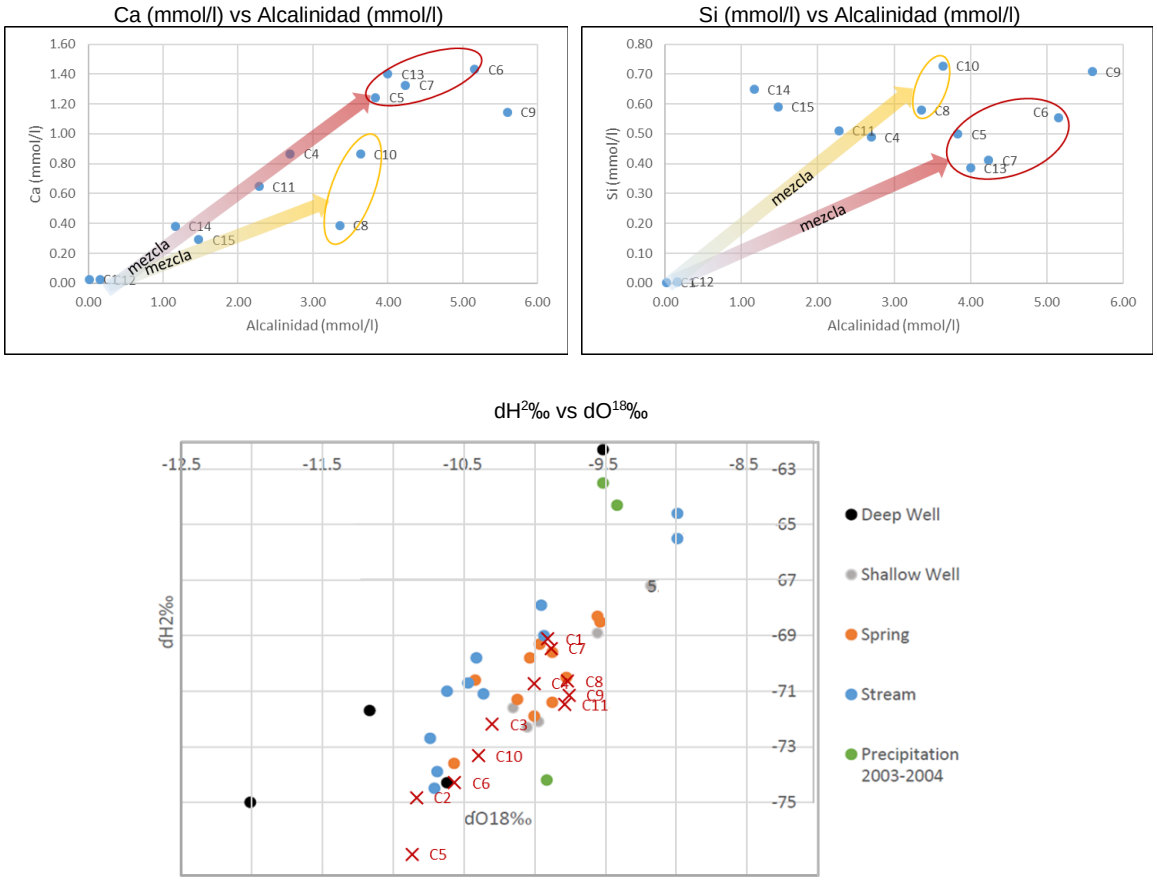


Na (mmol/l) vs Si (mmol/l)



Na (mmol/l) vs Edad ^{14}C norm (años)





Nota: Información agregada en la imagen de fondo pertenece a la Cordillera Este, adaptada de Osorio Morales (2018)

Figura 9-7 Gráficos de hidrogeoquímica

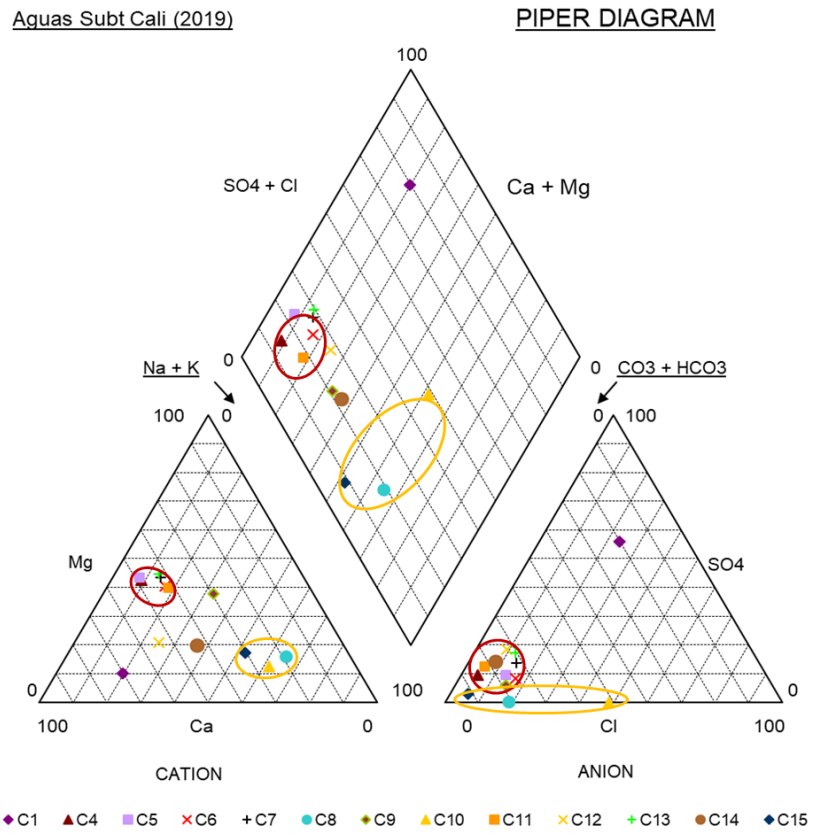


Figura 9-8 Diagrama de Piper

En base a la información anterior, se presentan a continuación los aspectos más importantes en relación con las muestras de agua subterránea evaluadas.

Para el primer set de puntos muestreado en mayo 2019 (C1 a C12), el error general de los análisis se encuentra dentro de los límites aceptables, excepto para la muestra de lluvia C12. Esto puede ser debido a que la alcalinidad es muy alta. Asimismo, se observa que el pH aumenta y la pCO_2 disminuye con la profundidad, salvo en el caso de C9 (vc-1305 profundidad de 80m). También se observa un sistema cerrado de intemperización/disolución de silicatos (no hay nuevo ingreso de CO_2), excepto en el caso de C9, la cual parece mostrar un sistema abierto de disolución.

Los pozos más profundos: C6 (vc-1397, 285m de profundidad en el cono aluvial del río Cali), y especialmente C10 (vc-642, 370m de profundidad en el cono de los ríos Lili-Meléndez-Cañaverlajeo), muestran el estado más avanzado de intemperización/disolución de los minerales de silicato. Esto ha llevado a la (súper) saturación de la calcita, lo cual limita el Ca y la alcalinidad. La intemperización extra en C6 y C10 está limitada por la saturación de calcita.

En relación con los orígenes de las muestras, las que se encuentran al norte (C5, C6, C7) muestran una composición diferente (mayor Ca, Mg, SO_4) al de las muestras al sur (C8, C10 y, en cierta medida, C9, aunque en esta muestra no es tan claro). Podría tratarse de otro origen geológico, o de una velocidad de infiltración diferente (más rápida en el sur que en el norte).

En el caso de los manantiales (C4 cerca del río Cañaveralejo y C11 cerca del río Cali), estos parecen estar más relacionados con la geología de C5, C6, C7, cuando se observan los

gráficos de “Na vs Si”, “Ca vs Mg” y “Ca vs Alcalinidad”, pero con un menor tiempo de intemperización/contacto. También, en relación a los manantiales, su bajo tiempo de residencia (especialmente en C4) se evidencia por el SIcc negativo, alta pCO_2 y se confirma por el tritio. Estos datos indican que el agua de los manantiales seguramente se infiltró relativamente cerca de los mismos y que no proviene de zonas alejadas de la montaña.

De las muestras al sur, C8 (vc-1280 y 40m de profundidad tocando a la ladera) y C10 (vc-642 y 370m de profundidad cerca del río Cauca) son más antiguas (unos 15.000 y 31.000 años respectivamente), aunque C8 es claramente más joven que C10, como lo muestran el Na y el Si más bajos, y el ^{14}C más alto. En el caso de la muestra C9 (vc-1305 con profundiad de 80m), ésta es menos clara, el Si es más alto, pero el Na ligeramente más bajo y es mucho más joven (2360años). Posiblemente se puede tratar de una mezcla con aguas poco profundas.

En relación con las edades absolutas de ^{14}C, estas pueden cambiar dependiendo del método utilizado y de la interacción con los carbonatos; sin embargo, se tienen mayormente rocas silicatadas y no hay mucho carbono presente en la matriz de la roca, por lo que los cálculos de las edades no se verían muy afectados.

Las muestras C6 y C10 se encuentran más empobrecidas en isótopos estables de agua, lo que indica una recarga a mayor altitud. Podría ser una indicación de la RBM (recarga proveniente del bloque montañoso), aunque también puede ser una recarga profunda a partir de aguas superficiales que se infiltran en conos aluviales.

La muestra C8 no está empobrecida en isótopos estables de agua, contrariamente a lo que podría esperarse por la edad del agua y su ubicación. Podría tratarse de una mezcla (alrededor del 25-40%) de agua más vieja (más empobrecida, con menor ^{14}C) con agua más joven, infiltrada localmente y enriquecida en ^{18}O debido a la evaporación y más alto ^{14}C.

La muestra C5 (PMCa1 con 28.8m de profundiad) también se encuentra empobrecida en isótopos estables de agua pero es muy joven. En este caso es posible que las lluvias de gran altitud se infiltraron en el cono aluvial cerca del pozo.

En relación las muestras tomadas en diciembre 2019 (C13 a C16), se observa que las concentraciones de Si son particularmente altas, por lo cual se recomienda reanalizar este parámetro. Al mismo tiempo, están ocurriendo procesos de mezcla y es posible que Si, como complejo acuoso sin carga, no tiene un lugar tan activo en los procesos de difusión, por lo que las concentraciones pueden ser diferentes de las esperadas. Los minerales en basalto son también más reactivos, así que se esperan mayores concentraciones de Si aún en aguas más jóvenes.

Asimismo, se observa que estas muestras (C13 a C16) tienen un mayor error en el balance iónico (entre el 8.0% y el 10.3%), lo cual está por encima del límite aceptable (5%). Considerando la regla empírica EC/100 = SumaCationes = SumaAniones, hay una clara subestimación de los aniones. Posiblemente se ha subestimado la alcalinidad en el campo. En el caso de las muestras C14 y el C15 esto es bastante normal ya que la mineralización es baja.

Las muestras C13 (vc-814a de 25m de profundidad) y C14 (vc-829 de 22m de profundidad), ambas en el cono del río Cali, pertenecen al grupo norte que comprende las muestras C5, C6 y C7. En el caso de C13 esto es más evidente, ya que se encuentra dentro de todos los círculos rojos indicados en los gráficos. Esta muestra presenta el agua subterránea más mineralizada del grupo (la alcalinidad puede haberse subestimado) y junto con la C6 es el agua subterránea

más antigua de este grupo (2576 años). La C13 tiene un pH más alto y una presión de CO_2 más baja, lo que indica que podría haberse recargado con menos CO_2 en el suelo; y la intemperización de silicatos se produjo en su mayor parte en un sistema cerrado. C13 es una muestra relativamente poco profunda, pero aparentemente captura sobre todo el agua descargada más antigua. La temperatura también es más alta que en las otras muestras de la misma campaña.

La muestra C14 es mucho más joven (787 años), como C5 y C7, pero también mucho menos mineralizada que todas las otras muestras, incluso menos que los manantiales. La CE y alcalinidad son muy bajas, la presión de CO_2 todavía alta (infiltración en zona con alta presión de CO_2 en el suelo) y el índice de saturación de calcita muy negativo. Asimismo, C14 es también una muestra muy poco profunda, por lo que puede ser el resultado de la mezcla del agua de lluvia infiltrada (por ejemplo, C12) con la descarga de agua más antigua (por ejemplo, C6 o C13). El agua es también más fría que C13. El proceso de mezcla puede verse en el gráfico de “Ca vs alcalinidad” y de “pCO_2 vs pH”. Sin embargo, esto no está claro en el gráfico de “Si vs alcalinidad”, donde se observa un comportamiento complejo del Si.

La muestra C15 (vc-902 de 18m de profundidad) pertenece al grupo sur (C8, C10) en términos de composición relativa (diagrama de Piper). El agua de esta muestra también es bastante antigua (5879 años), aunque mucho más joven que las otras dos muestras. En comparación directa con el pozo cercano C8 (vc-1280), C15 es menos profunda, más joven y mucho menos mineralizada. Al igual que C14 en el norte, debe estar compuesta por una mezcla de agua más antigua que descarga en esta zona y agua de lluvia más joven que infiltra desde arriba. Así como se ha visto en muestras anteriores, la concentración de Si es mayor a lo esperado (ver el gráfico “Si vs HCO3”).

9.3.6 Conclusiones

En general, es difícil probar la existencia de la recarga proveniente del bloque montañoso (RBM). El bajo ^{14}C combinado con el ^{18}O empobrecido podría indicar RBM para los dos pozos profundos (C6 y C10), pero también podría tratarse de agua que ha circulado por ríos hasta ser infiltrada en los conos aluviales. En la formación volcánica la permeabilidad puede ser alta, por lo que la capacidad de infiltración puede ser alta también. Sin embargo, la exfiltración a través de los manantiales puede ser también importante (en el trabajo de Osorio Morales (2018) se identificó como el principal mecanismo de descarga del bloque montañoso).

Para poder tener una mayor comprensión de la importancia del RBM vs RCA (recarga en los conos aluviales), sería adecuado tener un balance hídrico detallado, midiendo el flujo de las quebradas aguas arriba y aguas abajo de los conos aluviales e incluyendo mediciones exactas de la evapotranspiración. La evaluación de las temperaturas de recarga de gases nobles podría ayudar a tener una mejor visión (cabe destacar que el muestreo de campo es difícil y costoso).

9.4 Anexo 4

Jornadas participativas DAGMA. Mayo 2019 – Santiago de Cali

Los talleres participativos se llevaron a cabo los días 14, 16 y 17 de Mayo de 2019 en las dependencias de DAGMA.

Para las sesiones de los días 14 y 16 de Mayo, se hizo un llamado abierto e inclusivo a todos los integrantes del DAGMA, con lo cual se buscaba tener un grupo representativo y diverso de profesionales, pertenecientes a los distintos grupos que forman parte de la organización. Ya que la cantidad y perfil de los participantes era incierta, se utilizaron métodos flexibles y adaptables, trabajando en grupos de no más de 6 personas. Los tiempos destinados para cada actividad a lo largo del día variaron, pero es importante que se alcancen los resultados esperados diarios.

La sesión del día 17 de Mayo se llevó a cabo en conjunto con representantes de CVC. En esta ocasión sólo se incluyeron 2 profesionales de DAGMA del grupo Gestión del Recurso Hídrico. El principal objetivo de esta sesión fue reflexionar sobre los resultados de las sesiones anteriores, y consolidar los principales aspectos que se incluirían en el plan de manejo.

El programa original de las jornadas participativas se presenta a continuación:

Jornada participativa I – 14 Mayo 2019	
8:00	Llegada de los participantes y bienvenida
9:30	PMAA y plan Fase de Formulación
9:30	Situación actual del acuífero (presentación amenazas actuales)
10:00	Trabajo en grupo: Revisión de amenazas actuales
11:00	Trabajo en grupos: Comparación de escenarios de fase de diagnóstico
12:00	Sesión plenaria
12:30	Almuerzo
13:30	Trabajo en grupo: Revisión de amenazas (contraste actual / futuro)
14:30	Visión de DAGMA sobre el manejo del acuífero
15:00	Trabajo en grupos: Elaboración de FODA institucional
16:00	Sesión plenaria
16:30	Cierre y evaluación de la jornada

Jornada participativa II – 16 Mayo 2019	
8:30	Introducción
9:00	Trabajo en grupo: Revisión y verificación de medidas previamente identificados
10:30	Trabajo en grupo: Verificación de indicadores previamente identificados
12:00	Sesión plenaria
13:30	Elaboración de una estrategia para el manejo del acuífero
14:00	Trabajo en grupo: Formulación de estrategias para el manejo del acuífero
15:00	Trabajo en grupo: Formulación de programas y proyectos en base a la estrategia definida
16:30	Cierre y evaluación de la jornada

Jornada participativa III – 17 Mayo 2019	
8:30	Introducción
9:00	Resumen de estrategias, programas y proyectos
9:30	Trabajo en grupo: Discusión y negociación sobre la príoridad e impacto de las estrategias, programas y proyectos formulados

12:00	Sesión plenaria
12:30	Almuerzo
13:30	Trabajo en grupo: Definición y localización de proyectos de acuerdo a cada programa
15:00	Trabajo en grupo: Príorización de proyectos
16:00	Sesión plenaria final
16:30	Cierre, evaluación de la jornada y agradecimientos