

**APLICACIÓN DEL SOFTWARE MODFLOW Y SISTEMAS DE
FLUJO DE TÖTH, COMO SOPORTE AL MODELO
HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA SECRETARIA DE
AMBIENTE, EN EL BLOQUE CENTRO DE BOGOTÁ**

LINEA DE INVESTIGACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

**CRISTIAN CAMILO CASTAÑEDA VALENCIA
UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
SEBASTIAN HERNANDO HERNANDEZ DUEÑAS
UNIVERSIDAD DE LA SALLE**

**BOGOTA D.C.
ABRIL 2019**

**APLICACIÓN DEL SOFTWARE MODFLOW Y SISTEMAS DE
FLUJO DE TÖTH, COMO SOPORTE AL MODELO
HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA SECRETARIA DE
AMBIENTE, EN EL BLOQUE CENTRO DE BOGOTÁ**

CRISTIAN CAMILO CASTAÑEDA VALENCIA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**Director:
CAMILO VARGAS TERRANOVA
ING. AMBIENTAL Y SANITARIO,
MSc. GEOLOGIA AMBIENTAL Y RECURSOS GEOLÓGICOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTA D.C.
ABRIL 2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

JURADO 2

Bogotá D.C. _ _ / _ _ / _ _ _ _

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1. GLOSARIO	13
2. DEFINICION DEL PROBLEMA	15
3. JUSTIFICACIÓN	16
4. ANTECEDENTES	17
5. OBJETIVOS	18
6. ALCANCE	19
7. PERTINENCIA SOCIAL	20
8. MARCO TEORICO	21
8.1. Modelo Gravitacional	21
8.2. Sistemas de Flujo	22
8.3. Recurso Hídrico Subterráneo	24
8.4. Hidrogeoquímica	24
8.5. Recurso Hídrico Subterráneo en Colombia	26
8.6. Recurso Hídrico Subterráneo en Bogotá	28
8.7. Modelamiento Hidrogeológico	30
8.8. Modelo Hidrogeológico Conceptual de Töth	31
8.9. Modelo Hidrogeológico Numérico Modflow	32

9. METODOLOGIA _____	34
9.1. Fase I. Línea Base _____	34
9.2. Fase II. Elaboración de Cartografía y Modelo Conceptual de Tóth ____	37
9.3. Fase III. Modelación en Modflow _____	41
9.4. Fase IV. Correlación de Parámetros _____	48
10. RESULTADOS Y ANÁLISIS _____	55
10.1 Fase I. Línea Base _____	55
10.2 Fase II. Cartografía Y Modelo Conceptual De Tóth_____	58
10.3. Fase III. Modelación en Modflow _____	72
10.4. Fase IV. Correlación de Parámetros _____	79
11. CONCLUSIONES _____	82
12. RECOMENDACIONES _____	84
13. BIBLIOGRAFÍA _____	85
14. ANEXOS _____	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación Del Área De Estudio	19
Figura 2. Esquema Gráfico Aguas Subterráneas	21
Figura 3. Sistemas De Flujo Según Töth	23
Figura 4. Mapa Unidades Hidroestratigráficas De Colombia	27
Figura 5. Corte Geológico De La Ciudad De Bogotá	29
Figura 6. Modelo Hidrogeológico Del Acuífero Del Valle Del Cauca	30
Figura 7. Modelo Hidrogeológico Numérico Ejecutado En El Software Feflow	31
Figura 8. Interfaz Gráfica De Modflow: Modelmuse	33
Figura 9. Cortes Geológicos En Bogotá D.C.	43
Figura 10. Shape De Puntos Generados Para La Elaboración Del Basamento	44
Figura 11. Vista 3d Dem Generado Para El Basamento	44
Figura 12. Distribución Espacial Pozos Seleccionados	55
Figura 13. Variación Local De Pendientes Estimada En Porcentaje	59
Figura 14. Geología Local	60
Figura 15. Zonificación Local De Áreas Permeables E Impermeables	62
Figura 16. Hidrología Local	63
Figura 17. Comparación Precipitación (P) Y Etp - Estación Aeropuerto El Dorado	64
Figura 18. Comparación Precipitación (P) Y Etp - Estación El Dorado Didáctica	64
Figura 19. Comparación Precipitación (P) Y Etp - Estación Flores Colombianas	64
Figura 20. Comparación Precipitación (P) Y Etp - Estación Fontibón	64
Figura 21. Comparación Precipitación (P) Y Etp - Estación Jardín Botánico	65
Figura 22. Comparación Precipitación (P) Y Etp - Estación La Ramada	65
Figura 23. Comparación Precipitación (P) Y Etp - Estación Universidad Nacional	65
Figura 24. Comparación Precipitación (P) Y Etp - Estación Universidad Pedagógica	65
Figura 25. Comparación Precipitación (P) Y Etp - Estación Vitelma	65
Figura 26. Comparación Precipitación (P) Y Etp - Estación Vivero Venado De Oro	65
Figura 27. Distribución Local De La Precipitación	66
Figura 28. Distribución Local De La Evapotranspiración Potencial	67
Figura 29. Distribución Local De Recarga	68
Figura 30. Distribución Local De Sodio	70
Figura 31. Distribución Local De Cloro	70
Figura 32. Tipos De Flujo En El Área De Estudio Según Modelo Conceptual De Töth	71
Figura 33. Tabla De Agua Y Dirección Del Flujo De Agua Subterránea	78
Figura 34. Zonificación Del Potencial De Recarga	79
Figura 35. Zonificación Del Potencial De Descarga	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores De Conversión De Mg/L A Meq/L _____	25
Tabla 2. Zonas Hidrogeológicas En El Territorio Nacional _____	26
Tabla 3. Reserva Del Recurso Hídrico Subterráneo En Bogotá _____	29
Tabla 4. Parámetros Hidrogeoquímicos E Hidráulicos De Interés _____	35
Tabla 5. Información General Pozos Empleados _____	36
Tabla 6. Información General Estaciones Climatológicas _____	39
Tabla 7. Condiciones De Borde / Paquetes Empleados En La Modelación Numérica _____	41
Tabla 8. Formaciones Geológicas Definidas Para Ingresar Al Software _____	45
Tabla 9. Métricas De Desempeño De Carácter Absoluto Empleadas _____	46
Tabla 10. Métricas De Desempeño De Carácter Relativo Empleadas _____	47
Tabla 11. Matriz De Ponderación Para Potencial De Recarga _____	49
Tabla 12. Ponderaciones Para Las Formaciones Geológicas Presentes En La Zona De Estudio _____	51
Tabla 13. Valores Referentes A La Posibilidad De Recarga _____	52
Tabla 14. Matriz De Ponderación Para Potencial De Descarga _____	53
Tabla 15. Valores Referentes A La Posibilidad De Descarga _____	54
Tabla 16. Caudales De Extracción Pozos Concesionados _____	56
Tabla 17. Valores Fijados Para La Calibración Inicial Del Modelo Numérico _____	72
Tabla 18. Comparación Cabezas De Presión Observadas Y Simuladas _____	73
Tabla 19. Resultados Métricas De Desempeño En Calibración _____	74
Tabla 20. Cabezas De Presión Empleadas Para La Validación Del Modelo Numérico _____	75
Tabla 21. Resultados Métricas De Desempeño En Validación _____	76
Tabla 22. Áreas Resultantes En La Zonificación Del Potencial De Recarga _____	80
Tabla 23. Áreas Resultantes En La Zonificación Del Potencial De Descarga _____	81

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Distribución Espacial De Pozos Concesionados Empleados _____	88
Anexo B. Distribución Espacial De Estaciones Climatológicas Empleadas _____	89
Anexo C. Información Detallada Pozos Concesionados _____	89
Anexo D. Variación Local De Pendientes Estimada En Porcentaje _____	94
Anexo E. Geología Local _____	95
Anexo F. Zonificación Local De Áreas Permeables E Impermeables _____	96
Anexo G. Hidrología Local _____	97
Anexo H. Distribución Local De La Precipitación _____	98
Anexo I. Distribución Local De La Evapotranspiración Potencial _____	99
Anexo J. Distribución Local De Recarga _____	100
Anexo K. Distribución Espacial Sodio _____	101
Anexo L. Distribución Espacial Cloro _____	102
Anexo M. Distribución Espacial Alcalinidad _____	102
Anexo N. Distribución Espacial Calcio _____	103
Anexo O. Distribución Espacial Conductividad Eléctrica _____	103
Anexo P. Distribución Espacial Dureza _____	104
Anexo Q. Distribución Espacial Magnesio _____	104
Anexo R. Distribución Espacial Ph _____	105
Anexo S. Tipos De Flujo En El Área De Estudio Según Modelo Conceptual De Töth _____	106
Anexo T. Tabla De Agua Y Dirección Del Flujo De Agua Subterránea _____	106
Anexo U. Zonificación Del Potencial De Recarga _____	107
Anexo V. Zonificación Del Potencial De Descarga _____	108

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

SÍMBOLO O ABREVIATURA	SIGNIFICADO
%	Porcentaje
®	Marca Registrada
.TIFF	Formato de Imagen
3D	Tercera Dimensión
Ca ²⁺	Calcio
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
Cl ⁻	Cloro
CO ₃ ²⁻	Carbonato
D.C.	Distrito Capital
DEM	Modelo de Elevación Digital
Et al.	Et alii / “y otros”
ETP	Evapotranspiración Potencial
EVT	Evapotranspiración
Fe ²⁺	Hierro en Estado Catiónico
H ₂ O	Molécula del Agua
Ha	Hectárea
HCO ₃ ⁻	Bicarbonato
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
K ⁺	Potasio
Ksch	Formación Geológica Chipaque
Ksgd	Formación Geológica Arenisca Dura
Ksglt	Formación Geológica Arenisca Labor -Tierna
Ksgp	Formación Geológica Plaeners
L	Litro
Ltda.	Sociedad Limitada
m	Metro
m ²	Metro Cuadrado
m ³	Metro Cúbico
meq	Miliequivalente
Na ⁺	Sodio
No.	Numero
NO ₂ ⁻	Nitrito
NO ₃ ⁻	Nitrato
P	Precipitación
pH	Potencial de Hidrógeno

SÍMBOLO O ABREVIATURA	SIGNIFICADO
pz	Pozo
Qcha1	Formación Geológica Chía
Qdp	Depósitos de Pendiente
Qrtsa	Formación Geológica Rio Tunjuelo
Qsa1	Formación Geológica Sabana 1
Qsa2	Formación Geológica Sabana 2
RGB	Red, Green, Blue / Composición de color Rojo, Verde, Azul
s	Segundo
S.A.	Sociedad Anónima
SDA	Secretaria Distrital de Ambiente
SO₄²⁻	Sulfato
Tib	Formación Geológica Bogotá
Tic	Formación Geológica Cacho
Tkgs	Formación Geológica Guaduas – Conjunto Superior
ULS	Universidad de La Salle
UNAL	Universidad Nacional de Colombia
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UPN	Universidad Pedagógica Nacional
USGS	United States Geological Survey / Servicio Geológico de los Estados Unidos
USTA	Universidad Santo Tomas
UTM	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator

RESUMEN

Esta propuesta de investigación da continuidad al trabajo adelantado entre la Universidad Santo Tomas de Aquino (USTA) y la Universidad de La Salle (ULS), en el marco del convenio interinstitucional firmado entre las partes, como soporte al Modelo Hidrogeológico Conceptual realizado por la Secretaria de Ambiente (SDA) en la ciudad de Bogotá. Entendiendo la dimensión del proyecto, el área de interés se delimito en tres bloques, el Bloque Norte (ya evaluado), el Bloque Centro (objeto del presente documento/estudio), y el Bloque Sur (sector sin evaluar).

Manteniendo el esquema metodológico del estudio anterior, se utilizaron las herramientas ModelMuse® y el Modelo Conceptual de Tóth para relacionar los parámetros de valoración hidrogeológica y así, poder configurar un escenario del comportamiento y la dinámica de los flujos subterráneos en la ciudad de Bogotá. La base de la investigación es el Modelo Hidrogeológico Conceptual para los acuíferos de Bogotá de la Secretaria Distrital de Ambiente del año 2012, que tiene como objeto la planificación y la determinación de criterios técnicos de manejo hídrico en el marco normativo de la concesión de aguas subterráneas en la ciudad capital.

Durante el desarrollo de la investigación, se generó la cartografía base necesaria para la zonificación de los tipos de flujo en el área de interés, la cual determina la existencia de sistemas de flujo de tipo local sobre la zona de los cerros orientales, y de sistemas de flujo de tipo regional sobre la zona occidental de la ciudad de Bogotá. Así mismo, teniendo como referencia esta línea base, se construyó el modelo hidrogeológico numérico obteniendo errores cuadráticos promedio entre los 9.03 metros y 9.33 metros, luego de su respectiva calibración y validación. Estos valores indican la obtención de un modelo numérico preciso y bastante cercano a la realidad.

Luego de efectuar la correlación paramétrica planteada en la metodología, se definen a los cerros orientales la zona de recarga principal dentro del sistema hidrogeológico, con un área aproximada de 7000 hectáreas. Por otra parte, se define un sector con muy alto potencial de descarga, superior a las 8.000 hectáreas, el cual se ubica sobre el sector centro-occidental de la zona de estudio.

Palabras Clave: Hidrogeología, Modelamiento Numérico, Modflow, Sistemas de Flujo.

ABSTRACT

This research proposal gives continuity to the collaborative work began by the Universidad Santo Tomas (USTA) and the Universidad de La Salle (ULS), within the framework of the interinstitutional agreement signed between the parties, as a support to the conceptual hydrogeological model carried out by the Environment Authority in the city of Bogotá (SDA). Understanding the dimension of the project, the area of interest was limited to 3 blocks, the northern block (already evaluated), the central block (object of this document/study), and the southern block (has not been evaluated).

Maintaining the methodological scheme of the previous study, the ModelMuse tools were used along with the Conceptual Model of Tóth to relate the parameters of hydrogeological assessment and thus be able to configure a scenario of the behavior and dynamics of the underground flows in the city of Bogotá. The main source of the investigation is the hydrogeological conceptual model for the aquifers of Bogotá made by the SDA in 2012, that has as an objective the planning and determination of technical criteria of water management in the normative framework of the concession of groundwater in the capital city.

During the research, the main cartography was generated for the mapping of the flow types in the interest area, which postulates the existence of local flow systems over the Eastern geological formation and regional types of flow systems over the Western area of the city of Bogota. Likewise, with this baseline as a reference, the hydrological numerical model was constructed, obtaining Root Mean Squared Errors between 9.03 meters and 9.33 meters, including calibration and validation. These values indicate the obtainment of an accurate and quite close to reality numerical model.

After carrying out the parametric correlation proposed in the methodology, the Eastern mountains are defined as an important recharge zone within the hydrogeological system, with an approximate area of 7000 hectares. On the other hand, a sector with very high discharge potential is defined, superior to 8000 hectares, which is located over the Central-Western sector of the study area.

Key words: Flow Systems, Hydrogeology, Modflow, Numerical Modeling.

1. GLOSARIO

Acuífero: unidad de roca o sedimento capaz de almacenar y transmitir agua, como el sistema que involucra las zonas de recarga, tránsito y descarga, así como sus interacciones con otras unidades similares, aguas superficiales y marinas. [1]

Acuitardo: formación geológica semipermeable, que cuando contiene apreciables cantidades de agua su conductividad hidráulica es relativamente pequeña, por lo que es lenta y la cede tan lentamente que no puede por sí misma abastecer debidamente los pozos, pero si permite una recarga de acuíferos. [2]

Balance Hídrico: se refiere al equilibrio que se hace del recurso hídrico teniendo en cuenta las entradas (aportes) y salidas (perdidas) en un lugar determinado, en un periodo de tiempo establecido. Los aportes serán precipitación y las perdidas serán evaporación y transpiración que se convierten en evapotranspiración. [3]

Caudal: volumen de agua que fluye a través de una conducción natural o artificial en una unidad de tiempo. Comúnmente es conocido como la medida de flujo. [4] [5]

Conductividad hidráulica: propiedad del sistema agua-roca, medido a partir del volumen de agua que puede fluir a través de una superficie permeable, durante una medida de tiempo determinada. La conductividad hidráulica depende de la densidad del agua. [4] [5]

Formaciones geológicas: unidad litoestratigráfica formal que define cuerpos de rocas caracterizados por unas propiedades litológicas comunes (composición y estructura) que las diferencian de las adyacentes. Es la principal unidad de división litoestratigráfica. [4]

Infiltración: movimiento descendente del agua desde la superficie del terreno el cual puede ser afectado por características propias del suelo o las rocas. Está relacionado directamente con la permeabilidad. [4] [5]

Isopieza: representación en vista de planta de la distribución del potencial hidráulico del agua en un acuífero. [6]

Nivel dinámico: profundidad del agua subterránea relativa a la superficie del terreno, que se alcanza y mantiene durante la acción del bombeo de un caudal determinado. [4] [5]

Nivel estático: nivel relativo a la superficie del terreno, al que se encuentra el agua subterránea cuando se encuentra en total reposo y sin perturbación alguna. [4] [5]

Precipitación: producto de la condensación del vapor de agua presente en la atmósfera generando que se deposite en la superficie terrestre. [7]

Prueba de bombeo: prueba realizada para la evaluación de acuíferos, por medio de la estimulación mediante el bombeo, y observando su respuesta a este tipo de estímulo (descenso del nivel). [7]

Transmisividad: cantidad de agua que es transmitida por un acuífero a través de todo el espesor saturado del mismo, en una unidad de superficie por unidad de tiempo. [7]

Zona de descarga: zona la cual representa la fase final del recorrido de un flujo de agua específico ya que, en la misma, se presentan afloramientos de agua, además de adoptar determinadas propiedades fisicoquímicas y tener una continuidad específica de caudal en el tiempo según las características del suelo. [4] [5]

Zona de recarga: zona asociada con la conductividad hidráulica del suelo y las rocas, la cual puede permitir la infiltración y percolación de agua a un acuífero determinado. Comúnmente presenta una elevación topográficamente alta. En la zona de recarga, el nivel freático se encuentra generalmente profundo, el suelo es ácido y poco desarrollado con bajas cantidades de materia orgánica. [4] [5]

2. DEFINICION DEL PROBLEMA

La creciente demanda y explotación desmesurada del agua subterránea en la ciudad de Bogotá de las últimas décadas ha generado, como reporta el INGEOMINAS [8], descensos piezométricos de hasta 70 m en determinadas zonas de la ciudad. Dichos descensos, han ocasionado aumentos en las profundidades de bombeo, disminución general en los caudales, incrementos en los costos energéticos de extracción, subsidencia del terreno y también, el posible avance de contaminantes hacia estratos más profundos. [9]

Estos cambios generados en el modelo de flujo deben evaluarse de una forma precisa para lograr aplicar medidas preventivas y reactivas frente al panorama actual de explotación del recurso hídrico subterráneo de la capital.

Actualmente, existen múltiples formas de evaluar el recurso hídrico subterráneo y de valorar cada uno de los parámetros que están relacionados con la dinámica de flujo, la hidrogeoquímica y los pozos existentes para el estudio hidrogeológico. Uno de ellos, es la modelación conceptual, método que ya se ha aplicado previamente en la ciudad de Bogotá por la CAR, la Secretaria Ambiental de Ambiente e INGEOMINAS. Este tipo de modelamiento, a pesar de ser muy sólido teóricamente, no es flexible para evaluar o simular futuras situaciones.

Dicha falencia en la flexibilidad de las modelaciones conceptuales, incentiva la búsqueda de complementos para estos modelos con el fin de permitir la simulación de diferentes escenarios y dar un manejo integral a una zona de estudio determinada.

3. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto de investigación se lleva a cabo debido a la necesidad actual de fortalecer el conocimiento existente respecto al modelamiento matemático en Colombia, ya que este se ha implementado de una manera muy reducida en el territorio nacional (por ejemplo, la isla de San Andrés) [10]. Dicha falencia representa un problema grave, debido a que el modelamiento matemático es una herramienta significativa y flexible para la planificación y gestión del recurso hídrico subterráneo, el cual integra diferentes componentes climatológicos, geológicos, físicos y químicos convirtiéndolo así, en una herramienta imprescindible para entidades gubernamentales responsables de otorgar permisos de perforación, extracción de agua, caracterización hidrogeoquímica, concesiones de aguas, regulación normativa del uso y cuidado del recurso subterráneo, entre otros.

De igual manera, este proyecto investigativo busca incentivar la conclusión del modelo numérico hidrogeológico de la sabana de Bogotá (cuya zona norte ya ha sido previamente modelada [11]) para que, integrando los tres bloques y el páramo de Sumapaz a un modelo numérico global, sea posible incluir el mismo dentro de las herramientas diariamente empleadas por entidades gubernamentales como la CAR y la SDA para la toma de decisiones. Todo esto con el objeto de mitigar y remediar los problemas generados por la explotación desmesurada del recurso hídrico subterráneo en la ciudad de Bogotá [9] y asegurar la sostenibilidad de dicho recurso a lo largo del tiempo.

4. ANTECEDENTES

El uso de modelos numéricos se remonta a muchos años atrás, junto con la aparición comercial de computadoras y en especial, las computadoras personales [12]. La creación de modelos matemáticos en hidrogeología parte desde el seminario de la UNESCO en 1969, el cual serviría de base para que el servicio geológico de los estados unidos, USGS, abordara la idea de escribir un modelo que se ajustara a las necesidades de los escenarios hidrogeológicos. Luego de varios años de investigación y trabajo, en 1981 es lanzada la primera versión de Modflow, la cual estaba codificada en Fortran66, pero solo hasta el 1987 luego de ser reescrita en Fortran77 se difunde y utiliza ampliamente [13].

En Colombia, dicha aplicación no se ha llevado a cabo a gran escala debido a la gran escasez de datos confiables para la elaboración de modelos hidrogeológicos conceptuales resultante de diferentes problemas sociales y políticos que afectaron al país en el siglo pasado. Es hasta finales de los 90's en que INGEOMINAS y grupos independientes de estudio generan los primeros modelos hidrogeológicos conceptuales del país, pero los mismos no son llevados al componente numérico, debido a la poca familiarización con el mismo. Uno de los modelos conceptuales más recientes, por ejemplo, fue realizado por la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá en el año 2013, modelo en el cual se especifican conceptual y detalladamente el comportamiento geológico, hidrológico, geofísico, sísmico, hidráulico e hidrogeoquímico de la sabana de Bogotá, pero su componente matemático -cuyo fin sería flexibilizar el aprovechamiento de dicho modelo conceptual tan robusto- no está desarrollado actualmente [7].

Sin embargo, en los últimos años también se han realizado diferentes trabajos relacionados al modelamiento hidrogeológico matemático en Colombia, como por ejemplo en la isla de San Andrés [10], cuencas cercanas al Cauca [13], el bloque norte de la ciudad de Bogotá [11]. Lo cual contribuye a la realización del presente trabajo ya que se han obtenido resultados locales favorables para tener como punto de referencia y así, llegar a la familiarización con este tipo de modelamiento hidrogeológico de una manera adecuada.

5. OBJETIVOS

Objetivo General

Complementar el Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Secretaria de Ambiente (2013) en el Bloque Centro de la ciudad de Bogotá, con la aplicación de las herramientas técnicas Modflow y Sistemas de Flujo de Töth.

Objetivos Específicos

- Definir las variables hidrogeoquímicas e hidráulicas consideradas para las herramientas técnicas seleccionadas, con el fin de desarrollar la línea base de los flujos de agua subterránea en la zona de interés.
- Modelar numéricamente la zona de interés en el software Modflow para brindar un apoyo de carácter flexible y preciso, a la gestión del recurso hídrico subterráneo que se lleva a cabo actualmente en la ciudad de Bogotá.
- Identificar zonas de interés hidrogeológico en el área de estudio, contrastando los resultados alcanzados con los modelos empleados y las conclusiones alcanzadas por la Secretaria Distrital de Ambiente.

6. ALCANCE

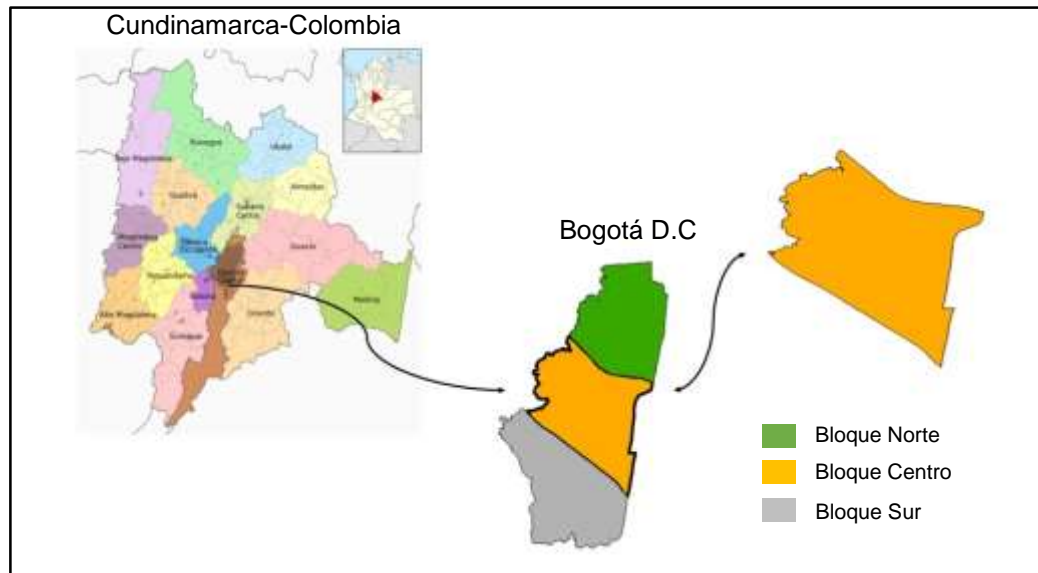
Este proyecto investigativo comprende el desarrollo de un modelo hidrogeológico numérico calibrado y validado, junto a la construcción cartográfica de las zonas de recarga y descarga para el bloque centro de la ciudad de Bogotá, D.C.

El bloque central de la ciudad de Bogotá está comprendido entre los siguientes límites y comprende un Área aproximada de 25.801,7915 Hectáreas.

- Límite al Norte - El ramal falla de Usaqué.
- Límite al Sur - La falla de Facatativá San Cristóbal.
- Límite al Occidente - Río Pava.
- Límite al Oriente - Los cerros Orientales.

En la Figura 1. se ilustra la zona de estudio señalada en color naranja.

Figura 1. Delimitación del Área de Estudio



Fuente: Autores

De la figura anterior es importante reiterar que los bloques norte y sur, corresponden a estudios independientes y complementarios al expuesto a lo largo del presente documento.

7. PERTINENCIA SOCIAL

El presente proyecto, tiene una pertinencia social bastante alta, debido a que se han identificado áreas en el país de gran potencial para la oferta hídrica sub-superficial, tanto en términos de calidad y cantidad. Se conoce que un 36% del área del país, tiene potencial de oferta hídrica sub-superficial, de los cuales solo se han estudiado el 15%. Dichas aguas son usadas principalmente para el riego y el suministro de agua potable en diferentes zonas del país como La guajira, Valle del cauca, Magdalena, Cesar, Córdoba, Bolívar, San Andrés, Cauca, Quindío, Risaralda, Meta y Bogotá [14].

Aunque no es un método convencional de abastecimiento en Colombia, se puede observar que tanto las personas, como sus actividades económicas, dependen del recurso hídrico sub-superficial. Por lo mismo, es de gran importancia la implementación de modelos numéricos en donde se asegure la sostenibilidad en el tiempo del recurso hídrico sub-superficial y no se llegue a practicar la “Minería del Agua Subterránea” (Conversión de un recurso renovable a uno no renovable) [15].

Finalmente, teniendo como objeto la población ubicada en la zona de interés, es crucial implementar un modelo numérico que permita simular escenarios futuros respecto al uso del recurso hídrico subterráneo ya que, según el modelo conceptual realizado por la SDA [7], la zona delimitada para el presente estudio posee en mayor medida una vulnerabilidad baja a moderada frente a la contaminación, lo cual podría representar un riesgo en el futuro para la sostenibilidad del recurso y la explotación del mismo.

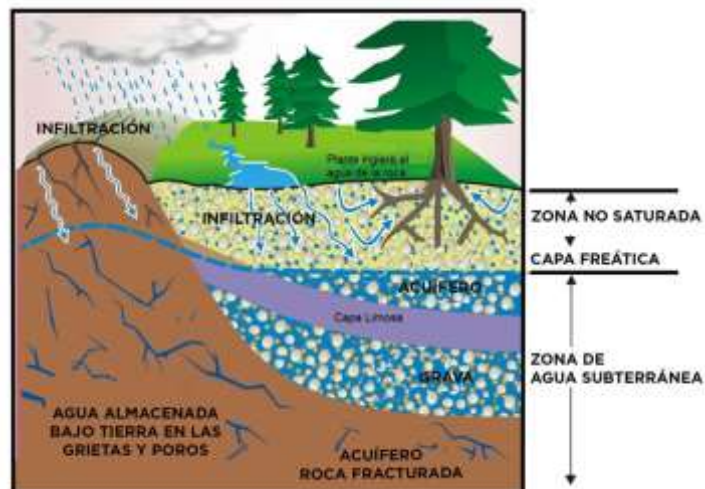
8. MARCO TEORICO

En este apartado se presentan los temas centrales sobre los cuales el presente proyecto se desarrollará. Inicialmente, se expone el cómo existe el agua subterránea en la naturaleza y la teoría del modelo gravitacional propuesto por József Tóth. Seguido de esto, se aborda el agua subterránea como recurso natural aprovechable y la disponibilidad del mismo a nivel global, nacional y local. Finalmente, se aborda el tema de la modelación hidrogeológica incluyendo los dos tipos de modelación hidrogeológica más comunes: Modelación hidrogeológica conceptual y modelación hidrogeológica numérica.

8.1. Modelo Gravitacional

El modelo gravitacional es provocado principalmente por las diferencias en la elevación de la tabla de agua y su patrón esta auto organizado jerárquicamente en grupos denominados sistemas de flujo. Dichos sistemas de flujo se generan gracias a liberaciones de presión en la tabla de agua y sus patrones se modifican según la estructura permeable de las rocas. Así mismo, la topografía juega un papel muy importante permitiendo que el agua se mueva a varios kilómetros de profundidad, creando depósitos de agua dulce que pueden servir de abastecimiento para los seres vivos y se convierte en uno de los recursos naturales más importantes dentro de la naturaleza [16].

Figura 2. Esquema Gráfico Aguas Subterráneas



Fuente: [17]

8.2. Sistemas de Flujo

Según József Tóth, un sistema de flujo subterráneo se define como “un conjunto de líneas de flujo en las cuales, dos líneas de flujo adyacentes en un punto dado de la región de flujo, permanecen adyacentes a través de toda la región. Dichos flujos pueden ser interceptados en cualquier lugar por una superficie ininterrumpida a través de la cual el flujo tiene lugar en una sola dirección” [16]. Tóth agrega, que mientras el flujo se genere por la tabla de agua, sus patrones son modificados por heterogeneidades en la estructura permeable de la roca.

Dentro de esta teoría de sistemas de flujo propuesta por Tóth, debe considerarse la hidrogeoquímica del recurso subterráneo debido a que, durante su movimiento por el subsuelo, la composición química del agua varía según factores geológicos, geomorfológicos, climáticos, ambientales, tiempo de residencia en el subsuelo (la cual se explicara posteriormente debido a su importancia), interacciones roca- agua, entre otros [18], [5].

Para comprender la hidrogeoquímica del agua sub-superficial basta con conocer los constituyentes iónicos mayoritarios de la misma: los aniones que componen los constituyentes mayoritarios son el Cl^- , SO_4^{2-} , y HCO_3^- , aunque suelen incluir también aniones como CO_3^{2-} , NO_3 y NO_2 . Los cationes de dichos constituyentes son Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y se incluye el K^+ y el Fe^{2+} [19]. Además de lo ya mencionado, es importante conocer también, la evolución química del agua en el subsuelo, la cual afecta el pH del agua durante su trayectoria, es decir, si el agua se analiza en un sitio cercano a una zona de recarga, su pH será inferior a 7, en cambio si esta próxima a zonas de recarga su pH puede tener tendencia a básico [5]. En la figura 3. Puede detallarse gráficamente la teoría de Tóth y sus componentes:

8.3. Recurso Hídrico Subterráneo

El recurso hídrico subterráneo puede especificarse como cualquier masa de agua confinada en los poros naturales de las diferentes capas del subsuelo. Dicho recurso constituye aproximadamente el 0,76 % del agua total del planeta, lo cual lo convierte en un foco investigativo frente a fuentes convencionales como lagos y ríos los cuales representan únicamente el 0,007% y 0,0002% respectivamente [21]. De igual forma, el recurso hídrico subterráneo es un elemento bastante importante dentro del ciclo hidrológico debido a que puede tanto brindar agua a cuerpos superficiales y a la atmosfera como también, almacenarla por largos periodos de tiempo [22], [23].

Las aguas que interactúan en el proceso de formación de acuíferos suelen necesitar clasificación debido a la gran variedad que estas pueden tener según su procedencia, su ubicación sub-superficial, forma de infiltración, entre otros [24]. Por ejemplo, según la concentración de sustancias disueltas en ella, el agua subterránea puede clasificarse en agua dulce, si contiene como máximo 2.000 mg/L de sustancias disueltas, agua salobre con concentraciones hasta 5.000 mg/L, salada con concentraciones hasta 40.000 mg/L y salmueras con concentraciones hasta 350.000 mg/L [25]. Otra clasificación que es muy común, es según la ubicación de estas en el subsuelo. Las aguas de la zona no saturada son aquellas que yacen sobre la zona de saturación de las rocas y bajo la superficie del terreno. Con las aguas de la zona no saturada se relacionan las aguas del suelo y las aguas colgantes. Seguido a esto, se encuentran las aguas freáticas que se caracterizan por ser aquellas que se encuentran a partir de la superficie del terreno en un horizonte acuífero y pueden contener o no presión alguna [24].

8.4. Hidrogeoquímica

El agua que se infiltra en el subsuelo e inicia su recorrido en el mundo subterráneo no sólo está compuesta por la molécula de H₂O, sino también de una gran cantidad de iones en solución que juegan un rol importante en la atribución de las características químicas del agua. A medida que el agua se infiltra en el subsuelo, intercambia sus iones en solución con la roca y/o sedimento que atraviesa, de igual manera un agua puede mezclarse en su trayecto con agua de otra fuente, cambiando de esta manera sus propiedades.

El estudio de las propiedades o características adquiridas por el agua, permite así determinar los procesos que intervinieron durante el paso de la misma en el

subsuelo; y esto a su vez permite entender el funcionamiento del acuífero donde circula. Esta es una herramienta básica que además de determinar la calidad natural del agua para diferentes usos, mediante análisis fisicoquímicos e isotópicos, aporta la siguiente información al modelo hidrogeológico conceptual, identificando las zonas de recarga y descarga, dirección del flujo subterráneo, mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes (aguas superficiales y subterráneas, entre acuíferos) origen del agua subterránea, tiempo de residencia de las aguas subterráneas [26].

- **Constituyentes mayoritarios**

En la Tabla 1. se muestran los iones mayoritarios que se presentan en las rocas y tienen contacto con las moléculas del agua. En dicha tabla se muestra también el factor de conversión que utiliza la CAR de mg/l a meq/l para procesar dichos constituyentes tanto en diagramas de Piper como diagramas de Stiff.

Tabla 1. Factores de Conversión de mg/l a meq/l

Ion	Factor de Conversión
HCO ₃ ⁻	0.0164
CO ₃ ²⁻	0.0333
Cl ⁻	0.0282
SO ₄ ²⁻	0.0208
Na ⁺	0.0435
K ⁺	0.0256
Ca ²⁺	0.0500
Mg ²⁺	0.0826
Fe ²⁺	0.0538
Mn ²⁺	0.0364
CaCO ₃	0.0199

Fuente: [27]

8.5. Recurso Hídrico Subterráneo en Colombia

De acuerdo a los estudios del recurso hídrico subterráneo en Colombia, se estimó un análisis comparativo entre la oferta hídrica per cápita (bajo condiciones naturales de 12.000 m³ / habitante / año) con respecto a la oferta actual, se muestra significativa abundancia hídrica en Colombia. Por tal razón desde hace pocos años las aguas subterráneas han sido consideradas como una fuente alternativa económica a las aguas superficiales debido a su mejor calidad y el relativamente bajo costo de manejo [28].

Es de vital importancia resaltar el hecho sobre el limitado conocimiento de los sistemas acuíferos del territorio nacional. Actualmente, se cuentan con estudios a nivel de prospección y exploración principalmente en la Sabana de Bogotá, La Guajira, Catatumbo, algunos sectores de la Costa Atlántica, Valle del Cesar y áreas del Valle superior y Medio del Magdalena donde los estudios han sido extensivos, sin embargo, no se cuenta con un seguimiento y monitoreo generado a partir de redes básicas, que propicie el reconocimiento de la dinámica espacio temporal del recurso [28].

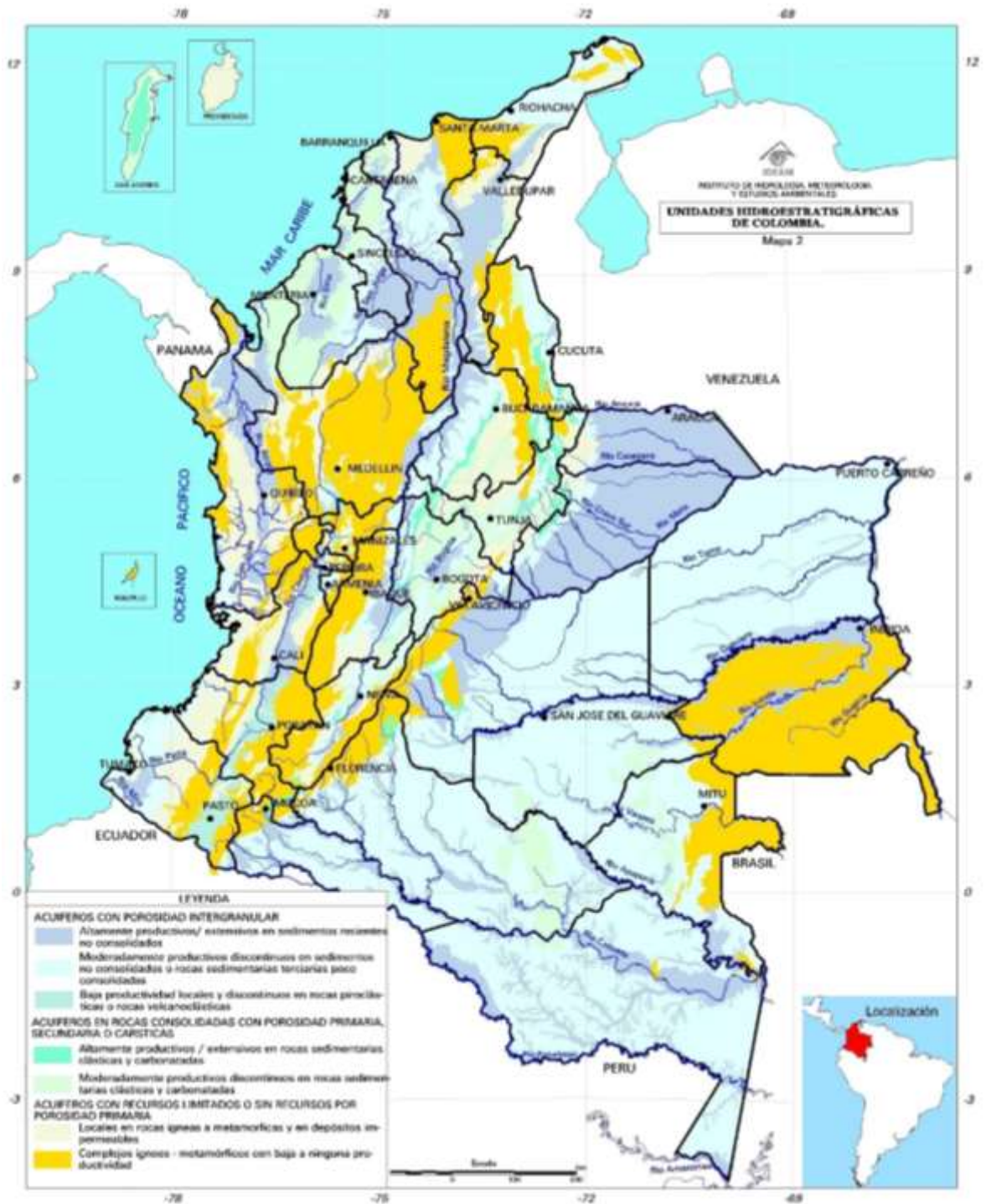
En la Tabla 2. y la Figura 4. se puede detallar la distribución de áreas hidrogeológicas en el territorio nacional:

Tabla 2. Zonas Hidrogeológicas en el Territorio Nacional

Zonas Hidrogeológicas En Ambientes Sedimentarios Y Vulcanoclásticos Con Buenas Posibilidades Hidrogeológicas			
Provincia	Área km²	Provincia	Área km²
Llanos Orientales	269.145	Sinú – San Jacinto	38.319
Caguán – Vaupes – Amazonas	258.778	Plegada de la Cordillera Oriental	60.649
Putumayo	35.615	Urabá	5.340
Valle del Cauca - Patía	2.657	Guajira	13.399
Valle inferior del Magdalena	45.572	Catatumbo	7.064
Cesar- Ranchería	10.247	Choco - Pacifico	32.224
San Andrés	25	Tumaco	24.095
Valle medio del Magdalena	27.924	Valle superior del Magdalena	14.901
Área total km²			845.946

Fuente: [28]

Figura 4. Mapa Unidades Hidroestratigráficas de Colombia



Fuente: [29]

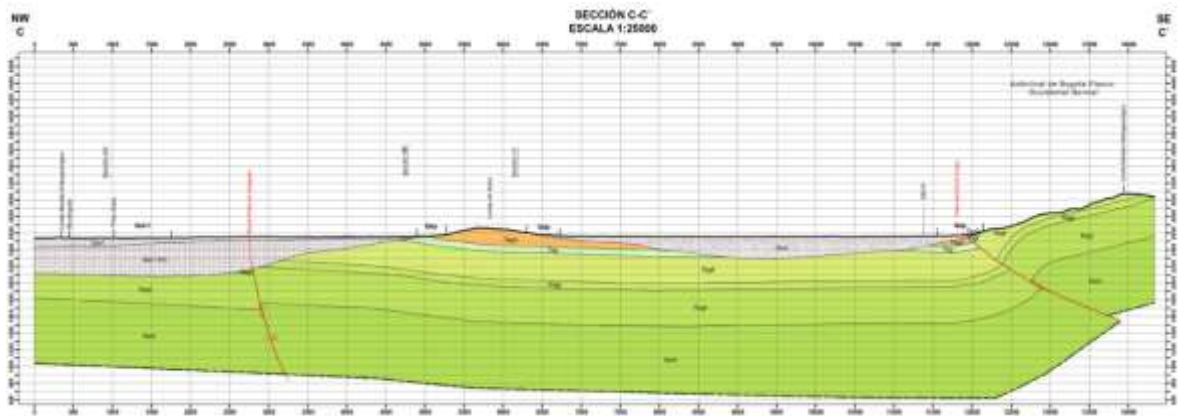
8.6. Recurso Hídrico Subterráneo en Bogotá

Es importante antes de precisar el recurso hídrico de la ciudad, conocer cuáles son las unidades hidrogeológicas de interés [8], [15]:

- La formación Sabana está compuesta en su mayor parte por capas horizontales, poco consolidadas, de arcillas plásticas grises y verdes, y en menor proporción por lentes y capas de arcillas turbosas. Esta formación se clasifica como un acuífero de porosidad primaria con gran importancia debido a sus niveles arenosos continuos. Puede presentar acuíferos sin conexión hidráulica o continuidad lateral los cuales tienen poca o nula posibilidad de recarga.
- La formación Guaduas está constituida por arcillolitas compactas de color gris, intercaladas con bancos importantes de areniscas cuarzosas de grano fino y matriz arcillosa. Dicha formación en su conjunto presenta un acuífero de porosidad primaria, con baja extensión lateral y recarga mínima.
- La formación Arenisca Dura conforma los cerros más prominentes del área, constituida por una secuencia de areniscas cuarzosas, con cementación silíceo, con intercalaciones de limolitas y arcillolitas. Dicha formación presenta fracturas a nivel regional, lo cual indica una gran importancia hidrogeológica ya que puede ser el acuífero de mayor importancia en la zona a pesar de su alta profundidad (650 metros mínimo.)
- La formación Labor- Tierna está constituida por areniscas cuarzosas y un conjunto intermedio de arcillolitas. Esta formación es un acuífero de porosidad primaria de alta productividad y gran importancia hidrogeológica, ya que incrementa su almacenamiento debido a la presencia de las fallas de Torca y Boquerón del Carbón.

En la Figura 5. Se puede detallar un modelo grafico/corte de la realidad subterránea de la sabana de Bogotá:

Figura 5. Corte Geológico de la Ciudad de Bogotá



Fuente: [27]

Una vez visto esto, se presenta en la Tabla 3. el cálculo de las reservas del distrito capital, el cual se enfoca a los sistemas acuíferos más importantes (rocas del grupo Guadalupe, sedimentos de la formación Sabana, Formación Chía y Formación Tunjuelo) [7].

Tabla 3. Reserva del Recurso Hídrico Subterráneo en Bogotá

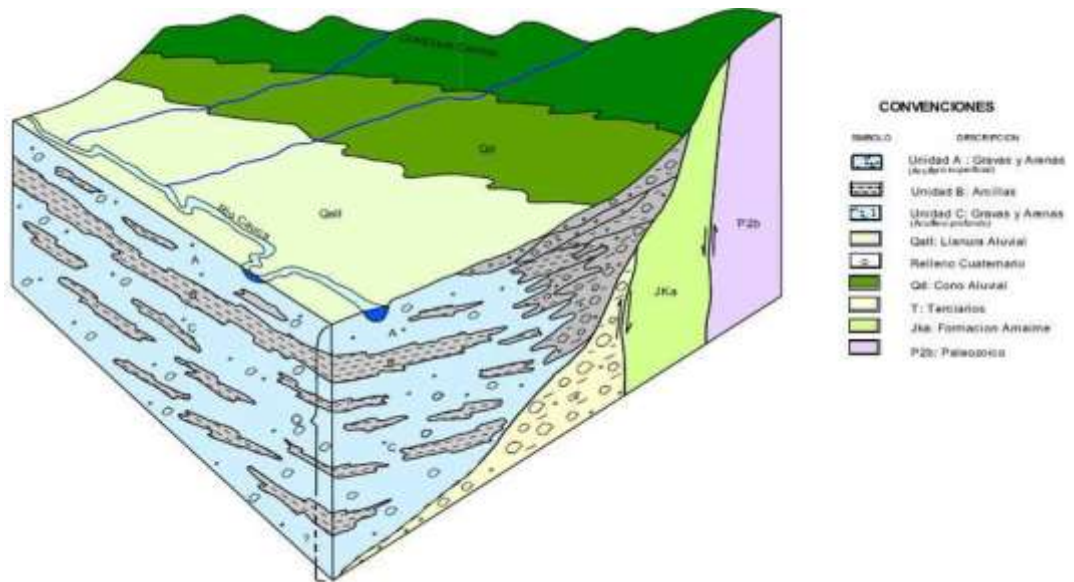
Unidad Geológica	Área Km²	Rendimiento Especifico (%)	Reservas m³ * 10⁶ (Proyectadas al Año 2012)
Grupo Guadalupe	540.053	6	24.303
Depósitos No Consolidados	391.088	3	6.453

Fuente: [7]

8.7. Modelamiento Hidrogeológico

El modelamiento hidrogeológico puede dividirse en dos tipos: el modelamiento hidrogeológico conceptual y el modelamiento hidrogeológico matemático o numérico. El modelamiento hidrogeológico conceptual es la representación de un conocimiento de acuíferos ideal para su correcta gestión, pues este integra la información geológica, hidrológica, hidrodinámica, hidráulica, hidrogeoquímica e isotópica para mostrar los procesos y flujos que ocurren en su dominio espacial. El modelo conceptual también es dinámico en la medida en que se mantenga actualizada su información de cantidades, calidad y estadísticas de extracción y recarga a partir de un monitoreo constante [30]. En la Figura 6. Puede observarse un ejemplo de este tipo de modelamiento:

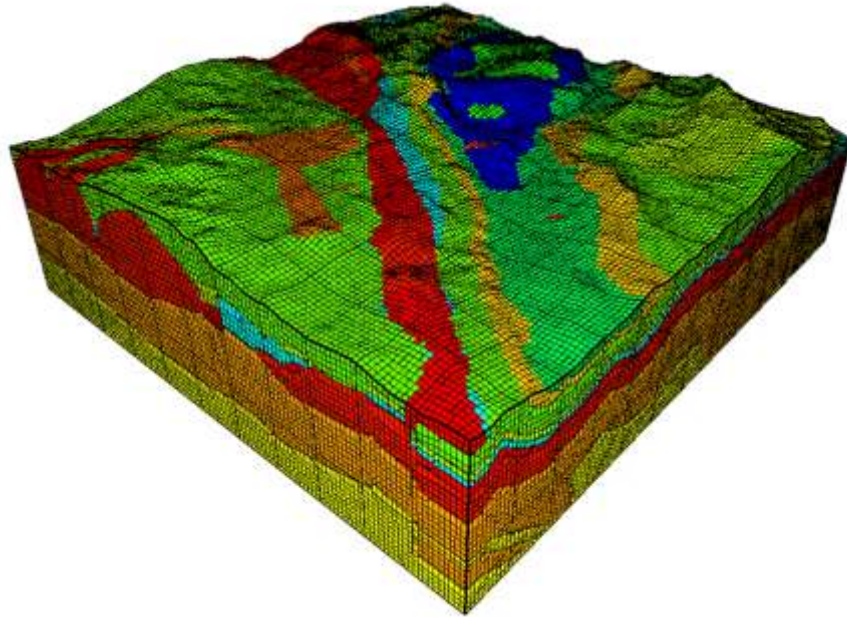
Figura 6. Modelo Hidrogeológico del Acuífero del Valle del Cauca



Fuente: [32]

En cuanto al modelamiento matemático, existen diversos *softwares* para llevar a cabo el modelamiento hidrogeológico conceptual de una manera discretizada y aplicando condiciones de borde para lograr tener un mayor entendimiento de la zona de estudio y simular su comportamiento frente a diferentes fenómenos o modificaciones que se puedan realizar [31]. En la Figura 7. Se puede detallar un ejemplo de este tipo de modelamiento hidrogeológico:

Figura 7. Modelo Hidrogeológico Numérico Ejecutado en el Software FeFlow



Fuente: [33]

8.8. Modelo Hidrogeológico Conceptual de Tóth

El Modelo conceptual de József Tóth y Rene d'Andrimont fue diseñado a partir de un modelo de flujo gravitacional el cual fue realizado por medio de mediciones en campo de secciones transversales, midiendo las características fisicoquímicas del agua de diferentes pozos a lo largo de estas secciones y finalmente por medio estadístico se crearon los criterios y relaciones entre los procesos químicos del agua con la superficie, topografía, vegetación y clima [16].

El modelo hidrogeológico de Tóth, corroboró la relación de los sistemas de flujo con los procesos químicos con la superficie, topografía, vegetación y clima. Así mismo, por medio de estos criterios, lograba identificar el tipo de flujo y las zonas de descarga y recargas presentes en el área de estudio, siendo las zonas de recarga donde hay mayor infiltración de agua al subsuelo y las zonas de descarga donde el agua subterránea aflora del subsuelo.

József Tóth y Rene d'Andrimont lograron encontrar que las zonas de recarga se encuentran en las áreas más altas donde la vegetación esta caracterizada por ser pequeña y con poco desarrollo radicular y los suelos son relativamente nuevos. También encontraron que las zonas de descarga se encuentran en las áreas más bajas y la vegetación está caracterizada por ser alta y tener un desarrollo radicular más pronunciado [16].

Esto relacionado directamente con el ciclo hidrológico en donde la vegetación es de suma importancia para fines de establecer zonas de recarga. En Colombia como en otros lugares, será importante el concepto de permeabilidad del suelo para la infiltración de agua y formación de los diferentes acuíferos.

József Tóth y Rene d'Andrimont también concluyeron que los flujos locales están caracterizados por tener una composición más carbonácea (HCO_3), tener pH ácido y temperaturas bajas, así mismo los flujos intermedios caracterizados por composición más sulfatada (SO_4) y su pH tiende más a la neutralidad y finalmente los flujos regionales una composición más clorada (Cl^-) y sus temperaturas son altas [34].

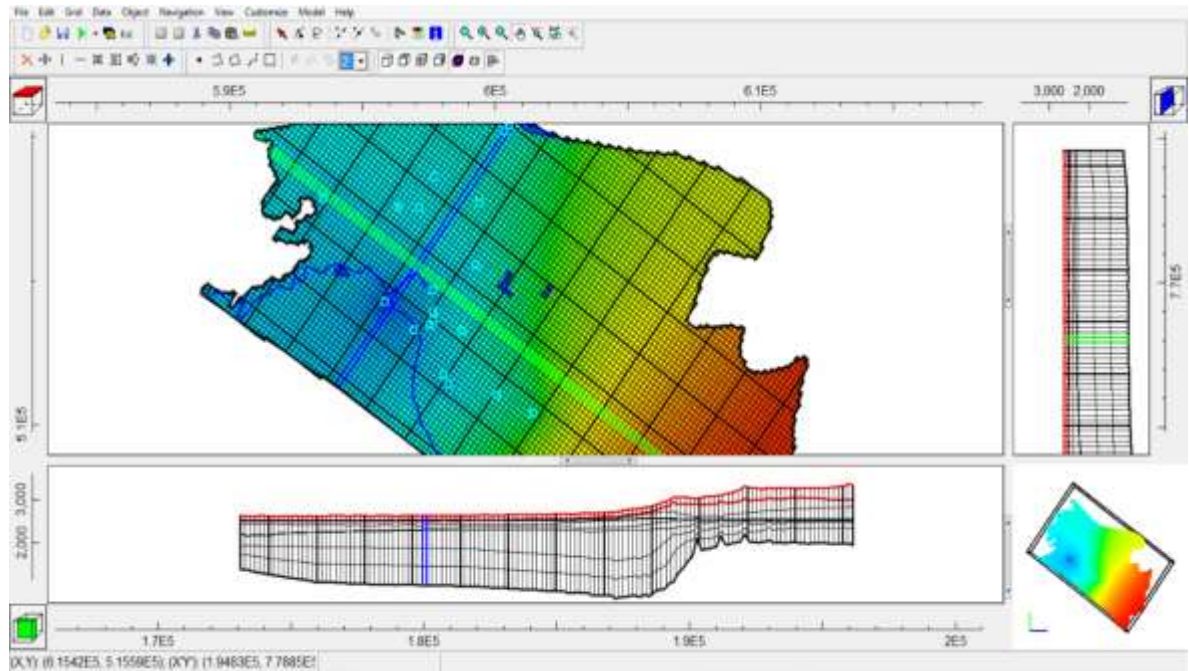
8.9. Modelo Hidrogeológico Numérico Modflow

El software Modflow, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, consiste en un modelo de flujo saturado en diferencias finitas y un programa modular de ordenador asociado. A pesar de ser diseñado para modelar en 3D, es usado comúnmente para la modelación multicapa [35]. La división del programa en módulos, permite examinar características hidrológicas específicas del modelo independiente y además facilita el desarrollo de capacidades adicionales al poder añadir paquetes al programa.

En cuanto al flujo de agua, esta se puede simular utilizando aproximaciones en diferencias finitas centradas en el bloque. Las capas pueden ser simuladas ya sea como libres, semi confinadas o confinadas. Adicionalmente, en dicho software es posible modelar flujos procedentes de pozos de bombeo, recarga superficial, evapotranspiración, letrinas, flujo a través de lechos de ríos, entre otros [36].

En la Figura 8. Se puede observar la interfaz gráfica de Modflow empleada para este proyecto investigativo:

Figura 8. Interfaz Gráfica de Modflow: ModelMuse



Fuente: Autores

9. METODOLOGIA

La elaboración de este proyecto contemplo la ejecución de 4 fases relacionadas directamente con cada uno de los objetivos planteados.

En la primera fase del proyecto, se construyó la línea base de los sistemas de flujo subterráneos en el área de estudio. Como segunda fase, se elaboró la cartografía temática que permita evidenciar el comportamiento espacial de diferentes parámetros hidrogeológicos, relacionados al flujo subterráneo del recurso hídrico en la zona de interés (lo anterior basado en el modelo conceptual de Töth). En la tercera fase, se buscó principalmente calibrar correctamente y validar los datos obtenidos en Modflow para así, en la última fase, poder correlacionar los datos generados en los modelos ejecutados previamente.

A continuación, se describirá en detalle cada una de las fases metodológicas:

9.1. Fase I. Línea Base

Esta fase se basó principalmente en la definición de las variables hidrogeoquímicas e hidráulicas imprescindibles para los modelos que se llevaron a cabo, con el fin de generar una línea base sólida de los flujos de agua subterránea de la zona de interés.

Para la definición de las mismas, se realizó una revisión bibliográfica de artículos extranjeros tales como aquellos realizados por Yu-Pin et al. [37], Moharir et al. [38], Chen et al. [39] y Surinaidu et al. [40], en los cuales se destaca la importancia y la función de los siguientes parámetros para la ejecución de modelos iguales o similares (ver Tabla 4.):

Tabla 4. Parámetros Hidrogeoquímicos e Hidráulicos de Interés

Parámetros Hidrogeoquímicos	Parámetros Hidráulicos
<p>Constituyentes Químicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aniones <ul style="list-style-type: none"> ○ HCO₃⁻ ○ SO₄⁻ ○ Cl⁻ • Cationes <ul style="list-style-type: none"> ○ Ca⁺ ○ Mg⁺ ○ Na⁺ ○ K⁺ <p>Constituyentes Físico – Químicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conductividad Eléctrica • pH • Alcalinidad • Dureza 	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel Dinámico • Nivel Estático • Conductividad Hidráulica • Transmisividad

Fuente: Autores

Para llevar a cabo el análisis estas variables, se recolecto información disponible en la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá acerca de 19 pozos concesionados en la zona de interés. Dichos pozos, poseen expedientes los cuales contienen datos puntuales e históricos tanto hidrogeoquímicos como hidráulicos para así, mediante herramientas de análisis geoespacial, lograr obtener una aproximación del comportamiento de los diversos parámetros a lo largo del área de estudio.

En la Tabla 5. Se puede detallar la información general referente a los pozos consultados. Para conocer la distribución espacial de los mismos en el área de estudio, observar la Figura 11 (numeral 10.1) y/o mayor detalle en el Anexo A.

Tabla 5. Información General Pozos Empleados

CÓDIGO	NOMBRE POZO	COTA	NORTE	ESTE
pz-08-0023	Lafayette 1	2552	105871.01	93901.46
pz-09-0013	Textiles Romanos	2581	105524.09	957099.69
pz-09-0015	Mobil Terminal De Transportes	2553	106293.79	95675.425
pz-09-0019	Flota La Macarena	2560	109464.10	915798.38
pz-09-0040	Indega Panamco Planta Norte Gases	2554	109170.91	94412.88
pz-09-0041	Protela S.A.	2573	109149.07	95204.40
pz-09-0043	Manufacturas Eliot No. 1	2564	105240.19	95724.14
pz-09-0044	Manufacturas Eliot No. 2	2565	105058.01	95591.92
pz-09-0047	Acabados Informales Y Lavados S.A.	2563	104899.84	94993.23
pz-10-0003	Alimentos El Jardín	2553	110213.00	957469.63
pz-10-0015	Compensar	2557	107136.85	97326.21
pz-10-0024	Auto lavado El Pastuso	2581	109323.75	974677.17
pz-10-0027	Cootransniza Ltda.	2551	111996.61	98576.41
pz-10-0028	Serviautos La Estrella	2551	111798.86	98409.15
pz-14-0004	Hermanas Dominicás Presentación	2587	102000.00	994800.00
pz-16-0002	Gaseosas Colombiana No 2	2581	102641.92	98123.07
pz-16-0003	Gaseosas Lux No. 1	2579	103013.05	96279.69
pz-16-0029	Colortex	2579	103341.28	96116.07
pz-16-0036	Lime	2568	104855.18	968146.32

Fuente: Autores

9.2. Fase II. Elaboración de Cartografía y Modelo Conceptual de Töth

En esta fase se analizaron y construyeron cartografías que permiten evidenciar el comportamiento espacial de los diferentes parámetros relacionados con el estudio del flujo hídrico subterráneo. Esta fase metodológica se basa principalmente en trabajos como los elaborados por Ramírez et al. [11], Chen et al. [39], Schmitz et al [41], Lachaal et al. [42], y C. San Juan [43], los cuales generaron cartografía base de curvas de nivel, orografía de la zona, geología, permeabilidad, precipitación, ETP, entre otros.

- **Curvas de Nivel**

Para la generación de esta cartografía, se obtuvo un DEM del sitio web ASTER-DEM® en el cual está contenida la zona de estudio. Posteriormente, dicho DEM se procesa en el *software* ArcMap® con el fin de extraer únicamente la zona de estudio mediante la herramienta “*Extraction by Mask*” y eliminar imperfecciones con la herramienta “*Fill*”. Una vez hecho esto, se procede a emplear la herramienta “*Contour*” para generar un *shape* nuevo con curvas de nivel cada 300 metros.

- **Variación de pendientes**

Para la elaboración de este *Raster*, se emplea el DEM previamente utilizado para la generación de las curvas de nivel, solo que en esta oportunidad es procesado con la herramienta “*Slope*” la cual genera la variación local de las pendientes en términos porcentaje. Finalmente, se reclasifica dicho *Raster* con la herramienta “*Reclass*” para ajustar los porcentajes de pendiente a la clasificación estipulada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

- **Geología**

Esta cartografía se elabora en base a la carta geológica generada en el modelo hidrogeológico conceptual realizado por el INGEOMINAS [8]. Dicha carta es transformada a formato .TIFF para posteriormente georreferenciarla en el *software* ArcMap® y finalmente, generar un *shape* de polígonos a partir

de la vectorización de las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio.

- **Zonificación de Permeabilidad**

Para la elaboración de esta capa, se descarga una imagen *Landsat* de la zona de estudio por medio del programa *Glovis*[®] de la USGS. A continuación, en el *software* *ArcMap*[®], se emplea una combinación determinada de RGB (Bandas Multiespectrales) para identificar y resaltar de forma precisa las áreas de cobertura vegetal (zonas permeables). Adicionalmente, se tomó como área de cobertura impermeable a todo lugar que se encuentre pavimentado o con algún tipo de obra civil, ya que el agua proveniente de la precipitación es canalizada y su infiltración al suelo se ve totalmente impedida.

- **Precipitación Local**

En la generación de esta cartografía, se emplearon datos de dos diferentes fuentes, tales como los datos climatológicos tanto del IDEAM como de modelos hidrogeológicos conceptuales previamente realizados, específicamente el modelo generado por la SDA [7]. Lo anterior se realiza debido a la carencia de datos presentada en el IDEAM y también, para asegurar una mejor representación climática en términos geoespaciales.

En la Tabla 6. Se puede observar las características generales de las estaciones climáticas obtenidas (Para ver distribución espacial de las mismas, consulte Anexo B):

Tabla 6. Información General Estaciones Climatológicas

Nombre Estación	Norte	Este	Altura
Apto El Dorado	1010773.00	993176.00	2547
Doña Juana	992300.00	993700.00	2700
ECI	1020729.00	1003513.00	2650
El Dorado Didáctica	1011164.00	992335.00	2546
Flores Colombianas	1014850.00	990486.00	2560
Fontibón	1007180.00	992500.00	2518
Guaymaral	1024100.00	1000725.00	2560
Jardín Botánico	1007478.00	997883.00	2552
La Ramada	1011430.00	989110.00	2545
Muña	994560.00	980700.00	2565
UNAL	1003791.00	997882.00	2556
UPN	1007478.00	1001581.00	2570
Vitelma	997682.00	1000642.00	3078
Vivero Venado de Oro	1000105.00	1001581.00	2725

Fuente: Autores

Para crear el *Raster* de precipitación, se calculan los valores de precipitación anual multianual de cada una de las diferentes estaciones y los mismos se cargan al *software* ArcMap® para posteriormente, mediante la opción “*Interpolation*” y el método “*IDW*”, generar un *Raster* que muestre el comportamiento de la precipitación a lo largo y ancho de la zona de estudio.

- **Evapotranspiración Potencial Local / ETP Local**

Para la generación de este *Raster*, se emplea el mismo método usado para generar el *Raster* de precipitación, a diferencia de que los datos de entrada para este *Raster*, son completamente obtenidos del modelo hidrogeológico conceptual de la SDA [6], ya que existía una gran carencia de datos climatológicos para emplear manualmente el método de *Thorntwhite*, cuyo fin es calcular la evapotranspiración potencial a partir de otras variables climáticas.

- **Recarga Local**

El *Raster* de la recarga en la zona de estudio se crea a partir de los balances hídricos reportados en cada una de las estaciones climatológicas contenidas en el modelo hidrogeológico conceptual de Bogotá de la SDA [7], empleando el mismo método de interpolación mencionado anteriormente para precipitación y evapotranspiración potencial.

- **Elementos y Constituyentes Mayoritarios**

El análisis espacial de los parámetros hidrogeoquímicos se lleva a cabo en el *software* ArcMap®, cargando el *shape* de los pozos concesionados en la zona de estudio y añadiéndole a este, los valores promedio de cada uno de los parámetros que se desean analizar espacialmente. Seguido a esto, se emplea la herramienta “*Interpolation*” con el método “*Spline*” con el fin de obtener un *Raster* que permita analizar espacialmente el comportamiento de cada constituyente en el área de interés.

- **Tipos de Flujo**

Esta cartografía se realizó de acuerdo a los documentos de consulta [16] que especifican el comportamiento de algunos elementos químicos predominantes o más acentuados en su comportamiento (Ej: cloro “Cl” y Sodio “Na”) para dar una estimación más acertada de los tipos de flujo presentes en la zona de estudio. También se tienen en cuenta otros parámetros, previamente elaborados, como el tipo de pendiente que define zonas de recarga y descarga para mayor distribución de los tipos de flujo presentes.

- **Modelo Conceptual de Töth**

A partir de la hidrogeoquímica presente en la zona de estudio y teniendo en cuenta los criterios de la teoría de Töth, se estableció el tipo de flujo de aguas subterráneas, ya sea local, intermedio o regional, utilizando la técnica de álgebra de mapas.

9.3. Fase III. Modelación en Modflow

Esta fase del proyecto consistió principalmente en realizar tanto la modelación del acuífero en Modflow, como la calibración y validación del mismo. Dicha modelación, se lleva a cabo en el software ModelMuse de la USGS, el cual hace función de interfaz gráfica y compilador del código fuente Modflow.

Para ejecutar este modelo de manera correcta, hace falta definir ciertas condiciones de borde necesarias y mínimas para lograr obtener los resultados esperados por el modelador. Para elegir estas condiciones, se toman como referencia trabajos realizados por Xu et al. [44], Jones et al. [45], Maheswaran et al. [46], V. Mirlas [47] y Ramírez et al. [11]. En la Tabla 7. se pueden detallar las condiciones de borde que se seleccionaron para la realización de la modelación numérica.

Tabla 7. Condiciones de Borde / Paquetes Empleados en la Modelación Numérica

Condición de Borde	Nombre Paquete	Descripción
Flujo de Agua en Zona Saturada	Upstream Weighting Package Pane (UPW)	Es uno de los paquetes más robustos de Modflow para simular el flujo de agua en la zona saturada
Flujo Superficial y Cabezas de Piezométricas	The Flow and Head Boundary Package (FHB)	Este paquete permite al modelador definir las cabezas y los flujos observados (datos de referencia) de una forma independiente de los periodos de estrés y pasos de tiempo en el modelo.
Recarga	Recharge Package (RCH)	Este paquete permite al modelador definir una tasa de recarga fija o variable sobre un área específica.
Cuerpos Lóticos	Drain Package (DRN)	Este paquete permite configurar la relación que posee un río o cuerpo de agua lótico determinado con el acuífero modelado.
Evapotranspiración	Evapotranspiration Package (EVT)	Este paquete permite al modelador definir una tasa de evapotranspiración fija o variable sobre un área específica.

Fuente: Autores

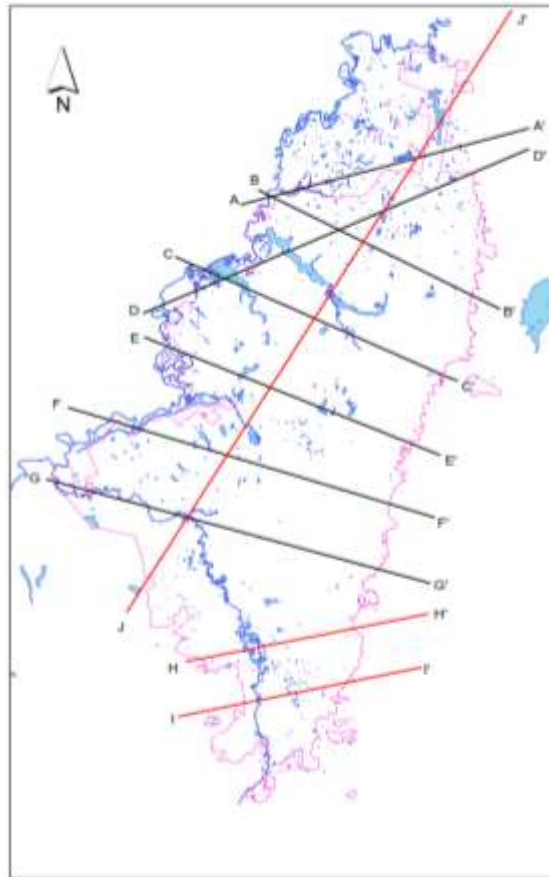
Tabla 7. (Continuación) Condiciones de Borde / Paquetes empleados en la Modelación Numérica

Condición de Borde	Nombre Paquete	Descripción
Cuerpos Lenticos	General Head Boundary Package (GHB)	Este paquete permite configurar la relación que posee un lago o cuerpo de agua lenticos con el acuífero modelado.
Tipo de Solucionador	Newton Solver (NWT)	Este solucionador es exclusivo del paquete Upstream Weighting y resulta el más completo y robusto para la modelación de flujo de agua en zona saturada.
Observación Niveles Piezométricos	Head Observation Package (HOB)	Este paquete de observación permite la comparación de cabezas piezométricas observadas vs simuladas con el fin de facilitar la posterior calibración del modelo.

Fuente: Autores

La incorporación de las capas geológicas de la ciudad de Bogotá al *software*, consiste en elegir cortes geológicos que se ubiquen, tanto dentro del área de estudio, como en zonas aledañas a la misma. Para este trabajo de investigación se eligieron los cortes B – B', C – C', D – D', E – E', F – F', G – G', J – J', estipulados por la CAR en su Plan de manejo ambiental de agua subterránea en la sabana de Bogotá [27]. La ubicación geoespacial de dichos cortes geológicos puede detallarse en la Figura 9.

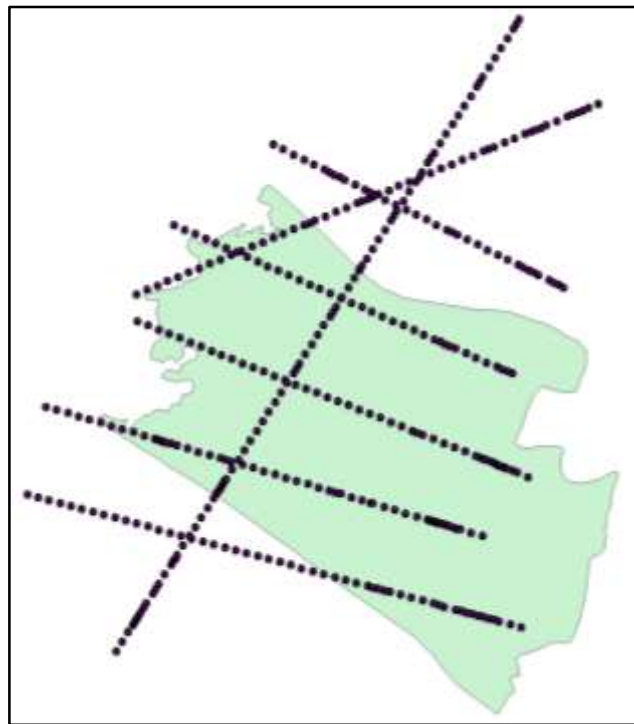
Figura 9. Cortes Geológicos en Bogotá D.C.



Fuente: [27]

Teniendo en cuenta lo anterior, para recrear el modelo digital de elevación de cada una de las capas geológicas que se incluyeron en el modelo, se crea un archivo de *Excel* el cual contiene las coordenadas X y Y de puntos generados a distancias, en mayor medida, equidistantes sobre cada una de las líneas de los cortes geológicos en la ciudad. A cada uno de estos puntos, se les asigna un valor de Z (dependiendo la capa geológica a generar) para finalmente, importar el archivo al *software* ArcMap® para generar un *shape* de puntos como el que se puede apreciar en la Figura 10.

Figura 10. Shape de Puntos Generados para la Elaboración del Basamento



Fuente: Autores

Una vez hecho esto, se procede a emplear la herramienta “*Interpolation*” con el método “*Kriging*” para generar el modelo de elevación digital de la capa. En la Figura 11. Se puede apreciar un ejemplo de la vista 3D del DEM resultante.

Figura 11. Vista 3D DEM Generado para el Basamento



Fuente: Autores

Luego de generar los DEM de las formaciones geológicas a analizar, se definieron dentro del *Software ModelMuse*, el número de acuíferos modelar, su clasificación, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento necesarios para la corrida y posterior calibración del modelo. Dicha información puede observarse en la Tabla 8.

Tabla 8. Formaciones Geológicas Definidas para Ingresar al Software

Estrato	Tipo	Conductividad Hidráulica (m / día)	Coefficiente de Almacenamiento
Depósitos No Consolidados	Libre	1 – 3	1E-05 – 1E-07
Arenisca Dura Superior	Confinado	0.2 – 4	1E-05 – 1E-10
Arenisca Labor y Tierna / Plaeners Superior	Confinado	0.7 – 5	1E-04 – 1E-10
Sabana	Confinado	0.05 – 2.5	1E-04 – 1E-10
Bogotá	Acuitardo	0.01 – 0.05	1E-06
Areniscas del Cacho	Confinado	0.06 – 3	1E-07
Guaduas	Acuitardo	0.02	1E-07
Arenisca Labor y Tierna / Plaeners Inferior	Confinado	0.7 – 5	1E-04 – 1E -10
Arenisca Dura Inferior	Confinado	0.2 – 4	1E-05 – 1E-10

Fuente: [7]

Como puede observarse en la Tabla 8. para cada una de las formaciones geológicas que se ingresaron al *software*, existe un rango de valores tanto de conductividad hidráulica, como del coeficiente de almacenamiento. Estos dos parámetros, serán empleados para calibrar y validar el modelo variando sus valores, dentro de los rangos estipulados por la teoría, hasta encontrar la mínima discrepancia entre los valores observados y los simulados por el *software*.

Como siguiente paso, se ingresan al *software ModelMuse*® los *Raster* previamente generados de Evapotranspiración local, Recarga local, Drenaje, Lagos y Pozos Concesionados. Esto con el fin de construir un modelo numérico sólido y capaz de generar un balance hídrico preciso, que permita conocer información detallada del sistema acuífero de interés y construir información acertada en futuras simulaciones de diversa índole.

Finalmente, una vez ejecutado el modelo numérico en el *software*, se emplean métricas de desempeño de carácter absoluto (Ver Tabla 9.) y relativo (Ver Tabla 10.), recopiladas del artículo presentado por Dawson et al. [48] para asegurar una calibración y validación precisa del modelo numérico.

Tabla 9. Métricas de Desempeño de Carácter Absoluto Empleadas

Métrica	Clase	Función
Error Máximo Absoluto (AME)	Absoluto	Expone la magnitud del peor error obtenido durante la modelación en unidades reales. Maneja las mismas unidades de los datos de entrada (Observados). Para un modelo perfecto será 0.
Diferencia Pico (PDIFF)	Absoluto	Expone la diferencia existente, en unidades reales, entre el mayor valor de los datos de entrada (Observados) y el mayor valor de los datos de salida (Simulados). En caso de ser positiva, indica una subestimación por parte del modelador. En caso de ser negativa, indica una sobreestimación.
Error Promedio Cuadrático (RMSE)	Absoluto	Expone en unidades reales, el nivel de concordancia general entre los valores de entrada y salida. Para un modelo perfecto será 0.

Fuente: [48]

Tabla 10. Métricas de Desempeño de Carácter Relativo Empleadas

Métrica	Clase	Función
Error Absoluto Relativo (RAE)	Relativo	Compara el error absoluto total con un error hipotético absoluto total, el cual supone que los valores de salida consisten únicamente en el promedio de los valores de entrada. Para un modelo perfecto el resultado será 0.
Porcentaje Error en el Pico (PEP)	Relativo	Expone la diferencia existente entre el mayor valor de los datos de entrada (Observados) y el mayor valor de los datos de salida (Simulados). En esta oportunidad, esta métrica se relativiza respecto al mayor valor de los datos de entrada. Se da en términos de porcentaje. Para un modelo perfecto el valor será 0 %.
Error Absoluto Promedio Relativo (MARE)	Relativo	Expone en términos porcentuales, el nivel de concordancia general entre los valores de entrada y salida. Para un modelo perfecto será 0. Se relativiza al relacionar los valores de entrada con los residuales absolutos. Además de esto, tiene en cuenta el número de datos.
Mediana del Porcentaje de Error Absoluto (MdAPE)	Relativo	Esta métrica obtiene la mediana de los errores absolutos, hechos relativos a los datos de entrada. Se presenta en términos porcentuales. Para un modelo perfecto será 0%. Es poco susceptible a los errores en las magnitudes altas y bajas que se puedan presentar en un conjunto de datos determinado.

Fuente: [48]

Cabe aclarar que, para el proceso de calibración, los valores de entrada (Valores Observados) y así mismo, los valores de salida (Valores Simulados), corresponden al promedio multianual de la cabeza de presión de cada uno de los pozos concesionados en el área de estudio. Por otra parte, para el proceso de validación, tanto los valores de entrada, como los valores de salida del modelo, corresponden a la cabeza de presión de un año específico de los pozos concesionados en el área de estudio.

9.4. Fase IV. Correlación de Parámetros

Esta fase del proyecto, basada principalmente en el trabajo realizado por Ramírez et al. [11], se centra en relacionar los diferentes componentes hidrogeológicos de la zona de estudio, a través de la sobre posición de mapas y el uso de la herramienta “*Raster Calculator*” en el *software* ArcMap® para así, lograr definir las áreas de interés hidrogeológico, ya sea en términos de recarga o de descarga.

- **Cartografía de Potencial de Recarga**

Para elaborar dicha cartografía, es necesario transformar todas las capas generadas previamente a formato *Raster*, con el fin de poderlas procesar en la herramienta “*Raster Calculator*”. Dicho proceso se realiza asignando valores de ponderación a los diversos polígonos generados en cada una de las capas de interés. Seguido a esto, usando la herramienta “*Polygon to Raster*” del *software* ArcMap®, se estipula un tamaño de pixel de 180 m² para todos los raster generados para lograr así, una mayor precisión al momento de emplear la herramienta “*Raster Calculator*”.

En el caso de los parámetros como precipitación, los cuales ya se encuentran en formato *Raster*, estos se adecuan mediante la herramienta “*Reclassify*” para asignar valores de ponderación según los rangos de precipitación. En la Tabla 11. se especifican los parámetros necesarios para la elaboración de la cartografía y los diferentes valores de ponderación que deben adoptarse.

Tabla 11. Matriz de Ponderación para Potencial de Recarga

Parámetro	Características	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelo	Suelos franco arenosos a arenosos, con dimensiones de agregados o partículas de gruesos a medios, con muy rápida capacidad de infiltración.	Muy alta	5
	Suelos francos, con fracciones iguales de arena, limo y arcilla, con rápida capacidad de infiltración.	Alta	4
	Suelos franco limosos, con partículas de tamaño medio a finas, con moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración.	Moderada	3
	Suelos franco arcillosos, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados, con muestras de compactación, con lenta a moderadamente lenta capacidad de infiltración.	Baja	2
	Suelos arcillosos, muy pesados, con partículas muy finas, compactados, con muy lenta capacidad de infiltración.	Muy baja	1
Relieve	Plano a casi plano, con o sin rugosidad 0 % - 6 %	Muy alta	5
	Moderadamente ondulado o cóncavo 6 % – 15 %	Alta	4
	Ondulado/cóncavo 15 % – 45 %	Moderada	3
	Escarpado 45 % – 65 %	Baja	2
	Fuertemente escarpado > 65 %	Muy baja	1

Fuente: [11]

Tabla 11. (Continuación) Matriz de Ponderación para Potencial de Recarga

Parámetro	Características	Posibilidad de recarga	Ponderación
Tipo de Roca	Rocas muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macroporos interconectados; por ejemplo, arena gruesa, pomita, grava o cascajo	Muy Alta	5
	Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados; por ejemplo, arena fina o arenisca con poca cementación	Alta	4
	Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular conexión entre poros	Moderada	3
	Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas; por ejemplo, la combinación de gravas con arcillas	Baja	2
	Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas	Muy Baja	1
Precipitación anual	> 950 mm	Muy alta	5
	917 mm – 950 mm	Alta	4
	885 mm – 917 mm	Moderada	3
	855 mm – 885 mm	Baja	2
	< 855 mm	Muy baja	1
Cobertura vegetal permanente (porcentual)	> 80 %	Muy alta	5
	70 % – 80 %	Alta	4
	50 % – 70 %	Moderada	3
	30 % – 50 %	Baja	2
	< 30 %	Muy baja	1

Fuente: [11]

Para evaluar los parámetros previamente expuestos de una forma más enfocada a la zona de estudio, el parámetro tipo de roca se evalúa con base a la Tabla 12:

Tabla 12. Ponderaciones para las Formaciones Geológicas Presentes en la Zona de Estudio

Parámetro	Nombre	Descripción	Posibilidad de Recarga	Ponderación
Formaciones Geológicas	Ksgd – Arenisca Dura	Areniscas cuarzosas muy finas.	Alta	4
	Ksglt –Arenisca Labor-Tierna	Areniscas cuarzosas, feldespáticas blancas.	Alta	4
	Qdp – Depósitos de Pendiente	Depósitos de Pendiente, limos hasta areniscas.	Moderada	3
	Ksch –Chipaque	Arcillolitas arenosas y arcillolitas carbonosas, presencia de amonitas.	Baja	2
	Qrtsa – Rio Tunjuelo	Gravas con intercalaciones menores de arenas arcillosas, arcillas, arcillas orgánicas.	Baja	2
	Tib – Bogotá	Arcillolitas abigarradas, areniscas, limolitas y arcillolitas limosas.	Baja	2
	Tic – Cacho	Areniscas, arcillolitas abigarradas.	Baja	2
	Ksgp – Plaeners	Arcillolitas, limolitas silíceas, areniscas grano muy fino.	Muy baja	1
	Qch1 – Chía	Arcillas de inundación, arcillas orgánicas.	Muy baja	1
	Qsa1 – Sabana	Areniscas lacustres.	Muy baja	1
	Qsa2 – Sabana	Arcillas orgánicas, turbas arenosas.	Muy baja	1
	Tkgs – Guaduas Conjunto Superior	Arcillolitas, areniscas cuarzosas.	Muy baja	1

Fuente: Autores

Con el fin de generar el *Raster* de potencial de recarga se aplica una formula la cual, otorga un factor de importancia en términos de infiltración, a cada uno de los parámetros de la siguiente forma:

$$\text{Recarga} = 0.27 * (\text{Pend}) + 0.23 * (\text{Ts}) + 0.12 * (\text{Tr}) + 0.25 * (\text{Cvg}) + 0.13 * (\text{Prec})$$

Donde:

Pend = ponderación pendiente del terreno

Ts = ponderación tipo de suelo

Tr = ponderación tipo de roca

Cvg = ponderación cobertura vegetal

Prec = ponderación precipitación

En la tabla 13. se muestran los rangos referentes a la posibilidad de recarga de un pixel determinado:

Tabla 13. Valores Referentes a la Posibilidad de Recarga

Posibilidad de Recarga	Rango
Muy Alta	4.1 – 5
Alta	3.5 – 4.09
Moderada	2.6 – 3.49
Baja	2 – 2.59
Muy Baja	1 – 1.99

Fuente: [11]

- **Cartografía de Potencial de Descarga**

Para generar esta cartografía, se emplean los mismos métodos empleados para la generación de la cartografía de potencial de recarga, aplicados a las capas de Tipos de flujo según Töth y a la capa de niveles estáticos obtenida en el modelamiento numérico del software ModelMuse®. En la tabla 14. se puede observar la matriz de ponderación para potencial de Descarga.

Tabla 14. Matriz de Ponderación Para Potencial de Descarga

Parámetro	Características	Ponderación
Nivel Estático	< 2566 m	50
	2566 m – 2592 m	45
	2592 m – 2618 m	40
	2618 m – 2644 m	35
	2644 m – 2670 m	30
	2670 m – 2696 m	25
	2696 m – 2722 m	20
	2722 m – 2748 m	15
	2748 m – 2774 m	10
	> 2774 m	5
Tipo de Flujo	Local	5
	Intermedio	25
	Regional	50

Fuente: [11]

La siguiente ecuación se emplea para evaluar el potencial de descarga:

$$\text{Descarga} = \text{Tf} + \text{Ne}$$

Donde:

Tf = ponderación tipo de flujo.

Ne = ponderación nivel estático.

En la Tabla 15. se pueden observar los rangos referentes a la posibilidad de descarga de un pixel determinado:

Tabla 15. Valores Referentes a la Posibilidad de Descarga

Posibilidad de Descarga	Rango
Muy Alta	> 85
Alta	65 – 85
Moderada	35 – 65
Baja	< 35

Fuente: [11]

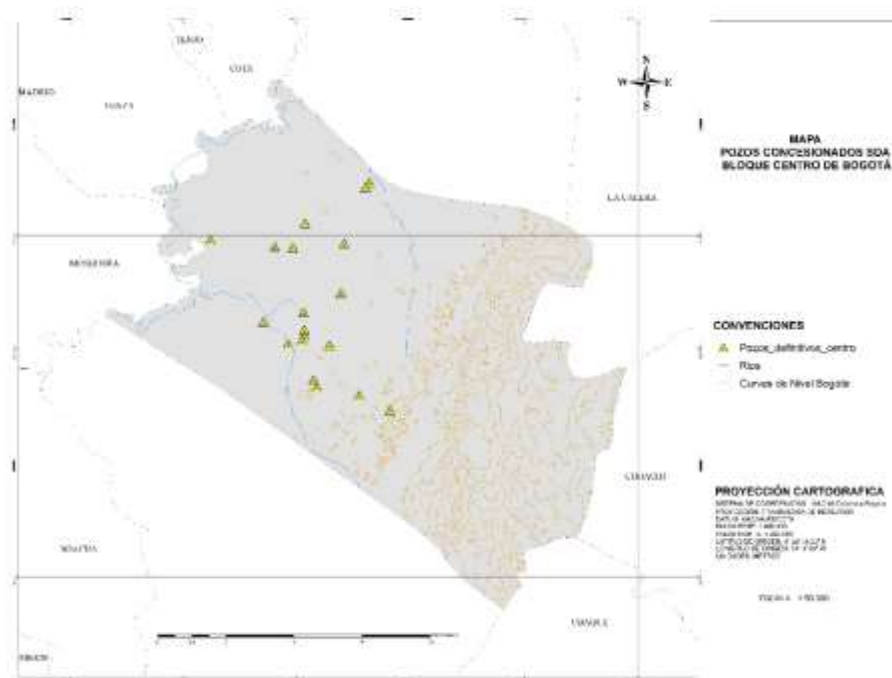
10. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se muestran los resultados de cada fase metodológica con sus respectivos análisis. Se presentan adicionalmente, varias figuras para facilitar el entendimiento de los resultados obtenidos. Sin embargo, se recomienda dirigirse a la sección de anexos para detallar de forma más clara, cada una de estas.

10.1 Fase I. Línea Base

Para esta fase metodológica, se organizó toda la información recopilada de los pozos concesionados a partir de los expedientes solicitados en la SDA, con las respectivas variables fisicoquímicas, hidráulicas e hidrogeoquímicas consignadas en cada uno de estos (Ampliación de la información se expone en el anexo C). En la Figura 12. se puede observar la distribución espacial de los pozos seleccionados a lo largo de la zona de estudio:

Figura 12. Distribución Espacial Pozos Seleccionados



Fuente: Los Autores

De acuerdo a la ubicación de los 19 pozos seleccionados en la zona de estudio, se puede evidenciar que, 9 de los 19 pozos se encuentran alrededor de la zona industrial de Puente Aranda en Bogotá (correspondiente a un 47% del total de los pozos seleccionados en el presente estudio). Adicional a eso, un 100% de los pozos extraen agua del acuífero cuaternario, con profundidades promedio de 219 m. Se puede evidenciar en los caudales de extracción, que el menor registrado corresponde al pozo “Mobil Terminal de Transporte” con un caudal de 0,74 L/s. Por otro lado, el mayor caudal de extracción registrado corresponde a “Indega Panamco Planta norte Gases” con 24,71 L/s. En la Tabla 16. se pueden detallar los valores de caudal de extracción de cada uno de los pozos.

Tabla 16. Caudales de Extracción Pozos Concesionados

Código	Nombre Pozo	Profundidad	Edad Acuífero	Caudal de Extracción (L/s)
Pz-08-0023	Lafayette 1	200	Cuaternario	23.200
Pz-09-0013	Textiles Romanos	80	Cuaternario	1.103
Pz-09-0015	Mobil Terminal De Transportes	83	Cuaternario	0.738
Pz-09-0019	Flota La Macarena	140	Cuaternario	0.991
Pz-09-0040	Indega Panamco Planta Norte Gases	529	Cuaternario	24.713
Pz-09-0041	Protela S.A.	523	Cuaternario	17.696
Pz-09-0043	Manufacturas Eliot No. 1	226	Cuaternario	18.922
Pz-09-0044	Manufacturas Eliot No. 2	239	Cuaternario	19.562
Pz-09-0047	Acabados Informales Y Lavados S.A.	218	Cuaternario	5.510
Pz-10-0003	Alimentos El Jardín	70	Cuaternario	1.414
Pz-10-0015	Compensar	201	Cuaternario	2.680
Pz-10-0024	Autolavado El Pastuso	80	Cuaternario	0.761
Pz-10-0027	Cootransniza Ltda.	102	Cuaternario	1.522
Pz-10-0028	Serviautos La Estrella	92	Cuaternario	0.850
Pz-14-0004	Hermanas Dominicás Presentación	180	Cuaternario	0.917

Fuente: Los Autores

Tabla 16. (Continuación) Caudales de Extracción Pozos Concesionados

Código	Nombre Pozo	Profundidad	Edad Acuífero	Caudal de Extracción (L/s)
Pz-16-0002	Gaseosas Colombiana No 2	185	Cuaternario	20.408
Pz-16-0003	Gaseosas Lux No. 1	192	Cuaternario	10.109
Pz-16-0029	Colortex	250	Cuaternario	8.000
Pz-16-0036	Lime	255	Cuaternario	3.734

Fuente: Los Autores

10.2 Fase II. Cartografía Y Modelo Conceptual De Töth

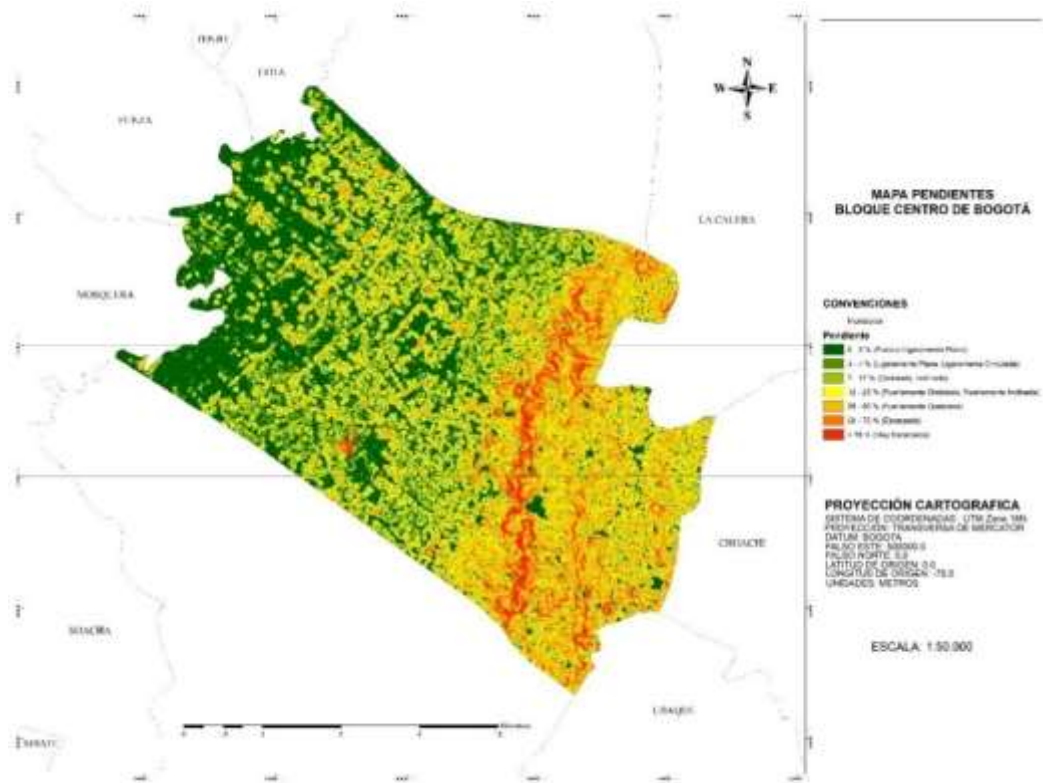
En esta fase del proyecto se analizaron cada una de las cartografías construidas, para tener una visión amplia del comportamiento espacial y la influencia de los parámetros en superficie para los sistemas de flujo de aguas subterráneas y se analizaron los resultados.

- **Análisis de la variación local de la pendiente**

De acuerdo a la variación de la altitud topográfica sobre la zona de estudio, se pueden observar en la Figura 13. las diferentes pendientes generadas por este fenómeno, en términos porcentuales (ver mejor detalle gráfico en el anexo D). Dichos porcentajes se clasifican bajo la metodología propuesta por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi según el porcentaje de inclinación. En la figura 13. se evidencia también, una pendiente bastante pronunciada sobre la ladera occidental de los cerros orientales (pendientes mayores al 75%). Por otra parte, se estiman inclinaciones ligeramente planas y onduladas hacia el sector occidental de Bogotá.

Este parámetro resulta muy importante, ya que condiciona la escorrentía, el drenaje natural y la infiltración para determinar los puntos de posible recarga y descarga presentes en la zona.

Figura 13. Variación Local de Pendientes Estimada en Porcentaje



Fuente: Autores

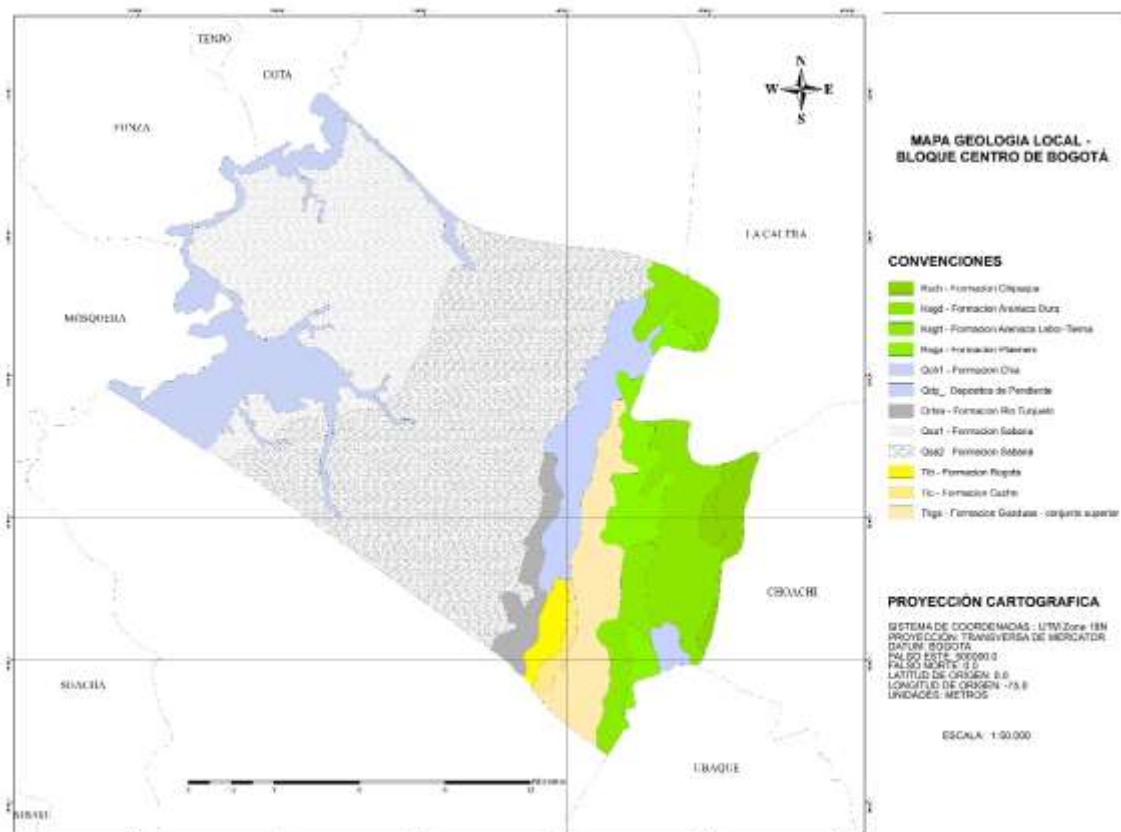
- **Análisis de la Geología Local**

La Formación geológica predominante en el centro de Bogotá corresponde a la formación Sabana (Qsa) del tiempo Pleistoceno Medio y Tardío, con presencia de sedimentos constituidos principalmente por arcillas, con algunas intercalaciones hacia la parte media de arenas finas. Este depósito es el resultado de la acumulación de sedimentos finos en un antiguo lago con fluctuaciones principalmente de arcillas lacustres (Qsa1) y hacia los bordes de esta cuenca sedimentaria arcillas orgánicas, turbas, arcillas arenosas y arenas (arcillosas) intercaladas. Hacia el costado Oeste de la zona de estudio se observa una formación compuesta en su mayoría por arcillas de inundación y arcillas orgánicas (Qch1). De acuerdo a la composición de esta formación, el agua tiene dificultades de infiltración al subsuelo.

Por otra parte, hacia el sector este (sobre los cerros orientales), se pueden encontrar formaciones geológicas del grupo Guadalupe (Ksg) especialmente areniscas cuarzosas de grano fino a muy fino, con intercalaciones esporádicas de limolitas silíceas y arcillolitas (Ksgd) identificando así porosidades más altas que, en conjunto con la cobertura del suelo permeable, la convierte en una zona potencial de recarga para los acuíferos de la zona de estudio. Además, hay presencia de unidades de roca de la formación Bogotá (Tib) y la formación Cacho (Tic), donde predominan las arcillolitas abigarradas y areniscas de grano fino a grueso, respectivamente.

En la Figura 14. se demuestra la distribución espacial de las distintas formaciones geológicas en superficie (mayor detalle gráfico puede apreciarse en el anexo E).

Figura 14. Geología Local



Fuente: Autores

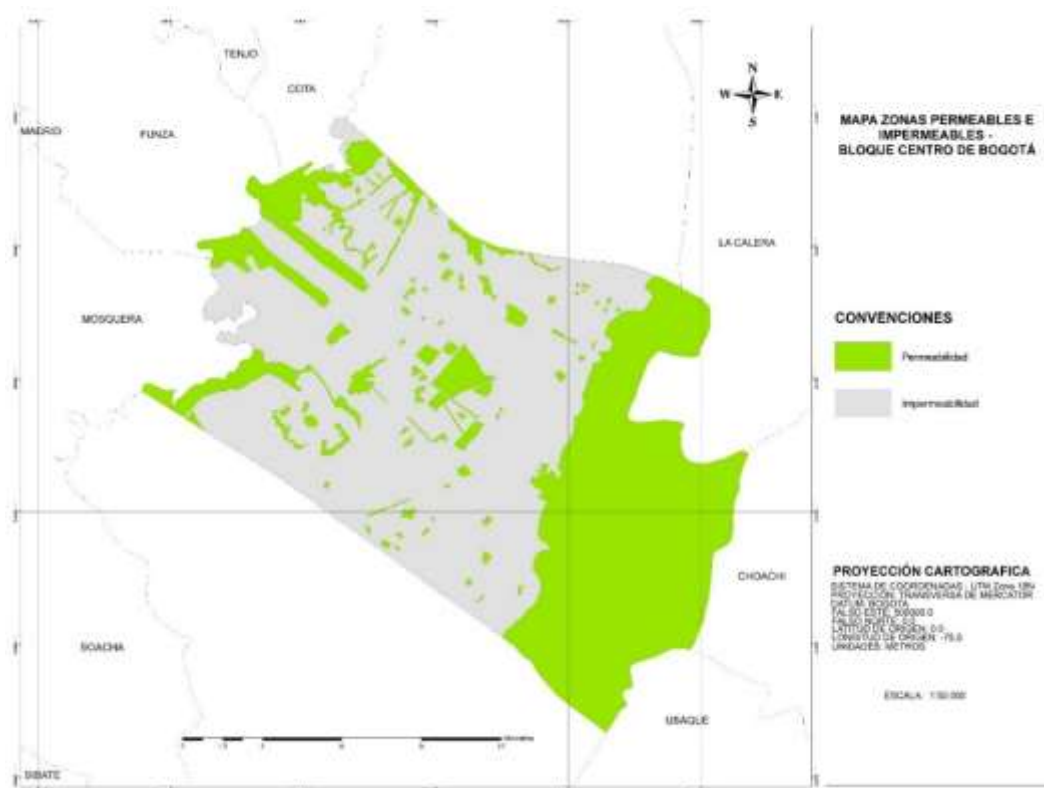
- **Análisis de la Zonificación Local de Áreas Permeables e Impermeables**

Las zonas permeables en el centro de Bogotá, se encuentran un poco limitadas en términos hidrogeológicos debido a la gran extensión de sectores que se encuentran cubiertos de calles, edificios, avenidas, grandes complejos residenciales, los cuales están contruidos con diversos materiales impermeables (hormigón, asfalto, etc.). Por otra parte, en los cerros orientales, se puede evidenciar una buena porción de área con cobertura vegetal, lo cual permite mayor infiltración del agua al subsuelo aumentando zonas de recarga.

A diferencia de la zona norte, que muestra un porcentaje más elevado de zonas permeables, la zona centro tiene un área aproximada de 15.108,53 Ha de zonas impermeables (58.61 % del área total) y 10.693,26 Ha de zonas permeables (41,39% del área total) de la zona de estudio (25.801,79 Ha).

Teniendo como referencia lo previamente mencionado, se puede interpretar que la zona central de Bogotá tiene un alto porcentaje de zonas impermeables, lo cual disminuye el potencial de recarga en gran medida y puede afectar directamente la oferta del recurso hídrico sub superficial. En la figura 15. se puede detallar la distribución espacial de estas zonas (ver anexo F):

Figura 15. Zonificación Local de Áreas Permeables e Impermeables



Fuente: Autores

- **Análisis de la Hidrología Local**

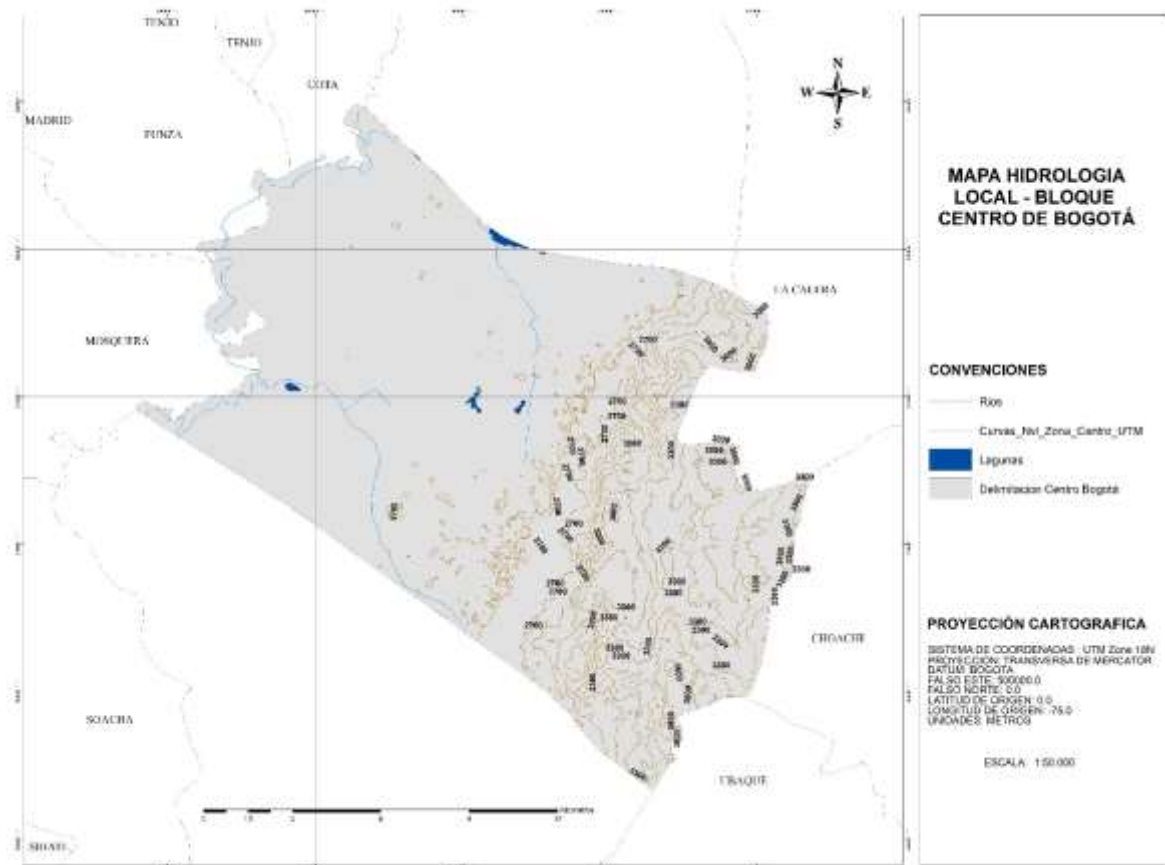
Como puede detallarse en la Figura 16. el cuerpo hídrico más notable en área de estudio, es el Río Bogotá. Este bordea completamente el límite occidental de la zona de estudio (ver Anexo G). Sin embargo, su relación con las aguas subterráneas de la zona es casi nula, ya que sus interacciones se dan únicamente sobre los 2600 metros sobre nivel del mar [7].

En el sector central de la zona de estudio, puede detallarse el Río Arzobispo el cual, al estar canalizado desde su paso por el Parque Nacional, posee una conductancia hidráulica con el sistema acuífero de carácter despreciable y no se toma en cuenta durante la modelación numérica. El río arzobispo desemboca sobre el humedal Juan Amarillo, cuya ubicación se encuentra en mayor medida sobre el bloque norte de la ciudad provocando así, que no sea objeto de estudio en este proyecto.

En el sector sur de la zona de estudio, puede apreciarse el Rio Fucha, el cual se presenta canalizado en gran parte de su recorrido, lo cual genera también que su interacción con las aguas subterráneas sea mínima, también despreciable.

A lo largo de la zona de estudio también existen cuerpos lenticos como el lago del parque Simón Bolívar, el lago del parque de los novios y el lago de la Florida, los cuales ayudan a la captación y retención de agua superficial, ya que alrededor de los perímetros de dichos lagos, existen zonas permeables, lo cual infiere que pueden ser zonas incluidas en el área efectiva de recarga del presente estudio. Sin embargo, debido a la baja profundidad de muchos de estos cuerpos, el agua que se logra captar tiene una relación muy limitada con el recurso hídrico sub superficial.

Figura 16. Hidrología Local



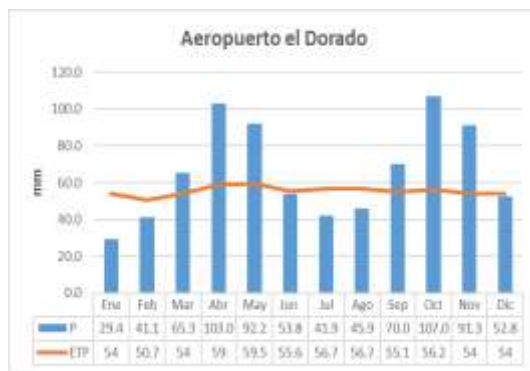
Fuente: Autores

- **Análisis de la Precipitación y Evapotranspiración Local**

Para llevar a cabo un análisis completo de la precipitación y la evapotranspiración local, como primer paso, se evalúan los datos climatológicos graficando los valores mensuales promedio multianuales, tanto de precipitación como de la ETP para posteriormente correlacionarlos, con el objetivo de tener una vista más amplia de su comportamiento a lo largo de la zona de estudio.

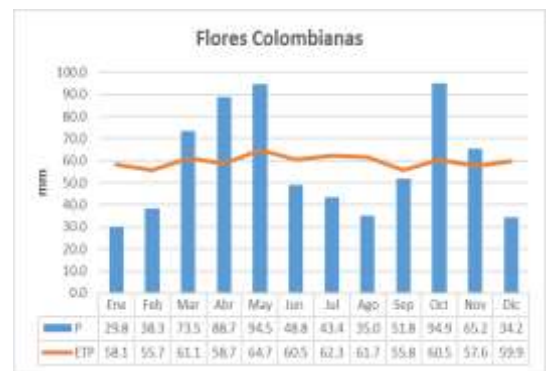
Dichas relaciones se pueden observar individualmente, según cada estación ubicada en el área de estudio, en las Figuras 17. – 26.

Figura 17. Comparación Precipitación (P) y ETP - Estación Aeropuerto El Dorado



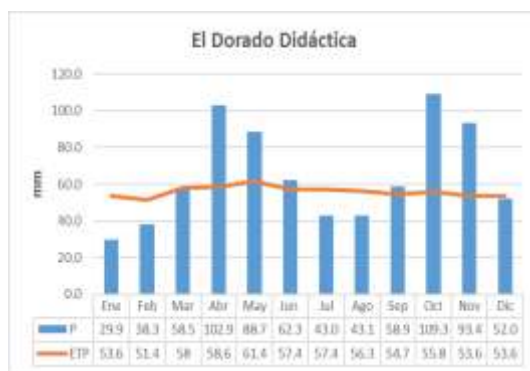
Fuente: Autores

Figura 19. Comparación Precipitación (P) y ETP - Estación Flores Colombianas



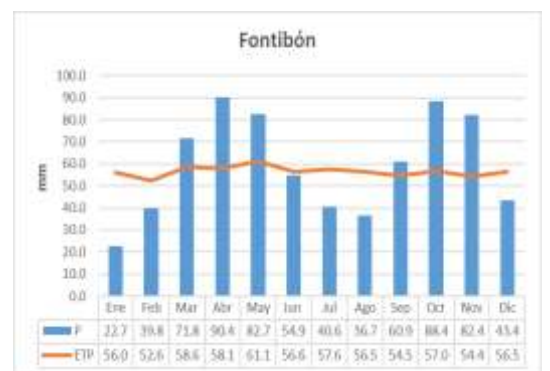
Fuente: Autores

Figura 18. Comparación Precipitación (P) y ETP - Estación El Dorado Didáctica



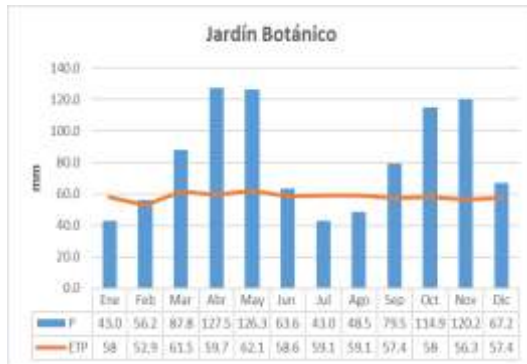
Fuente: Autores

Figura 20. Comparación Precipitación (P) y ETP - Estación Fontibón



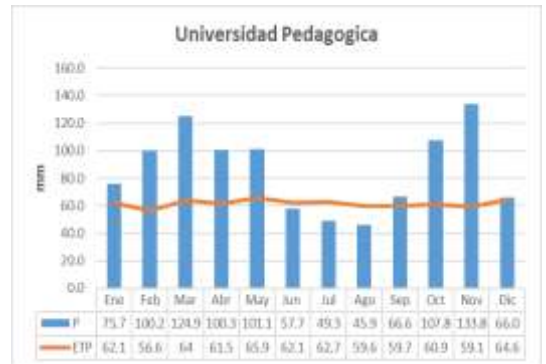
Fuente: Autores

Figura 21. Comparación Precipitación (P) y ETP - Estación Jardín Botánico



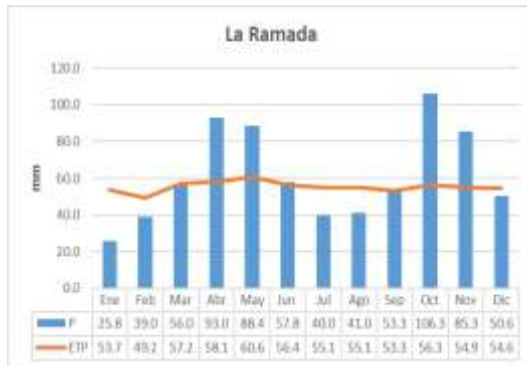
Fuente: Autores

Figura 24. Comparación Precipitación (P) y ETP - Estación Universidad Pedagógica



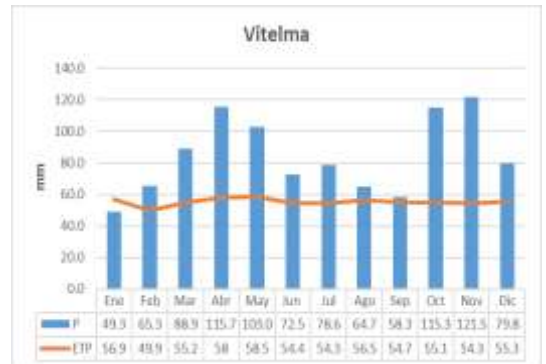
Fuente: Autores

Figura 22. Comparación Precipitación (P) y ETP - Estación La Ramada



Fuente: Autores

Figura 25. Comparación Precipitación (P) y ETP - Estación Vitelma



Fuente: Autores

Figura 23. Comparación Precipitación (P) y ETP - Estación Universidad Nacional



Fuente: Autores

Figura 26. Comparación Precipitación (P) y ETP - Estación Vivero Venado de Oro



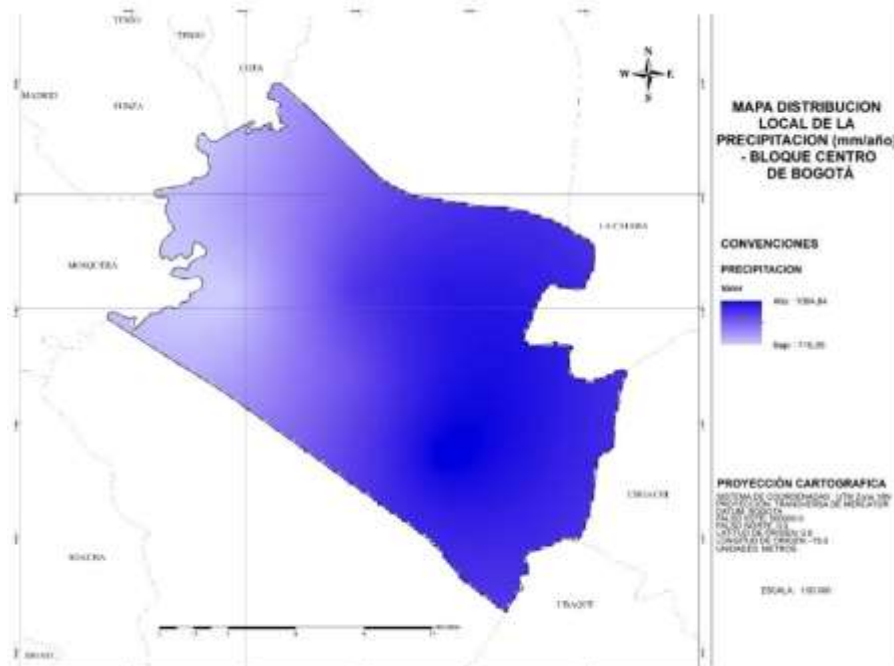
Fuente: Autores

Como se puede observar en las gráficas anteriores, en la zona de estudio predomina un comportamiento bimodal, en donde los meses de marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre presentan los mayores registros de precipitación respecto a los demás meses del año. Por su parte, la evapotranspiración a lo largo del año, no presenta muchas variaciones mayores a los 5 mm, lo cual permite inferir que presenta un comportamiento casi constante.

En la Figura 27. se observa que en la zona sureste (Cerros orientales), se registran los mayores valores de precipitación promedio multianual, lo que lleva a inferir que la precipitación en la zona de estudio es directamente proporcional a la altitud topográfica (Ver anexo H).

Adicionalmente, teniendo en cuenta la Figura 15. se interpreta que, en las zonas mayormente impermeables, existen valores bajos de precipitación promedio multianual, lo cual es un punto muy favorable para la infiltración en general, ya que la cantidad de agua que se deja de infiltrar, no tiene la misma representatividad como el agua que se podría dejar de infiltrar al sistema en caso de que las mismas zonas impermeables, se encontraran sobre los cerros orientales, por ejemplo.

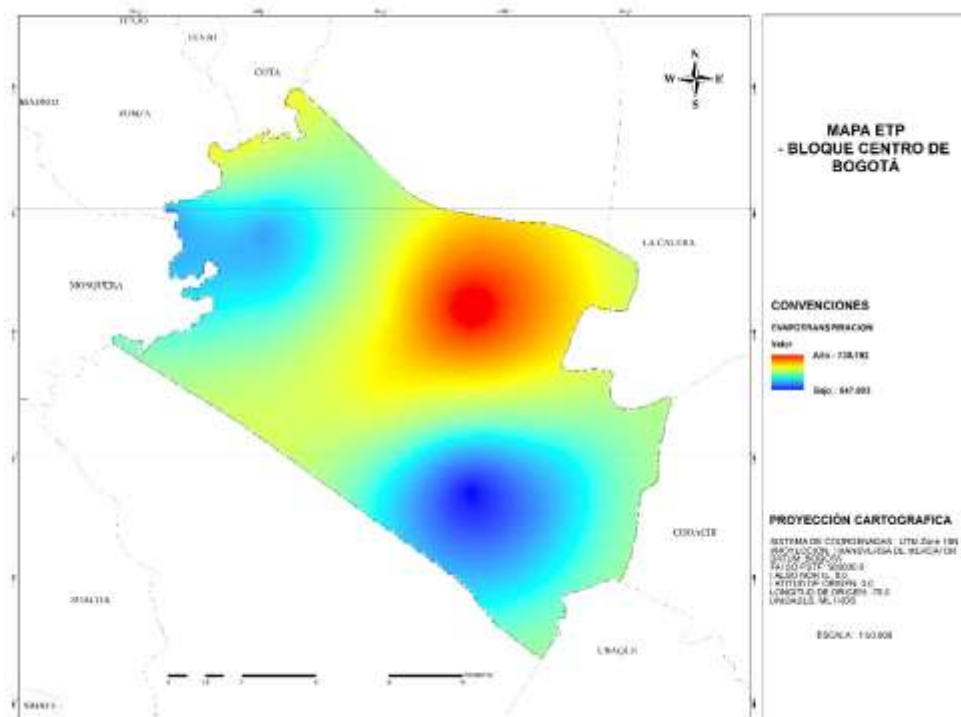
Figura 27. Distribución Local de la Precipitación



Fuente: Autores

Por otro lado, la evapotranspiración a pesar de tener un comportamiento similar al de la precipitación, en donde la altitud es directamente proporcional a los valores promedio multianuales, presenta una excepción a esta proporcionalidad en la sección noreste de la zona de estudio. En esta zona, la cual cubre el área norte de la localidad de chapinero, se presentan los mayores valores de evapotranspiración promedio multianual. Dicho comportamiento, puede detallarse en la Figura 28. (ver Anexo I):

Figura 28. Distribución Local de la Evapotranspiración Potencial



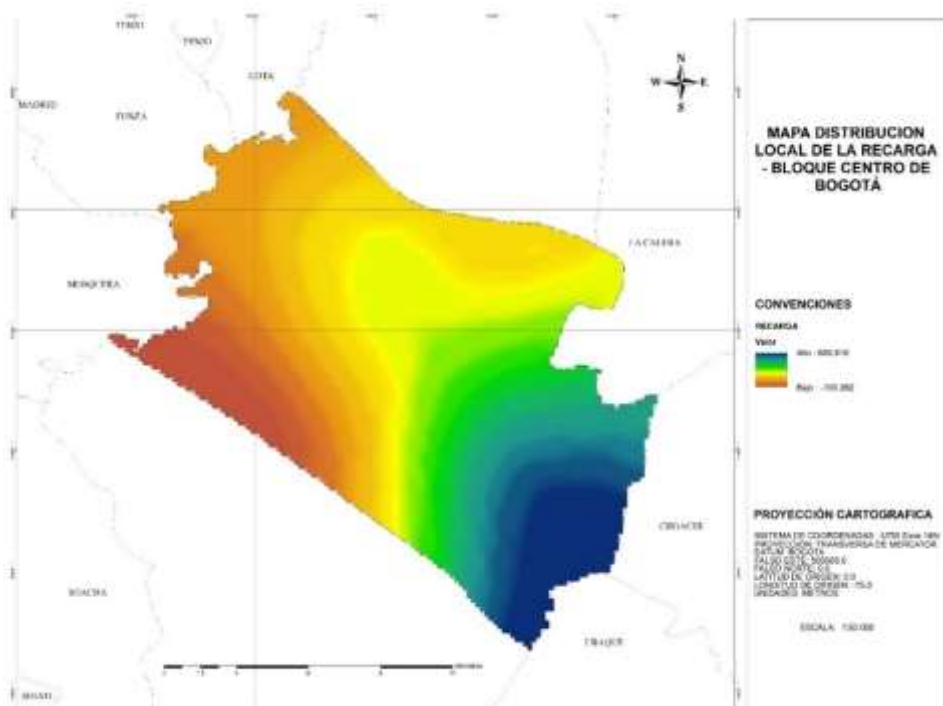
Fuente: Autores

- **Análisis de la Recarga Local**

La Recarga Local en la zona de estudio es bastante limitada, como puede observarse en la figura 29. ya que, en aproximadamente una tercera parte de la zona de estudio, el valor de la recarga es cero o incluso negativa, lo cual significa que el sistema de acuíferos, en un estado hipotético de aislamiento, perdería agua a través del sector sur occidental. Esto lleva a considerar que esta zona en específico, haría parte de una red de flujo regional de aguas subterráneas para suplir dicho déficit (ver Anexo J). Según el INGEOMINAS [8] y la SDA [7], este sector en específico recibe aguas del páramo de Sumapaz, lo cual confirma la suposición de que se trata de un flujo regional que se extiende más allá de los límites del área de interés.

Por otro lado, el sector sureste, donde se ubican los cerros orientales, posee los valores de recarga más altos de la zona, en el orden de los 500 mm/año – 600 mm/año, lo cual invita a reafirmar que los cerros orientales son de vital importancia, en términos de la recarga del sistema acuífero de la ciudad de Bogotá.

Figura 29. Distribución Local de Recarga



Fuente: Autores

- **Análisis del Modelo Conceptual de Töth**

Para el modelo de Töth, la variación espacial de todos los parámetros que se involucran en un modelo conceptual hidrogeológico, tienen que ver con tres elementos ambientales:

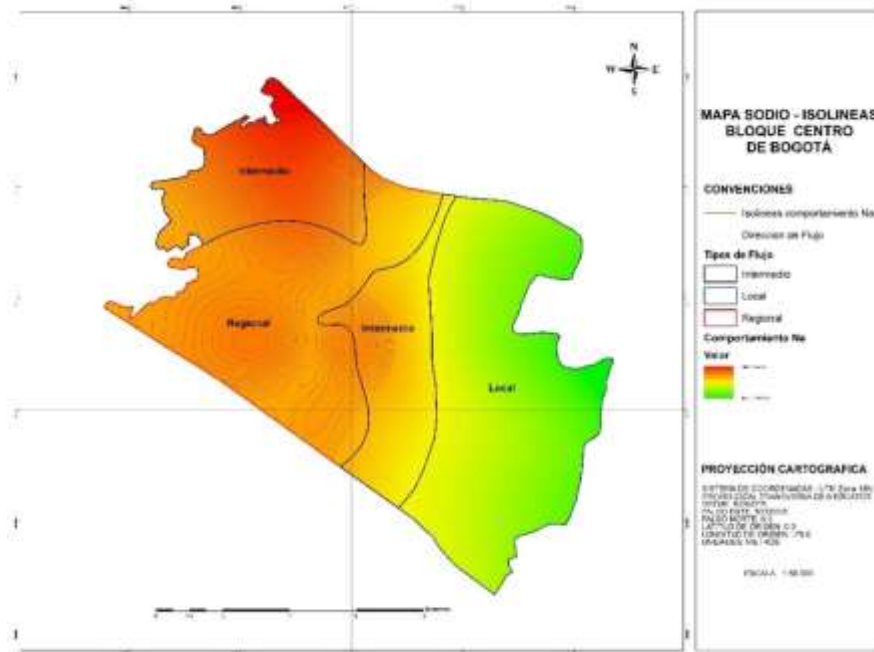
- Topografía
- Modelo Geológico
- Clima (precipitación y evaporación)

La topografía determina la distribución, movimiento, cantidad de energía y jerarquía del sistema de flujo; el clima determina la magnitud del agua presente en cada región y el Modelo Geológico establece las vías por donde circula el agua controlando la dirección y esquema de flujo, como también las características hidrogeoquímicas del agua en particular su edad y la reacción agua-roca.

Es entonces, como a partir de la hidrogeoquímica presente en la zona de estudio, se constituyeron los tipos de flujo de aguas subterráneas, teniendo como base la teoría de Töth y adicionalmente, utilizando la técnica de sobre posición de mapas o cartografías, dependiendo de los parámetros que se requieran evaluar. (Para conocer detalladamente el comportamiento de cada parámetro hidrogeoquímico, véase Anexo K – R).

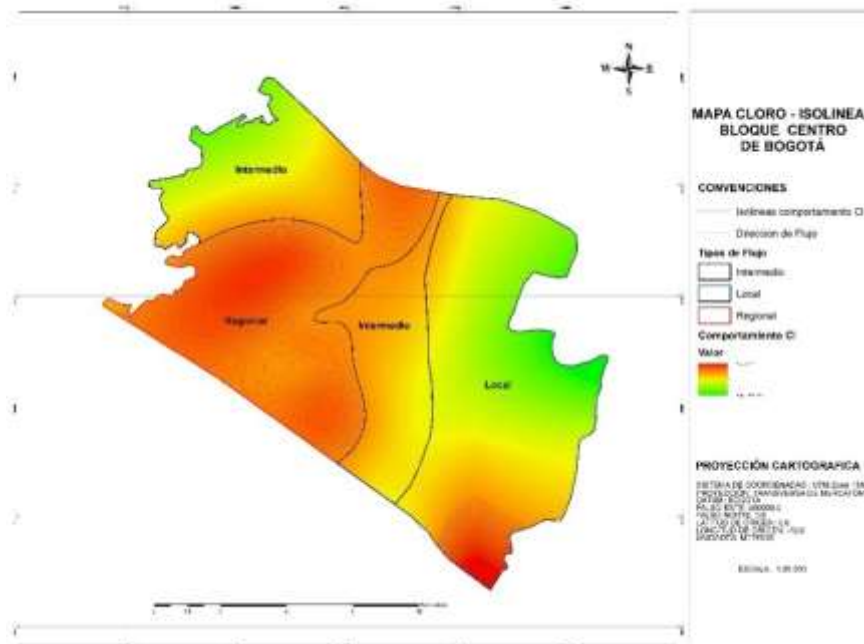
Con el fin de determinar los sistemas de flujo en el bloque centro de Bogotá, se escogen los parámetros de Cloro y Sodio, por ser parámetros muy representativos en el modelo conceptual de Töth. Como puede detallarse en la Figura 30., altos valores alcalinos en la zona de descarga, pertenecen a un flujo de tipo local. La presencia del cloro, por su parte, es más notoria hacia la zona oeste de la zona de estudio y representa una posible zona de descarga, de un flujo de tipo regional (ver Figura 31.):

Figura 30. Distribución Local de Sodio



Fuente: Autores

Figura 31. Distribución Local de Cloro

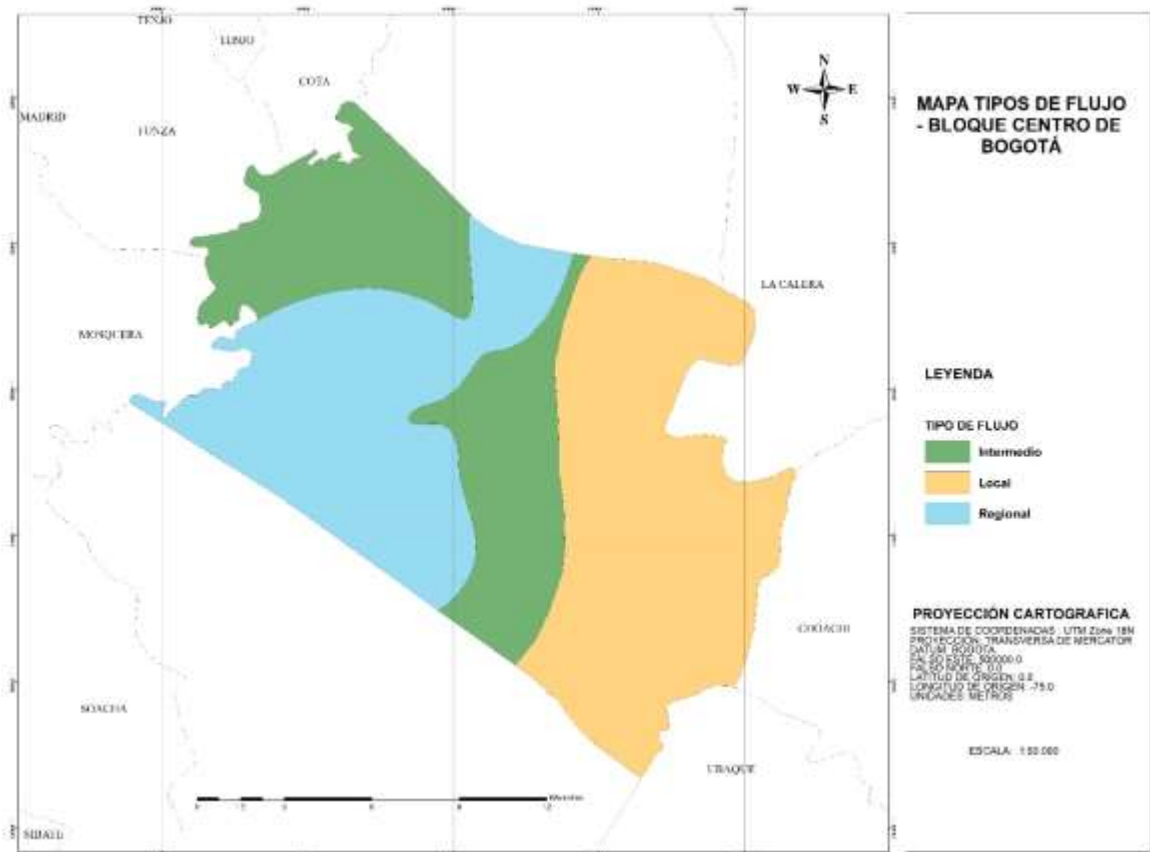


Fuente: Autores

Para procesos de definición de sistemas de flujo en la zona de recarga, el nivel freático que se encuentra a mayor profundidad, también tiene baja concentración de sodio. Esto se puede evidenciar en la Figura 30. donde claramente se presenta un bajo valor de concentración de Sodio (Na^+) en la zona de los cerros orientales. Al igual sucede con el parámetro de Cloro (ver Figura 31.), en donde zonas de bajas concentraciones representan también, las zonas de recarga.

Ahora bien, al sobreponer la información de estos parámetros (Cl^- y Na^+), estos brindan una estimación acertada del comportamiento de flujo subterráneo en el bloque centro de Bogotá. En la Figura 32. se pueden detallar los tipos de flujo en la zona de estudio resultantes de la implementación de este modelo (ver Anexo S):

Figura 32. Tipos de Flujo en el Área de Estudio Según Modelo Conceptual de Töth



Fuente: Autores

10.3. Fase III. Modelación en Modflow

Luego de preparar los datos de entrada, ajustar las condiciones de borde, correr el modelo en el *software* y ajustar, tanto las conductividades hidráulicas, como los coeficientes de almacenamiento de cada una de las capas definidas e ingresadas (ver Tabla 17.), se obtienen los siguientes datos observados y simulados (ver Tabla 18.):

Tabla 17. Valores Fijados para la Calibración Inicial del modelo Numérico

Estrato	Tipo	Conductividad Hidráulica (m / día)	Coefficiente de Almacenamiento
Depósitos No Consolidados	Libre	3	1E-05
Arenisca Dura Superior	Confinado	3	1E-05
Arenisca Labor y Tierna / Plaeners Superior	Confinado	5	1E-04
Sabana	Confinado	2.5	1E-05
Bogotá	Acuitardo	0.01	1E-06
Areniscas del Cacho	Confinado	0.1	1E-07
Guaduas	Acuitardo	0.02	1E-07
Arenisca Labor y Tierna / Plaeners Inferior	Confinado	1	1E-04
Arenisca Dura Inferior	Confinado	0.5	1E-05

Fuente: Autores

Tabla 18. Comparación Cabezas de Presión Observadas y Simuladas

Código del Pozo	Valor Observado (m)	Valor Simulado (m)	Residual (m)
Pz-08-0023	2500.861084	2515.551025	-14.6899414
Pz-09-0013	2553.539063	2551.714844	1.82421875
Pz-09-0015	2531.300049	2535.312744	-4.01269531
Pz-09-0019	2542.631104	2545.209961	-2.57885742
Pz-09-0040	2526.314941	2531.75293	-5.43798828
Pz-09-0041	2535.225098	2542.435303	-7.21020507
Pz-09-0043	2532.785889	2541.188477	-8.40258789
Pz-09-0044	2559.684082	2564.380859	-4.69677735
Pz-09-0047	2538.26001	2546.238525	-7.97851562
Pz-10-0003	2527	2542.27002	-15.2700195
Pz-10-0015	2554.23999	2569.539795	-15.2998047
Pz-10-0024	2551.696045	2556.635986	-4.93994141
Pz-10-0027	2532.010986	2541.476318	-9.46533203

Fuente: Autores

- **Calibración**

Los valores arrojados por cada una de las métricas de desempeño se pueden consultar en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados Métricas de Desempeño en Calibración

Métrica	Clase	Valor
Error Máximo Absoluto (AME)	Absoluto	15.30 m
Diferencia Pico (PDIFF)	Absoluto	-9.86 m
Error Promedio Cuadrático (RMSE)	Absoluto	9.03 m
Error Absoluto Relativo (RAE)	Relativo	0.67
Porcentaje Error en el Pico (PEP)	Relativo	- 0.385 %
Error Absoluto Promedio Relativo (MARE)	Relativo	0.28705 %
Mediana del porcentaje de error absoluto (MdAPE)	Relativo	0.2844 %

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta la Tabla 19., se determinó que el modelo numérico se ha logrado calibrar lo suficiente para obtener datos fiables, pues el error cuadrático promedio, el cual es una medida ampliamente empleada por varios sectores de investigación y modelación, tiene un valor inferior a 10 m. Así mismo, se determina que la diferencia más alta entre los valores simulados y observados es de 15.30 m. Lo cual, si se compara con el espesor que puede llegar a tener una formación geológica, es un valor bastante aceptable.

De igual manera, en base a los parámetros relativos, se determinó fiabilidad en el modelo numérico, gracias a la cercanía que poseen estos valores a 0% (Ninguna de estas métricas supera el 1%). Adicionalmente, a través del porcentaje de error

en el pico (PEP), se identifica que el modelo esta sobreestimado debido al valor negativo resultante.

- **Validación**

Para llevar a cabo el proceso de validación, se seleccionaron las cabezas de presión reportadas para los años 2002 y 2007 debido a que, en dichos años, ninguno de los pozos presenta ausencia de información. Esto resulta de vital importancia ya que, el proceso de validación requiere de cierta consistencia en los datos a ingresar, además de que los mismos deben ser en lo posible, completamente diferentes a los empleados para la calibración del modelo. En la Tabla 20. se pueden observar dichos valores:

Tabla 20. Cabezas de Presión Empleadas para la Validación del Modelo Numérico

Pozo	Cabeza de Presión (m) Año 2002	Cabeza de Presión (m) Año 2007
Pz-08-0023	2498.89	2492.46
Pz-09-0013	2553.31	2552.57
Pz-09-0015	2532.15	2530.75
Pz-09-0019	2542.57	2542.37
Pz-09-0040	2526.37	2526.15
Pz-09-0041	2535.03	2535.37
Pz-09-0043	2532.82	2532.48
Pz-09-0044	2558.20	2561.10
Pz-09-0047	2536.70	2538.68
Pz-10-0003	2527.50	2526.73
Pz-10-0015	2547.25	2548.82
Pz-10-0024	2552.19	2552.50
Pz-10-0027	2531.80	2534.49

Fuente: Autores

Seguida a la selección de datos, estos se ingresan al *software* y se ejecuta la modelación numérica sin cambiar ninguno de los valores consignados en la Tabla 17. Esto se realiza con el objeto de observar cómo se ven modificadas las métricas de desempeño, frente a este nuevo cambio de valores de entrada (Valores Observados). En la Tabla 21. se pueden detallar los resultados de dicho proceso:

Tabla 21. Resultados Métricas de Desempeño en Validación

Métrica	Clase	Año 2002	Año 2007
Error Máximo Absoluto (AME)	Absoluto	16.79 m	16.83 m
Diferencia Pico (PDIFF)	Absoluto	-5.84 m	-4.23 m
Error Promedio Cuadrático (RMSE)	Absoluto	9.23 m	9.33 m
Error Absoluto Relativo (RAE)	Relativo	0.73	0.66
Porcentaje Error en el Pico (PEP)	Relativo	- 0.23 %	-0.165 %
Error Absoluto Promedio Relativo (MARE)	Relativo	0.2909 %	0.2885 %
Mediana del porcentaje de error absoluto (MdAPE)	Relativo	0. 2824 %	0.2785 %

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta la Tabla 21. se puede afirmar que la calibración previamente realizada fue exitosa pues, al ejecutar una doble validación de la misma, el error promedio cuadrático se mantuvo inferior a los 10 m sin necesidad de reajustar los

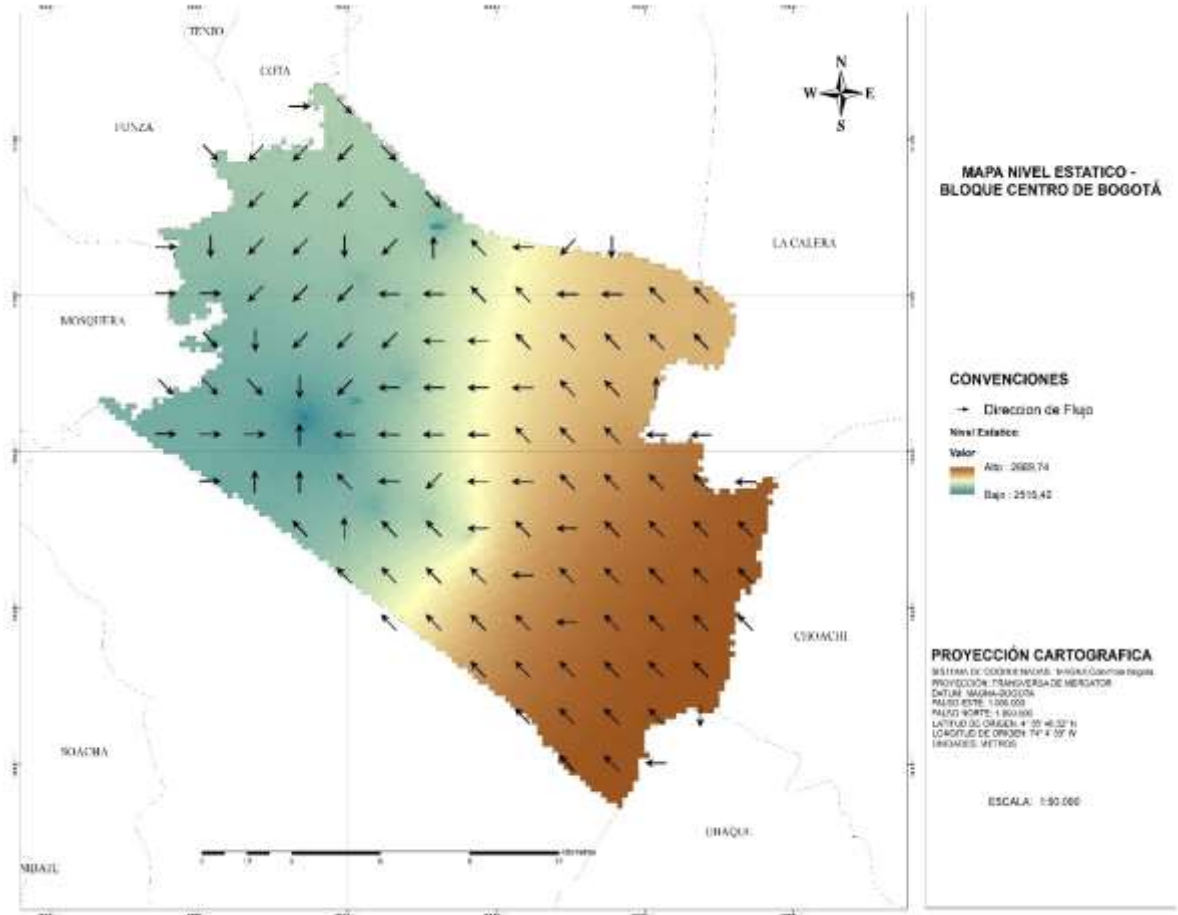
valores consignados en la Tabla 17. De igual forma, los errores relativos se mantuvieron inferiores al 1%. Por otra parte, a partir de la interpretación de las métricas de desempeño PDIFF y PEP, se determina que la sobreestimación del modelo ejecutado continúa existiendo, a pesar de ser menor respecto a la resultante de la calibración inicial.

Una vez finalizado el proceso de calibración y validación del modelo, se infiere que los errores resultantes de la simulación parten de la poca consistencia temporal de los datos, tanto de los pozos concesionados como de los datos climatológicos. De igual manera, en cuanto a la litología, esta no se reproduce al 100% respecto a la real, ya que se combinan ciertos estratos para favorecer la modelación y se excluyen por completo las fallas estructurales existentes en la litología de la zona de estudio.

Finalmente, el modelo numérico reporta que al sistema de aguas subterráneas en la zona centro de Bogotá, ingresan 1.6163 m^3 de agua por segundo y anualmente estarían ingresando al sistema $51'003.664 \text{ m}^3$ de agua. Así mismo, detalla que no existe una relación significativa entre las aguas subterráneas y superficiales ya que, durante la calibración, entre más se reduce la conductancia hidráulica existente entre los cuerpos de agua superficiales y el sistema acuífero, más se disminuye la discrepancia general del modelo.

Respecto a la distribución espacial de la tabla de agua, puede observarse en la Figura 33. (ver también Anexo T) que los niveles estáticos más altos se ubican sobre los cerros orientales. Esto, junto al *shape* generado para ilustrar la dirección de flujo, permite determinar que los cerros orientales, son el punto inicial del flujo de agua subterránea en la zona, y que el flujo subterráneo confluye hacia el sur occidente, misma zona donde se observaba en la Figura 29. que existían valores de recarga negativos. Esto podría ser un indicativo anticipado de que, este sector sur oriental, es una zona de descarga bastante importante dentro de la zona de estudio del presente proyecto.

Figura 33. Tabla de Agua y Dirección del Flujo de Agua Subterránea



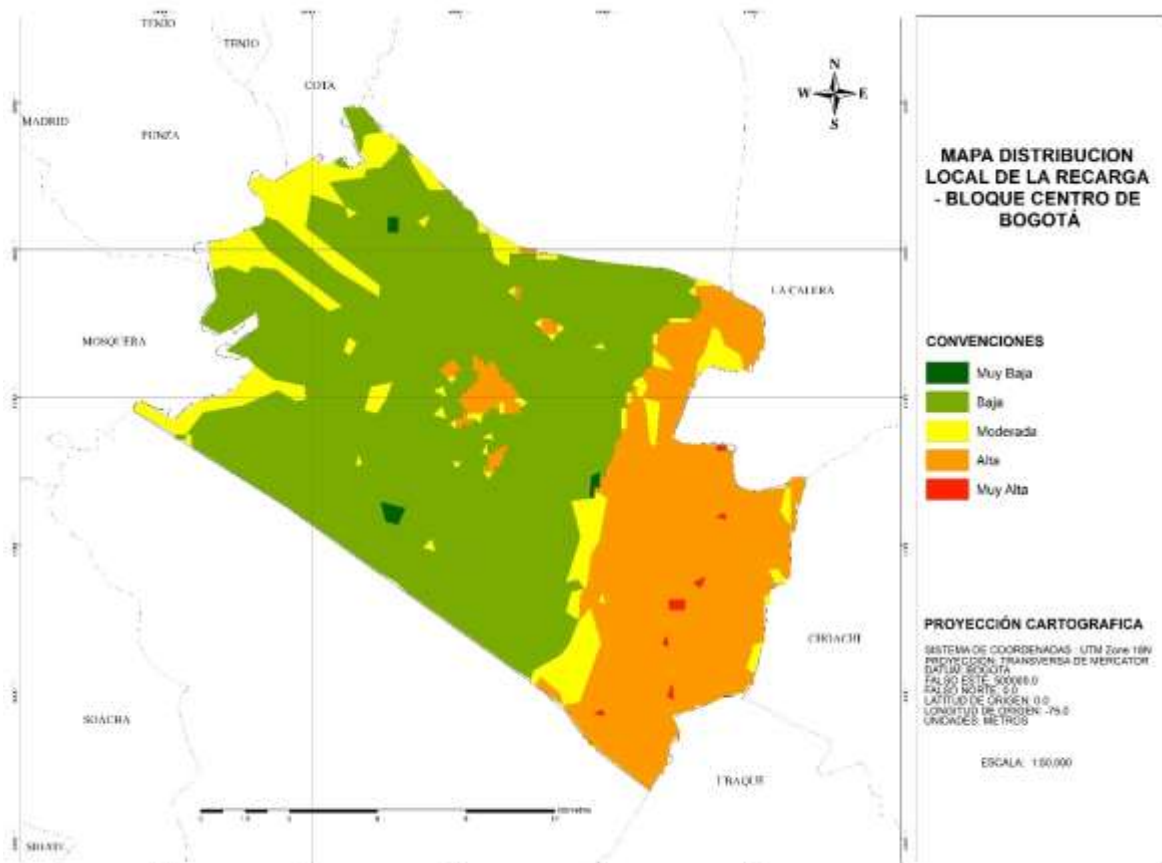
Fuente: Autores

10.4. Fase IV. Correlación de Parámetros

- **Análisis Zonificación del Potencial de Recarga**

Luego del proceso de sobre posicionar mapas y operar los *Raster* generados con la herramienta "*Raster Calculator*", se determina que los cerros orientales son el área más importante dentro de la zona de estudio, en términos de recarga. Por otra parte, la zona urbana, como se venía informando en los anteriores numerales, posee muy poco potencial para la infiltración de aguas subterráneas con excepción, del sector en donde se ubica el parque Simón Bolívar, el cual favorece la infiltración del agua debido a su gran área de zonas permeables. Dicha zonificación puede detallarse en la Figura 34. o en el Anexo U.

Figura 34. Zonificación del Potencial de Recarga



Fuente: Autores

En la Tabla 22. se puede detallar el área total de cada una de las zonas representadas en la Figura 34.

Tabla 22. Áreas Resultantes en la Zonificación del Potencial de Recarga

Potencial de Recarga	Área Ha
Muy Alta	52.878852
Alta	7008.66885
Moderada	3092.928222
Baja	15567.2761
Muy Baja	80.039526

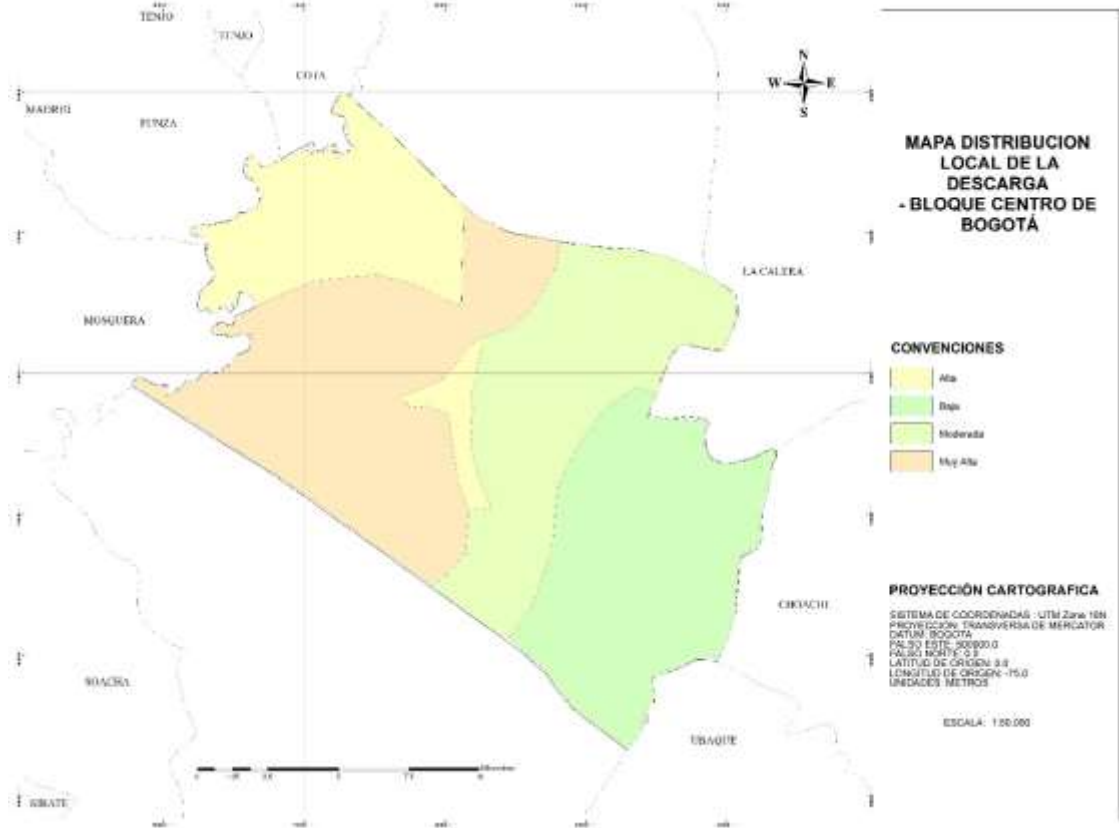
Fuente: Autores

Cabe agregar (teniendo como referencia la Tabla 22.) que la zona, cuyo potencial de recarga es “Moderada”, puede ser de especial importancia hidrogeológica debido a su gran extensión la cual, a pesar de filtrar menos agua en comparación con las zonas de alto potencial, representaría un área de aporte hídrico considerable al sistema acuífero, en términos globales.

- **Análisis Zonificación Potencial de Descarga**

Como se puede observar en la Figura 35. en la zona de estudio existe un área extensa cuyo potencial de descarga es “Muy Alta” y “Alta” (ver Anexo V). En términos de extracción y uso de aguas subterráneas, esto resulta bastante beneficioso para la población, ya que se pueden abastecer de dicho recurso sub superficial sin afectar de manera crítica las reservas contenidas en el sistema acuífero, haciendo de esta actividad, algo sostenible a lo largo del tiempo. De igual manera, resulta oportuno el aprovechamiento del agua en estos sectores, ya que se trata del punto de descarga de un sistema de flujo regional, lo cual minimiza la dependencia de la oferta del recurso hídrico sub superficial, a los cambios que se puedan presentar en las condiciones climáticas locales.

Figura 35. Zonificación del Potencial de Descarga



Fuente: Autores

En la Tabla 23. se puede detallar el área total de cada una de las zonas representadas en la Figura 35.

Tabla 23. Áreas Resultantes en la Zonificación del Potencial de Descarga

Potencial de Descarga	Área Ha
Muy Alta	8062.770359
Alta	4709.628489
Moderada	6204.030965
Baja	6825.361689

11. CONCLUSIONES

- La elección de parámetros hidrogeoquímicos e hidráulicos para la construcción de la línea base de este proyecto, resulta precisa para la síntesis de los datos que buscan alimentar el modelo numérico y confirmar el modelo conceptual de la SDA.
- De acuerdo a los análisis, valoración y correlación realizada en las cartografías elaboradas a partir de la línea base, se logran identificar los sistemas de flujo presentes en la zona de estudio, confirmando un flujo local hacia el sector oriental de la zona de estudio (cerros orientales) y un flujo regional e intermedio hacia el sector occidental (zona mayormente urbana).
- El modelo hidrogeológico numérico realizado en el Software ModelMuse® obtiene un error promedio cuadrático (RMSE) entre los 9.03 m y 9.33 m. Esto demuestra que fue posible la calibración y validación del modelo numérico logrando así, que este sea apto para su posterior uso en la simulación de diferentes escenarios hidrogeológicos.
- Se determina la importancia del uso en el campo de la hidrogeología, de herramientas tecnológicas como Modflow y su plataforma grafica ModelMuse®, ya que estas son de gran utilidad en la gestión de aguas subterráneas otorgando una visión más flexible de las dinámicas de flujo subterráneo, lo cual resulta en una herramienta imprescindible para la toma de decisiones en los procesos de gestión del recurso hídrico en la capital.
- Se determinan los cerros orientales como la zona más importante hidrogeológicamente en términos de recarga, contando con un área efectiva de más de 7.000 hectáreas aproximadamente.
- Se demuestra que la existencia de áreas no urbanizadas, como el Parque Simón Bolívar, es crucial dentro de los planes urbanísticos de una ciudad, ya que estos espacios cumplen una función significativa en términos de recarga.

- Cerca del 68% (13 de 19) de los pozos concesionados utilizados en este documento, se encuentran ubicados sobre en la zona de descarga perteneciente al sistema de flujo regional. En consecuencia, la extracción del recurso hídrico sub superficial que estos efectúan, no afectará el volumen almacenado en los acuíferos presentes en la zona. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en la capital existen más de 6.000 pozos concesionados, los cuales no están ubicados en su totalidad sobre zonas de descarga, afectando gravemente la oferta del recurso.
- Actualmente, el área de los cerros orientales se está viendo afectada por la generación de nuevos proyectos urbanísticos, panorama que afectaría de manera irreversible los sistemas de flujo subterráneo existentes en la zona de estudio.
- Existe una fuerte intervención antrópica, de carácter negativo, sobre la distribución y el transporte del agua superficial a lo largo de la ciudad, generando graves limitaciones entre los ríos y el subsuelo para llevar a cabo el proceso de almacenamiento del recurso hídrico subterráneo. Una de las obras existentes más negativas para este proceso, es el sistema de captación de aguas lluvia, el cual consiste en un sistema mixto que termina por direccionar estas aguas por los sistemas de alcantarillado, lo cual reduce la infiltración efectiva.

12. RECOMENDACIONES

- Se recomienda, para la realización del modelo hidrogeológico numérico del bloque sur, tener en cuenta la metodología y los resultados arrojados por esta investigación y por la investigación realizada en el bloque norte de la ciudad. Además de esto, se recomienda realizar dicha modelación incluyendo el páramo de Sumapaz en la delimitación del área de estudio.
- Se aconseja crear una red de monitoreo distrital para los pozos concesionados, con el fin de medir en tiempo real y de forma fiable, la hidrogeoquímica de la capital.
- Gran parte de los pozos concesionados en la ciudad, no contienen mucha de la información básica para generar una aproximación hidrogeoquímica confiable, por lo que se recomienda a la autoridad ambiental, ser más rigurosa con el seguimiento y monitoreo a los pozos que se encuentran actualmente en funcionamiento.
- Es recomendable usar la cartografía generada en este estudio, tanto en términos de zonificación de recarga como de descarga, para la posterior concesión de pozos en la ciudad de Bogotá D.C. y como punto de referencia para futuras obras urbanísticas.
- Se recomienda para próximas investigaciones de carácter similar a este estudio, trabajar con estaciones climatológicas y pozos concesionados cuya distribución sobre el área de estudio sea más uniforme. Esto con el fin de obtener mejores resultados al momento de calibrar el modelo numérico.
- Debido a las pérdidas ocasionadas por diversos factores en el sistema de acueducto público de la ciudad, existe una cantidad determinada de agua que termina por infiltrarse al sistema acuífero de Bogotá. Se aconseja entonces, para futuras investigaciones, añadir dicha infiltración a la infiltración global de la zona de estudio.
- Procesos complementarios como la utilización de modelos que evalúen el ciclo hidrológico urbano y/o herramientas de análisis de evaluación de suelo y agua, potencializan resultados más sólidos.

13. BIBLIOGRAFÍA

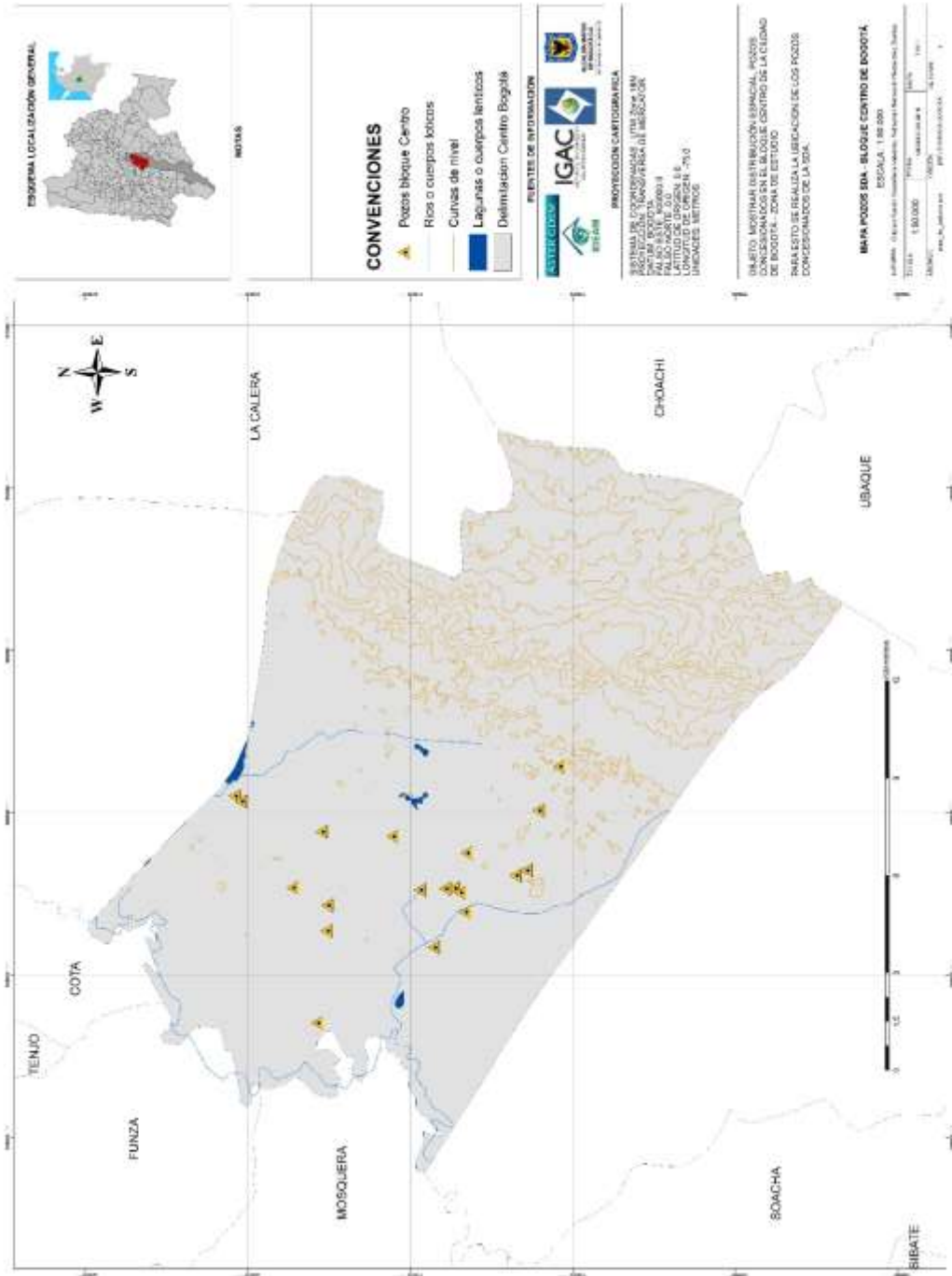
- [1] *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 1640. Colombia: 2012.*
- [2] *J. Sánchez, "Conceptos fundamentales de hidrogeología," Universidad de Salamanca, Salamanca, 2014.*
- [3] *PHI- UNESCO, Balance Hídrico Dinámico E Integrado De El Salvador. (Segunda Edición ed.) Montevideo: PHI - LAC, 2006.*
- [4] (2018). *El Ciclo Del Agua (The Water Cycle). Available: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>.*
- [5] *P. E. Martínez Alfaro, P. Martínez Santos and S. Castaño, Fundamentos De Hidrogeología. Madrid: Mundi-Prensa, 2006.*
- [6] *J. Sánchez, "Evolución geoquímica de las aguas subterráneas," Universidad de Salamanca, Salamanca, 2016.*
- [7] *J. Veloza, Sistema De Modelamiento Hidrogeológico Del Distrito Capital Bogotá Bogotá, D.C.: SDA, 2012.*
- [8] *INGEOMINAS, Modelo Hidrogeológico Conceptual De La Sabana De Bogotá. Bogotá D.C.: Subdirección recursos del subsuelo, INGEOMINAS, 2002.*
- [9] *T. Van Der Hammen and Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Plan Ambiental De La Cuenca Alta Del Río Bogotá. Bogotá, D.C.: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 1998.*
- [10] *M. Bedoya et al, "Modelo Numérico del Acuífero de la Isla de San Andrés, Colombia," Universidad Nacional de Colombia, Medellín, noviembre, 2010.*
- [11] *S. Ramírez and S. Ledesma, "Evaluación Del Modelo Hidrogeológico Conceptual Del Bloque Norte De La Ciudad De Bogotá, a Partir De Las Herramientas Visual Modflow Y Sistemas De Flujo De Tóth.", Universidad de La Salle, 2016.*
- [12] *J. Cruces and L. Martínez, "Modelos Matemáticos en Hidrogeología," EOI Escuela de Negocios, Madrid, 2007.*
- [13] *T. Betancur and C. Palacio, "La Modelación Numérica como Herramienta para la Exploración Hidrogeológica y Construcción de Modelos Conceptuales," Universidad de Antioquia, Medellín, 2009.*
- [14] *Defensoría del Pueblo, "Diagnóstico Sobre la Calidad del Agua para el Consumo Humano en Colombia, en el Marco del Derecho Humano al agua," Defensoría del Pueblo, Bogotá, D.C., 2006.*
- [15] *A. Lobo-Guerrero, "Geología e hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana," in VII Jornadas Geotécnicas De La Ingeniería De Colombia, 1992.*
- [16] *J. Tóth, Gravitational Systems of Groundwater. (1º ed.) Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2009.*

- [17] J. J. Ordoñez, "Cartilla técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos," Sociedad Geográfica de Lima y Foro Peruano para el Agua (GWP Perú), Lima, 2012.
- [18] E. Molina-Navarro et al, "Hydrogeology and hydrogeochemistry at a site of strategic importance: the Pareja Limno-reservoir drainage basin (Guadalajara, central Spain)," *Hydrogeol. J.*, vol. 22, (5), pp. 1115-1129, 2014.
- [19] A. Pulido, *Nociones De Hidrogeología Para Ambientólogos*. Almería, ES: Editorial Universidad de Almería, 2014.
- [20] M. Beyer et al, "Use of hydrochemistry as a standalone and complementary groundwater age tracer," *Journal of Hydrology*, vol. 543, Part A, pp. 127-144, 2016
- [21] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, *Manual De Agua Subterránea*. (Primera Edición ed.) Montevideo: 2012.
- [22] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible and IDEAM, *Principios Básicos Para El Conocimiento Y Monitoreo De Las Aguas Subterráneas En Colombia*. Bogotá, D.C.: IDEAM, 2015.
- [23] R. D. Beckie, "Groundwater," in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* Anonymous Elsevier, 2013.
- [24] M. Fernández, "Hidrogeología Aplicada con Aspectos Ambientales," in *Anonymous La Habana, CU: Editorial Universitaria*, 2012, pp. 94-118.
- [25] J. López et al, *Las Aguas Subterráneas: Un Recurso Natural Del Subsuelo*. (4ta Edición ed.) Madrid: Instituto Geológico y minero de España, 2009.
- [26] J. Gómez, "Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica E Isótopos, Como Herramientas Para Definir Un Modelo Conceptual Hidrogeológico, Caso De Aplicación: Acuífero Costero Del Municipio De Turbo.", *Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín, Medellín*, 2009.
- [27] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, *Plan De Manejo Ambiental De Aguas Subterráneas En La Sabana De Bogotá Y Zona Crítica*. (Primera Edición ed.) Bogotá, D.C.: CAR, 2008.
- [28] N. Vargas, "Zonas Hidrogeológicas Homogéneas de Colombia," IDEAM, Bogotá D.C., 2009.
- [29] (2014). *Zonificación Hidrogeológica*. Available: http://www.ideam.gov.co/documents/14691/15142/zonificacion_hidrogeologica_32UnidadesHidroestratigraficasColombia+%5Bmapa%5D.JPG/16ffda1c-c102-4229-8e9e-854555f2132f?t=1423323877335.
- [30] N. Vargas et al, *Aguas Subterráneas En Colombia: Una Visión General*. Bogotá, D.C.: IDEAM, 2013.
- [31] Ministerio del Medio Ambiente de Chile, *Guía Para El Uso De Modelos De Aguas Subterráneas En El Seia*. Servicio de Evaluación Ambiental, SEA, 2012.
- [32] L. Donado, "Análisis de Pruebas de Bombeo Mediante la Prueba Diagnóstico," in *XI Congreso Latinoamericano*, 2012.
- [33] (2018). *Modelos Hidrogeológicos en FEFLOW*. Available: <https://blog.geomodelr.com/modelo-hidrogeologico-fallas-modflow/>.

- [34] J. Tóth, "A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada," *Journal of Geophysical Research*, vol. 11, (67), 1962. Available: https://hydro.geo.ua.edu/gw_modeling/Toth_1962.pdf
- [35] A. Harbaugh, *MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process USGS*, 2005.
- [36] J. Cruces de Abia, *Modelo Modflow*. Madrid: Escuela de negocios, 2007.
- [37] Yu-Pin Lin et al, "Groundwater Simulations and Uncertainty Analysis Using MODFLOW and Geostatistical Approach with Conditioning Multi-Aquifer Spatial Covariance," *Water* (20734441), vol. 9, (3), pp. 1-17, 2017.
- [38] K. Moharir, C. Pande and S. Patil, "Inverse modelling of aquifer parameters in basaltic rock with the help of pumping test method using MODFLOW software," *Geoscience Frontiers*, 2017.
- [39] M. Chen, A. Izady and O. A. Abdalla, "An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model," *Journal of Hydrology*, vol. 544, pp. 591-603, 2017.
- [40] L. Surinaidu et al, "Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal Mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India," *Water Resources and Industry*, vol. 7–8, pp. 49-65, 2014.
- [41] O. Schmitz et al, "Linking external components to a spatio-temporal modelling framework: Coupling MODFLOW and PCRaster," *Environmental Modelling & Software*, vol. 24, (9), pp. 1088-1099, 2009.
- [42] F. Lachaal et al, "Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Zéramdine–Béni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia)," *Comput. Geosci.*, vol. 48, pp. 187-198, 2012.
- [43] C. San Juan and K. E. Kolm, "Conceptualization, characterization and numerical modeling of the Jackson Hole alluvial aquifer using ARC/INFO and MODFLOW," *Engineering Geology*, vol. 42, (2), pp. 119-137, 1996.
- [44] X. Xu et al, "Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas," *Journal of Hydrology*, vol. 412–413, pp. 170-181, 2012.
- [45] D. Jones et al, "A cloud-based MODFLOW service for aquifer management decision support," *Computers & Geosciences*, vol. 78, pp. 81-87, 2015.
- [46] R. Maheswaran et al, "Regional scale groundwater modelling study for Ganga River basin," *Journal of Hydrology*, vol. 541, Part B, pp. 727-741, 2016.
- [47] V. Mirlas, "Assessing soil salinity hazard in cultivated areas using MODFLOW model and GIS tools: A case study from the Jezre'el Valley, Israel," *Agricultural Water Management*, vol. 109, pp. 144, 2012. Available: <http://www.sciencedirect.com/bdatos.usantotomas.edu.co:2048/science/article/pii/S0378377412000819>. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.03.003.
- [48] C. Dawson, R. Abrahart and L. See, "HydroTest: A Web-Based Toolbox of Evaluation Metrics for the Standardized Assessment of Hydrological Forecasts," *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, pp. 5-9, 2006. Available: <http://www.hydrotest.org.uk>.

14. ANEXOS

Anexo A. Distribución Espacial de Pozos Concesionados Empleados



Fuente: Autores

Código	Nombre Pozo	Profundidad	Cota (m.s.n.m.)	Cabeza De Presión (m)	Norte	Este	Abatimiento (m)	Caudal Extracción (LPS)
pz-08-0023	Lafayette 1	200	2552	2500.861	105871.01	93901.46	11.168	23.200
pz-09-0013	Textiles Romanos	80	2581	2553.539	105524.09	957099.69	14.548	1.103
pz-09-0015	Mobil Terminal De Transportes	83	2553	2531.300	106293.796	95675.425	10.708	0.738
pz-09-0019	Flota La Macarena	140	2560	2542.631	109464.10	915798.38	9.822	0.991
pz-09-0040	Indega Panamco Planta Norte Gases	529	2554	2517.453	109170.91	94412.88	11.260	24.713
pz-09-0041	Protela S.A	523	2573	2540.008	109149.07	95204.40	21.039	17.696
pz-09-0043	Manufacturas Eliot No. 1	226	2564	2525.666	105240.19	95724.14	16.059	18.922
pz-09-0044	Manufacturas Eliot No. 2	239	2565	2523.884	105058.01	95591.92	19.216	19.562
pz-09-0047	Acabados Informales Y Lavados S.A	218	2563	2526.315	104899.84	94993.23	16.905	5.510
pz-10-0003	Alimentos El Jardín	70	2553	2535.225	110213.00	957469.63	15.880	1.414
pz-10-0015	Compensar	201	2557	2532.786	107136.85	97326.21	5.399	2.680
pz-10-0024	Autolavado El Pastuso	80	2581	2559.684	109323.75	974677.17	9.320	0.761
pz-10-0027	Cootransniza Ltda.	102	2551	2538.260	111996.61	98576.41	6.344	1.522
pz-10-0028	Serviautos La Estrella	92	2551	2527.000	111798.86	98409.15	14.000	0.850
pz-14-0004	Hermanas Dominicás Presentación	180	2587	2554.240	102000.00	994800.00	8.128	0.917
pz-16-0002	Gaseosas Colombiana No 2	185	2581	2551.696	102641.92	98123.07	2.974	20.408
pz-16-0003	Gaseosas Lux No. 1	192	2579	2532.011	103013.05	96279.69	25.229	10.109
pz-16-0029	Colortex	250	2579	2538.013	103341.28	96116.07	25.828	8.000
pz-16-0036	Lime	255	2568	2529.073	104855.18	968146.32	6.648	3.734

Fuente: Autores

Anexo C. (Continuación) Información Detallada Pozos Concesionados

Código	Nombre Pozo	Nivel Dinámico (m)	Nivel Estático (m)	pH	Conductividad (μΩ/s)	Transmisividad (m ² /día)	Alcalinidad Total (ppm CaCO ₃)	Acidez Total (ppm CaCO ₃)
pz-08-0023	Lafayette 1	62.308	51.139	7.373	1046.750	177.667	432.313	N.D.
pz-09-0013	Textiles Romanos	42.009	27.461	7.200	264.000	N.D.	126.167	N.D.
pz-09-0015	Mobil Terminal De Transportes	32.408	21.700	7.198	355.167	8.980	168.600	N.D.
pz-09-0019	Flota La Macarena	27.191	17.369	6.877	744.500	31.000	381.500	N.D.
pz-09-0040	Indega Panamco Planta Norte Gases	47.806	36.547	7.225	1078.400	123.000	602.600	164.000
pz-09-0041	Protela S. A	54.032	32.993	7.211	1098.846	N.D.	506.714	41.250
pz-09-0043	Manufacturas Eliot No. 1	54.393	38.334	6.761	421.000	N.D.	230.100	26.000
pz-09-0044	Manufacturas Eliot No. 2	60.332	41.116	6.774	428.950	N.D.	223.750	46.000
pz-09-0047	Acabados Informales Y Lavados S. A	53.590	36.685	6.638	456.250	11.450	221.750	N.D.
pz-10-0003	Alimentos El Jardín	33.655	17.775	6.880	602.833	7.210	290.565	N.D.
pz-10-0015	Compensar	29.613	24.214	7.092	323.923	N.D.	168.994	84.000
pz-10-0024	Autolavado El Pastuso	30.636	21.316	7.365	382.778	N.D.	33.006	42.500
pz-10-0027	Cootransniza Ltda.	19.084	12.740	6.981	318.900	3.065	166.457	N.D.
pz-10-0028	Serviautos La Estrella	38.000	24.000	6.993	375.333	N.D.	148.500	N.D.
pz-14-0004	Hermanas Dominicas Presentación	40.888	32.760	6.430	106.750	N.D.	19.268	N.D.
pz-16-0002	Gaseosas Colombiana No 2	32.278	29.304	6.826	264.533	1.533	106.947	N.D.
pz-16-0003	Gaseosas Lux No. 1	72.218	46.989	6.426	287.714	N.D.	148.753	12.750
pz-16-0029	Colortex	66.815	40.988	6.578	259.600	45.000	134.280	36.000
pz-16-0036	Lime	45.575	38.927	6.830	342.333	70.000	163.250	N.D.

Fuente: Autores

Anexo C. (Continuación) Información Detallada Pozos Concesionados

Código	Nombre Pozo	Dureza Total (ppm CaCO ₃)	Calcio (ppm Ca)	Manganeso (ppm Mn)	Magnesio (ppm Mg)	Hierro (ppm Fe)	Potasio (ppm K)	Silicio (ppm Si)
pz-08-0023	Lafayette 1	43.941	6.000	3.015	3.580	2.212	5.030	N.D.
pz-09-0013	Textiles Romanos	31.692	37.000	N.D.	N.D.	5.939	N.D.	35.000
pz-09-0015	Mobil Terminal De Transportes	31.667	N.D.	5.000	N.D.	5.838	N.D.	N.D.
pz-09-0019	Flota La Macarena	51.193	6.625	N.D.	22.800	15.082	13.000	N.D.
pz-09-0040	Indega Panamco Planta Norte Gases	111.250	49.500	N.D.	8.100	3.303	10.200	3.590
pz-09-0041	Protela S. A	85.547	46.117	0.165	9.572	4.597	17.223	50.867
pz-09-0043	Manufacturas Eliot No. 1	51.589	12.775	0.053	5.367	10.855	5.158	51.267
pz-09-0044	Manufacturas Eliot No. 2	45.650	11.268	0.050	6.937	9.218	5.273	46.200
pz-09-0047	Acabados Informales Y Lavados S.A	30.500	7.175	N.D.	4.715	11.600	4.450	12.300
pz-10-0003	Alimentos El Jardín	36.703	5.460	N.D.	1.390	5.778	9.570	N.D.
pz-10-0015	Compensar	34.827	6.034	0.021	3.972	5.318	3.345	5.610
pz-10-0024	Autolavado El Pastuso	34.918	12.800		1.920	6.533	N.D.	N.D.
pz-10-0027	Cootransniza Ltda.	23.080	3.692	0.028	1.000	2.330	5.893	N.D.
pz-10-0028	Serviautos La Estrella	28.433	6.040	1.990	2.590	4.160	3.340	N.D.
pz-14-0004	Hermanas Dominicanas Presentación	11.750	N.D.	N.D.	N.D.	13.600	N.D.	N.D.
pz-16-0002	Gaseosas Colombiana No 2	26.322	4.000	N.D.	1.900	13.308	2.000	N.D.
pz-16-0003	Gaseosas Lux No. 1	31.980	9.101	0.066	3.937	7.868	3.645	11.504
pz-16-0029	Colortex	25.020	14.000	0.000	7.500	11.324	3.700	0.170
pz-16-0036	Lime	36.667	14.400	N.D.	1.440	11.700	6.500	53.700

Fuente: Autores

Anexo C. (Continuación) Información Detallada Pozos Concesionados

Código	Nombre Pozo	Sodio (ppm Na)	Arsénico (ppm As)	Boro (ppm B)	Sulfatos (ppm SO4)	Fosfatos (ppm PO4 3-)	Cloruros (ppm Cl)	Fluoruros (ppm F)
pz-08-0023	Lafayette 1	195.000	N.D.	N.D.	N.D.	15.630	68.250	N.D.
pz-09-0013	Textiles Romanos	N.D.	N.D.	6.200	N.D.	7.834	N.D.	N.D.
pz-09-0015	Mobil Terminal De Transportes	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	9.260	N.D.	N.D.
pz-09-0019	Flota La Macarena	70.000	N.D.	N.D.	1.700	1.321	12.100	N.D.
pz-09-0040	Indega Panamco Planta Norte Gases	212.000	N.D.	0.220	6.000	7.051	100.667	0.052
pz-09-0041	Protela S. A	232.303	0.112	0.116	7.700	3.666	95.920	0.100
pz-09-0043	Manufacturas Eliot No. 1	55.033	0.004	0.053	5.325	16.904	17.050	0.175
pz-09-0044	Manufacturas Eliot No. 2	60.850	0.004	0.063	5.233	12.724	24.167	0.133
pz-09-0047	Acabados Informales Y Lavados S. A	122.050	0.001	0.100	1.650	12.133	15.750	N.D.
pz-10-0003	Alimentos El Jardín	319.160	N.D.	N.D.	0.000	3.156	4.800	N.D.
pz-10-0015	Compensar	18.650	N.D.	N.D.	1.783	3.278	9.000	0.530
pz-10-0024	Autolavado El Pastuso	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5.300	5.300	N.D.
pz-10-0027	Cootransniza Ltda.	70.000	N.D.	N.D.	N.D.	0.500	N.D.	N.D.
pz-10-0028	Serviautos La Estrella	61.000	N.D.	N.D.	4.200	3.315	9.500	N.D.
pz-14-0004	Hermanas Dominicanas Presentación	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.725	N.D.	N.D.
pz-16-0002	Gaseosas Colombiana No 2	27.000	N.D.	N.D.	4.300	3.941	7.800	N.D.
pz-16-0003	Gaseosas Lux No. 1	44.050	0.001	0.076	10.214	2.592	37.150	0.100
pz-16-0029	Colortex	23.200	0.005	0.100	4.500	8.763	19.000	0.400
pz-16-0036	Lime	130.000	0.001	0.120	4.700	13.690	16.500	16.720

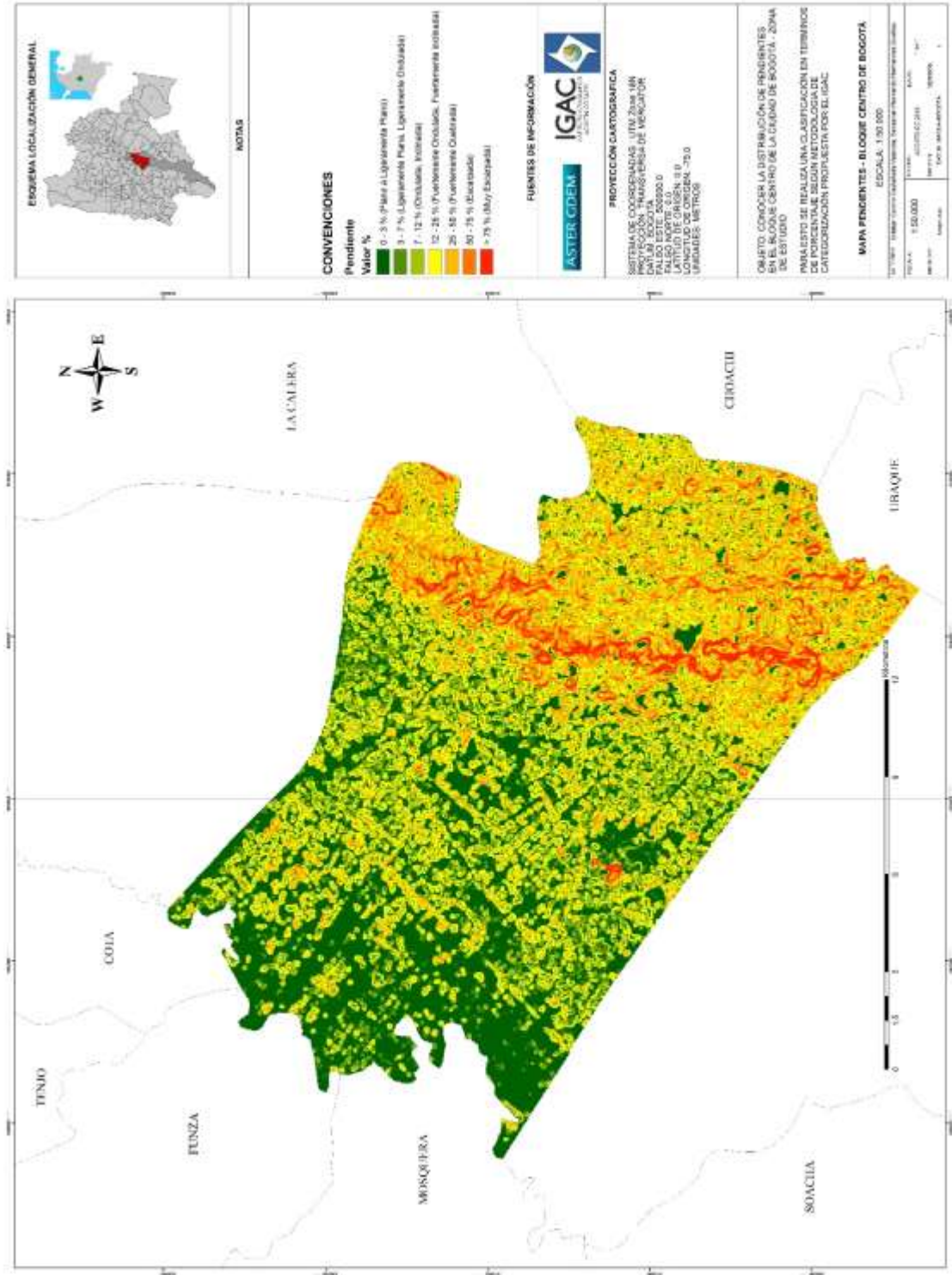
Fuente: Autores

Anexo C. (Continuación) Información Detallada Pozos Concesionados

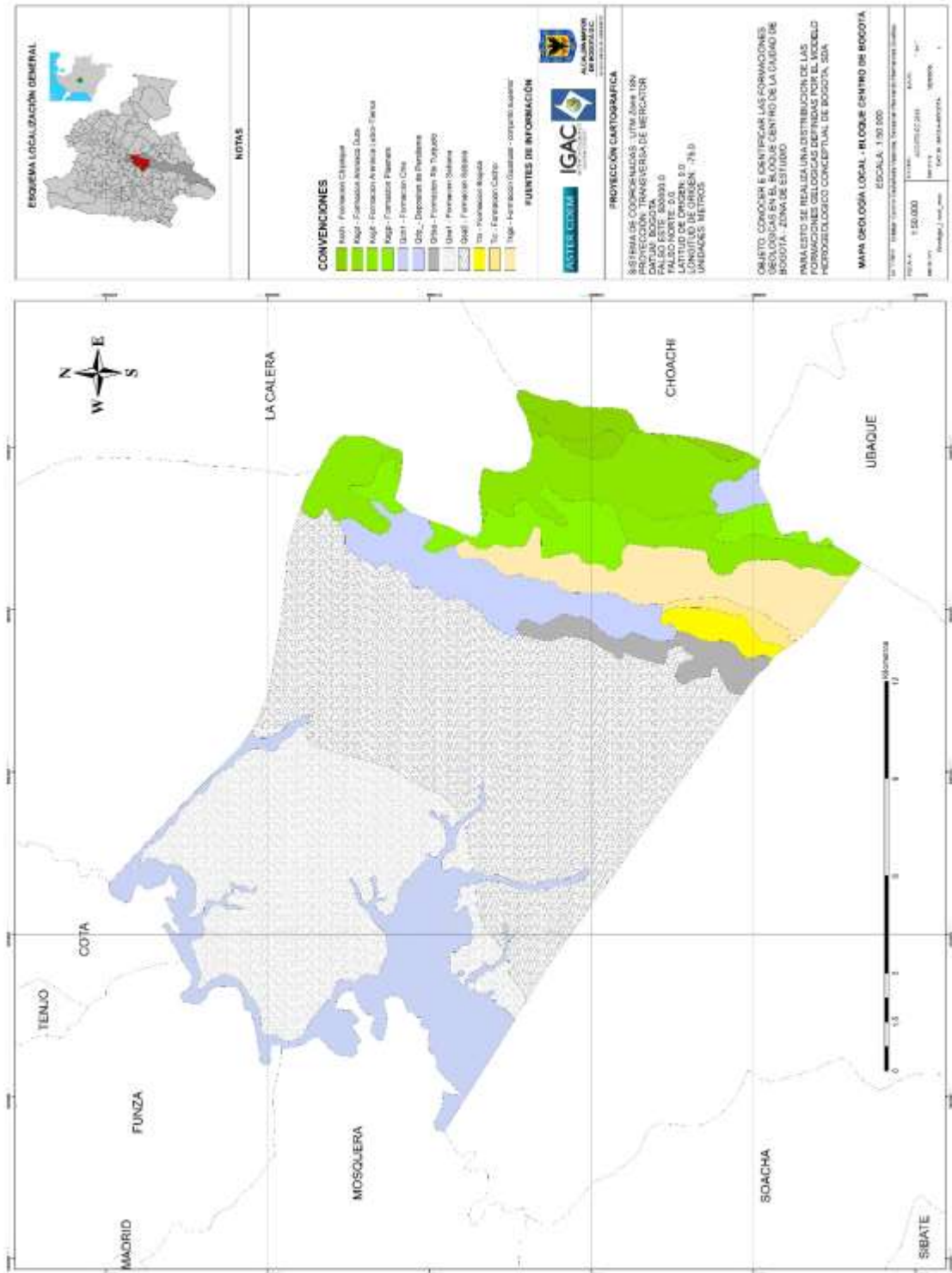
Código	Nombre Pozo	Nitratos (ppm NO3-)	Nitritos (ppm NO2-)	Solidos Totales (ppm)	Solidos Totales Disueltos (ppm)	Solidos Totales Suspendidos (ppm)	CO2 (ppm)
pz-08-0023	Lafayette 1	0.831	N.D.	646.400	539.496	20.833	N.D.
pz-09-0013	Textiles Romanos	N.D.	N.D.	N.D.	166.000	46.800	N.D.
pz-09-0015	Mobil Terminal De Transportes	N.D.	N.D.	N.D.	246.000	31.000	N.D.
pz-09-0019	Flota La Macarena	1.210	0.001	N.D.	470.500	243.714	N.D.
pz-09-0040	Indega Panamco Planta Norte Gases	0.010	0.010	N.D.	883.000	N.D.	N.D.
pz-09-0041	Protela S. A	0.413	0.003	679.000	902.333	N.D.	5.367
pz-09-0043	Manufacturas Eliot No. 1	0.091	0.003	N.D.	308.250	7.750	11.400
pz-09-0044	Manufacturas Eliot No. 2	0.152	0.004	N.D.	313.667	8.000	20.200
pz-09-0047	Acabados Informales Y Lavados S. A	0.090	0.010	N.D.	248.500	N.D.	N.D.
pz-10-0003	Alimentos El Jardín	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	13.333	N.D.
pz-10-0015	Compensar	0.155	0.028	N.D.	N.D.	5.000	91.500
pz-10-0024	Autolavado El Pastuso	N.D.	N.D.	N.D.	308.000	48.750	N.D.
pz-10-0027	Cootransniza Ltda.	0.030	N.D.	47.000	N.D.	22.213	N.D.
pz-10-0028	Serviautos La Estrella	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
pz-14-0004	Hermanas Dominicas Presentación	N.D.	N.D.	24.500	N.D.	N.D.	N.D.
pz-16-0002	Gaseosas Colombiana No 2	3.500	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
pz-16-0003	Gaseosas Lux No. 1	0.078	0.012	271.500	251.500	45.988	N.D.
pz-16-0029	Colortex	0.005	0.005	N.D.	193.000	N.D.	14.600
pz-16-0036	Lime	0.440	0.004	N.D.	230.000	N.D.	N.D.

Fuente: Autores

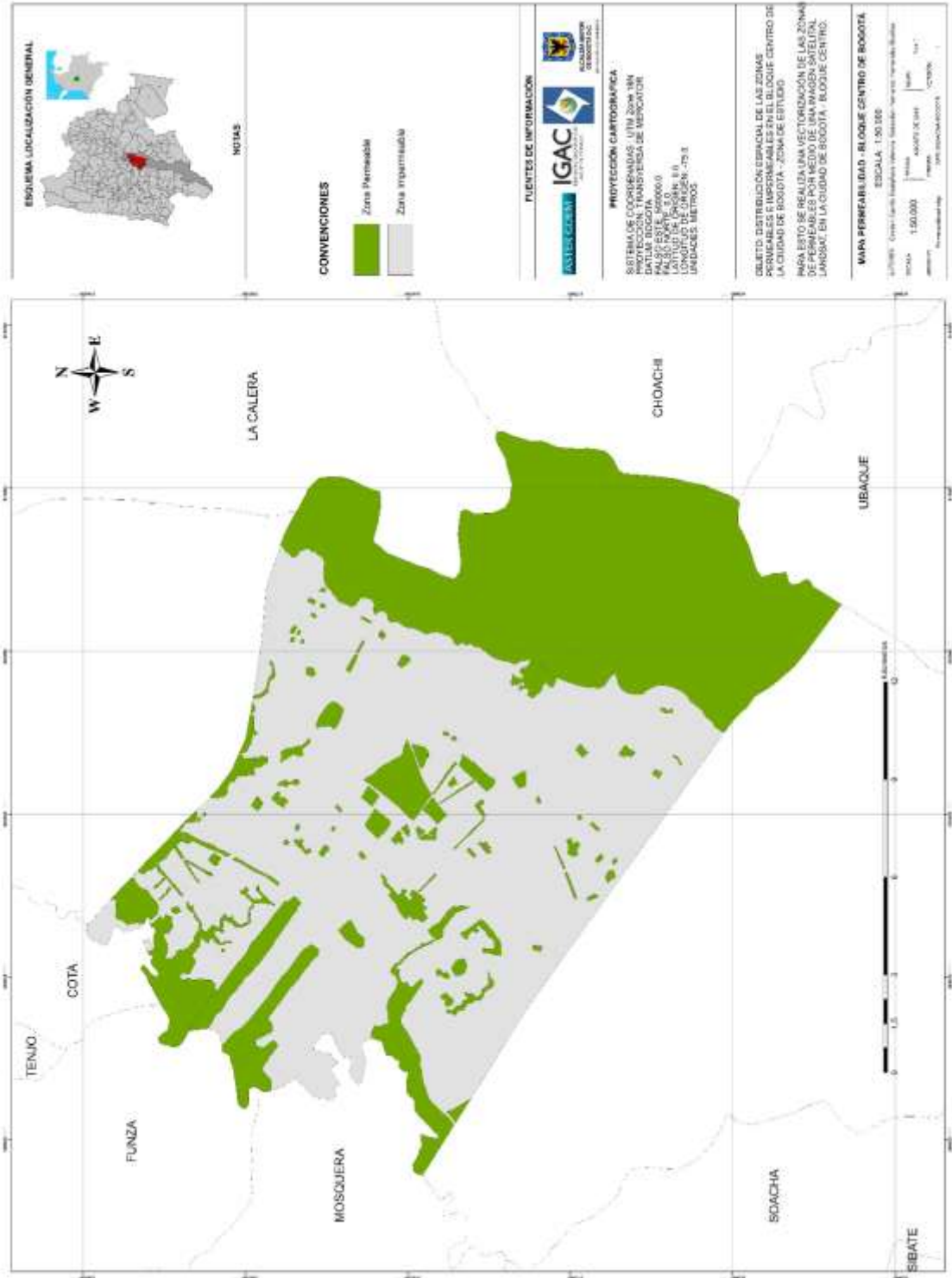
Anexo D. Variación Local de Pendientes Estimada en Porcentaje



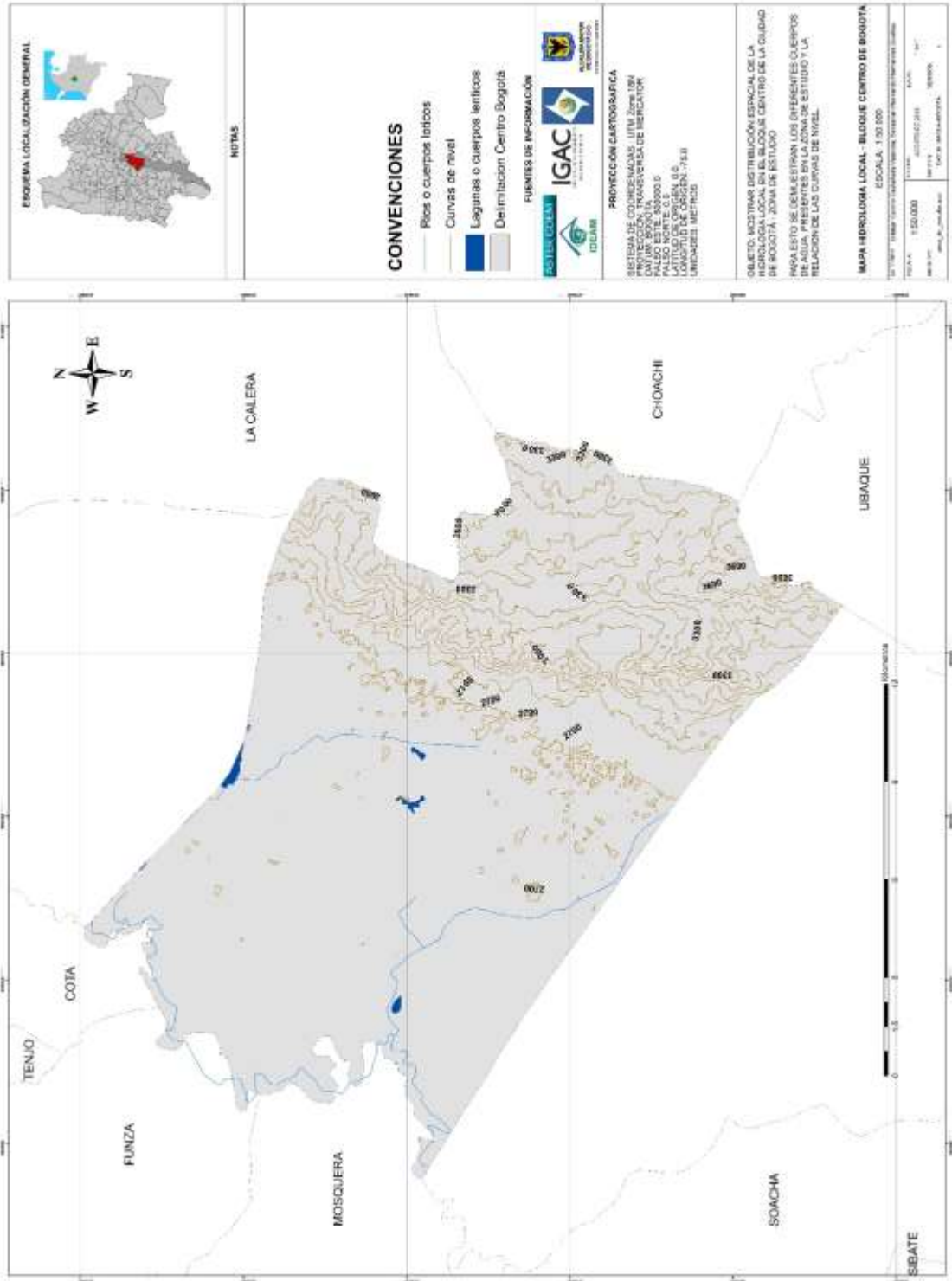
Fuente: Autores
 Anexo E. Geología Local



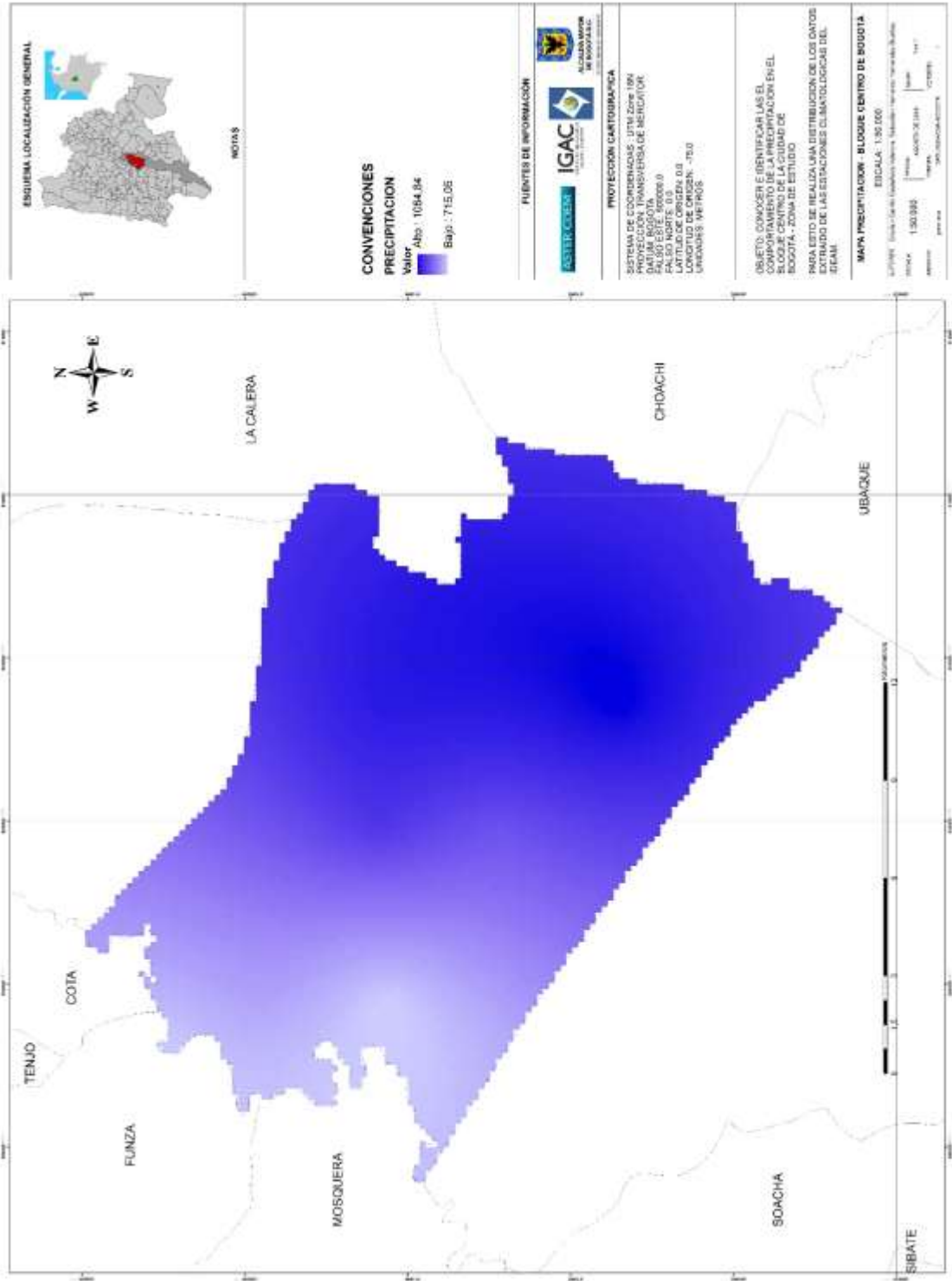
Fuente: Autores
 Anexo F. Zonificación Local de Áreas Permeables e Impermeables



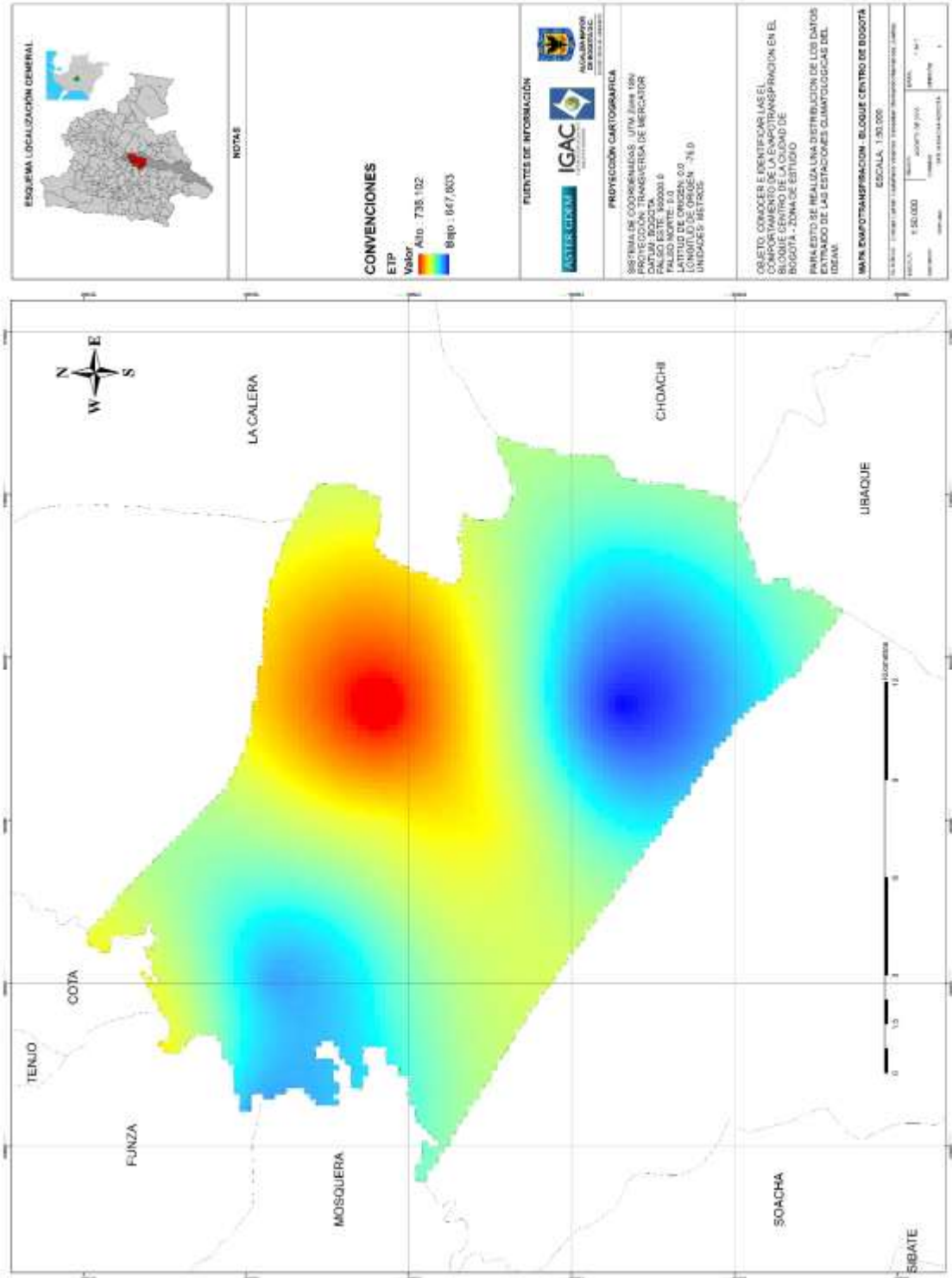
Fuente: Autores
Anexo G. Hidrología Local



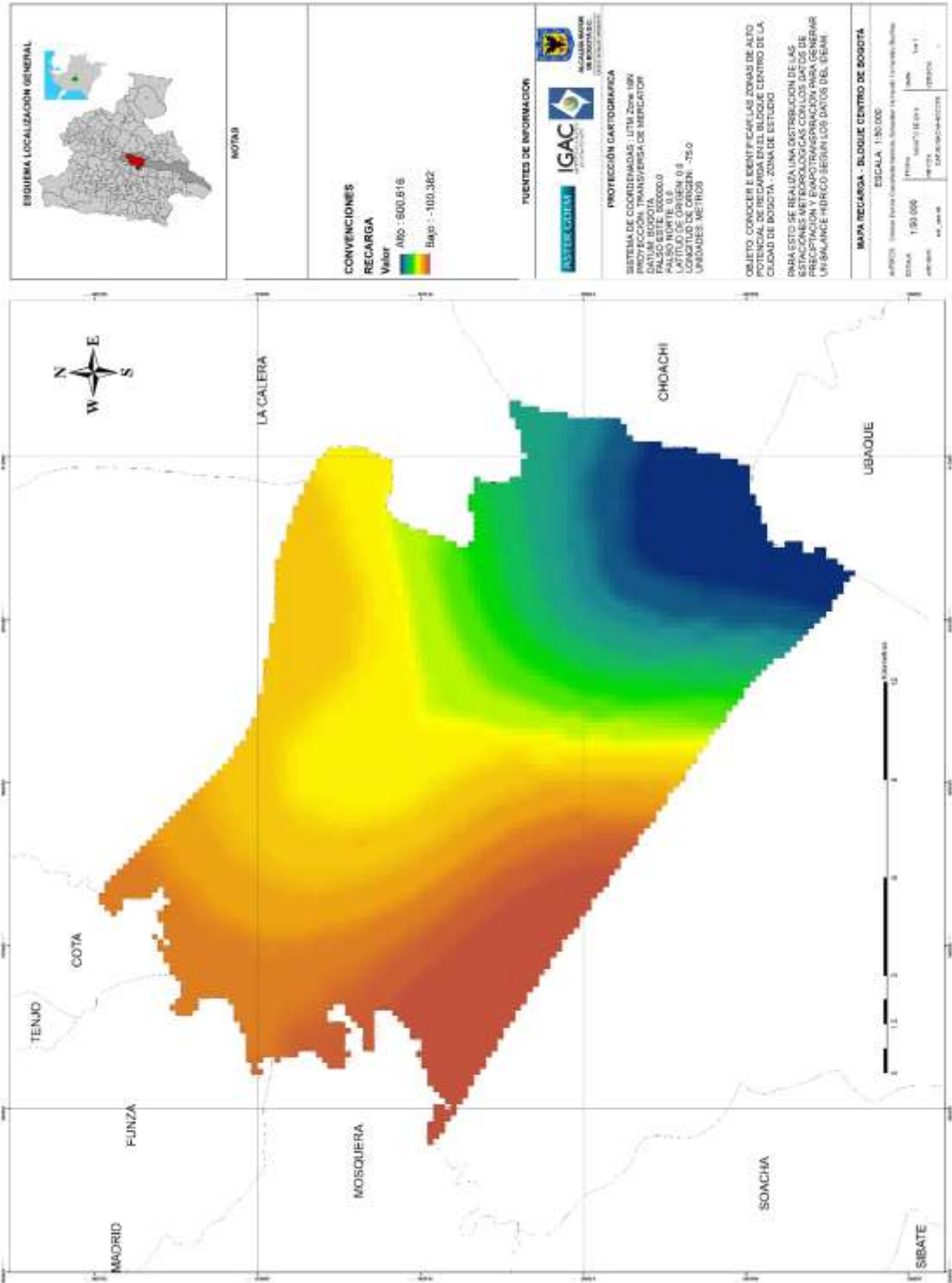
Fuente: Autores
Anexo H. Distribución Local de la Precipitación



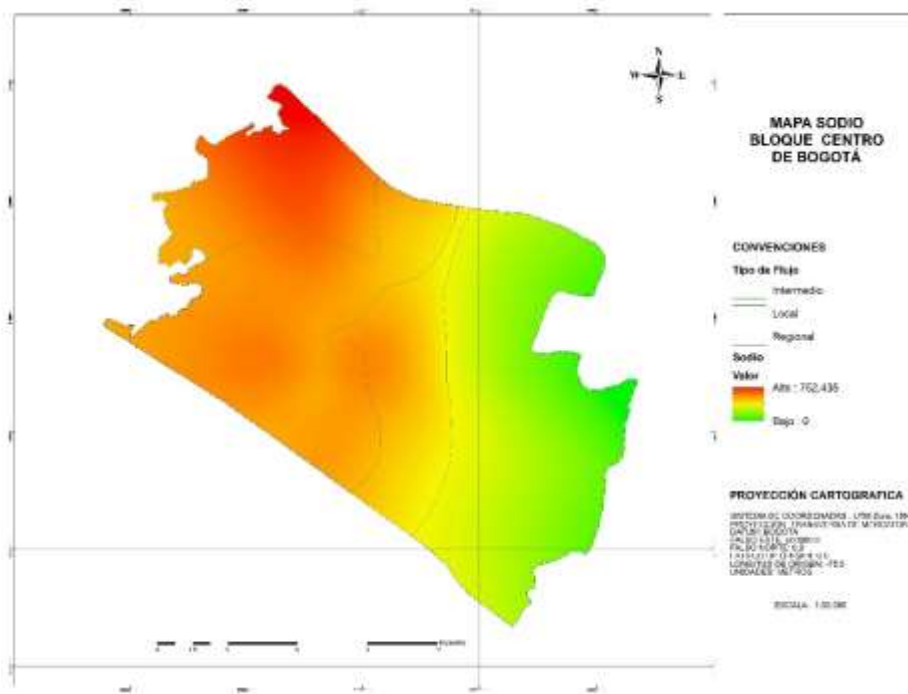
Fuente: Autores
 Anexo I. Distribución Local de la Evapotranspiración Potencial



Fuente: Autores
 Anexo J. Distribución Local de Recarga

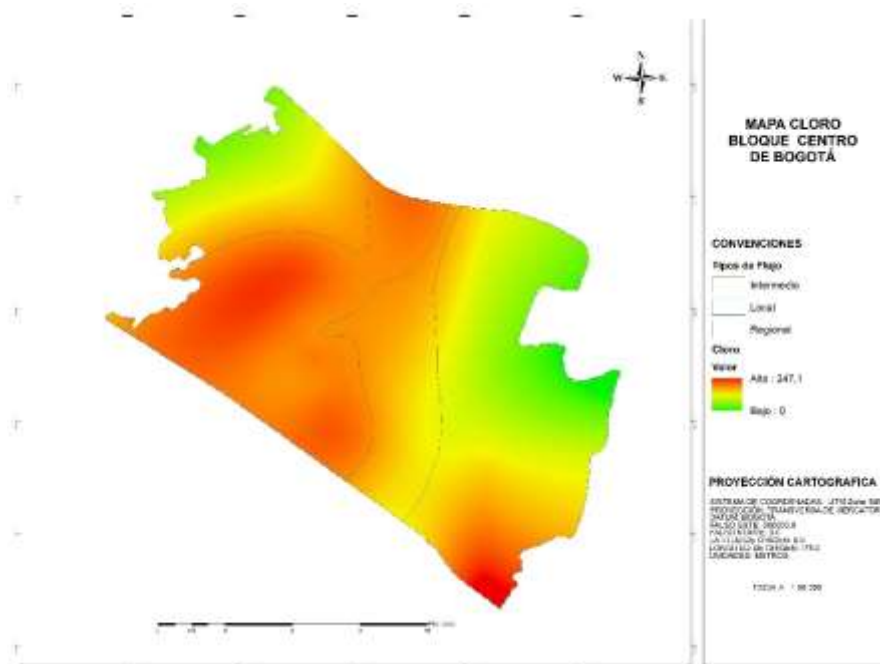


Fuente: Autores
 Anexo K. Distribución Espacial Sodio



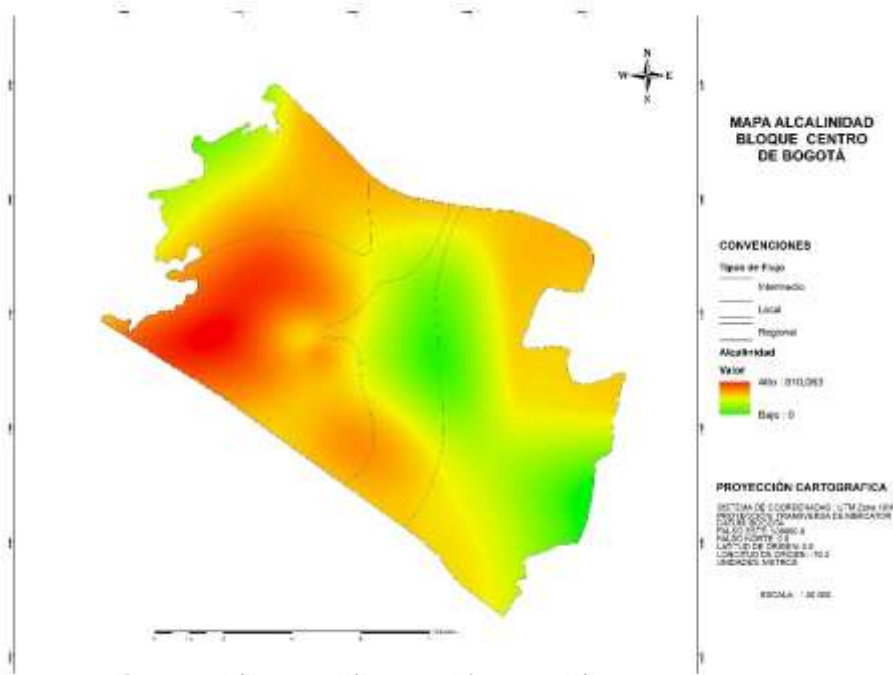
Fuente: Autores

Anexo L. Distribución Espacial Cloro



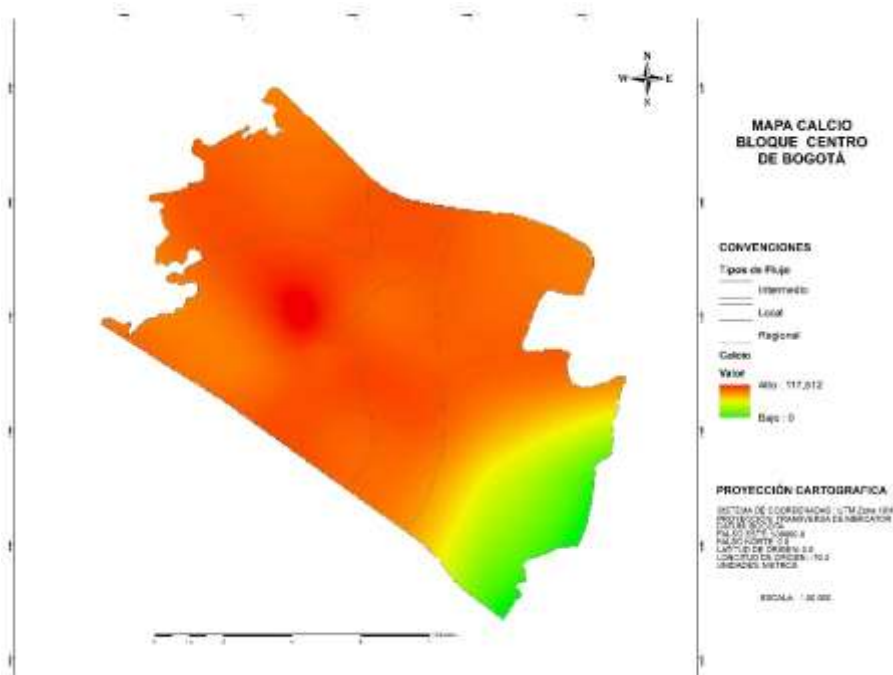
Fuente: Autores

Anexo M. Distribución Espacial Alcalinidad



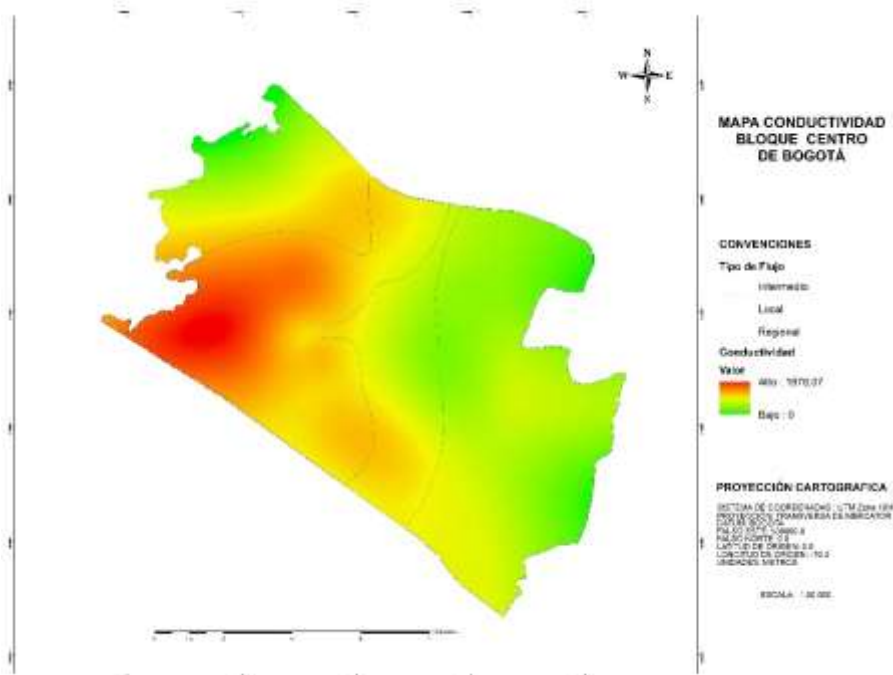
Fuente: Autores

Anexo N. Distribución Espacial Calcio



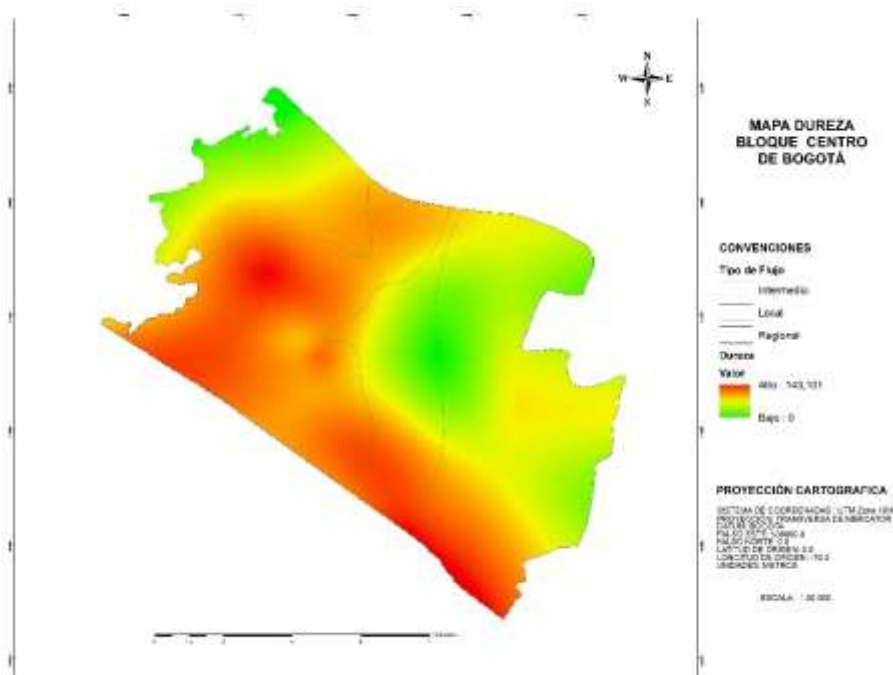
Fuente: Autores

Anexo O. Distribución Espacial Conductividad Eléctrica



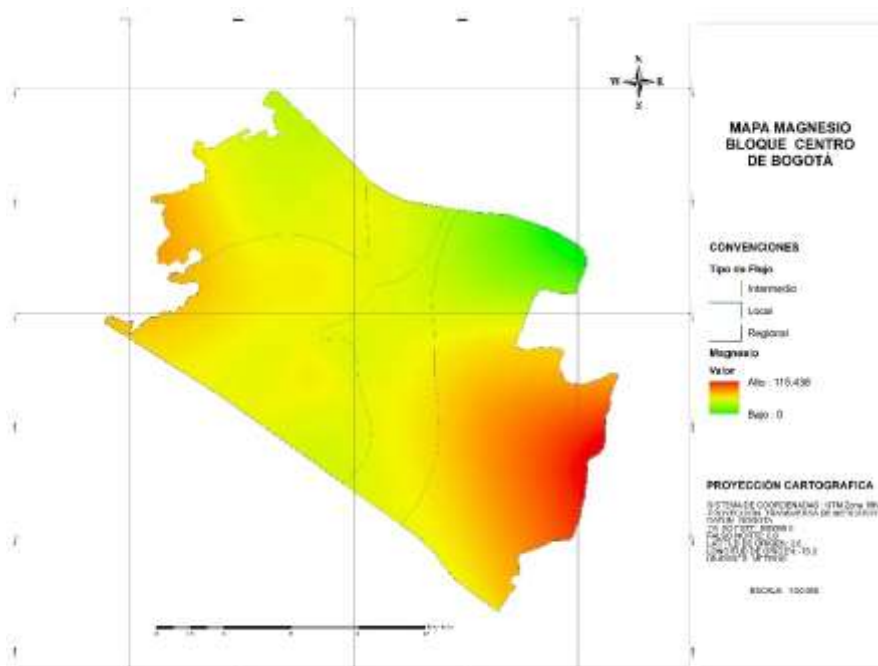
Fuente: Autores

Anexo P. Distribución Espacial Dureza



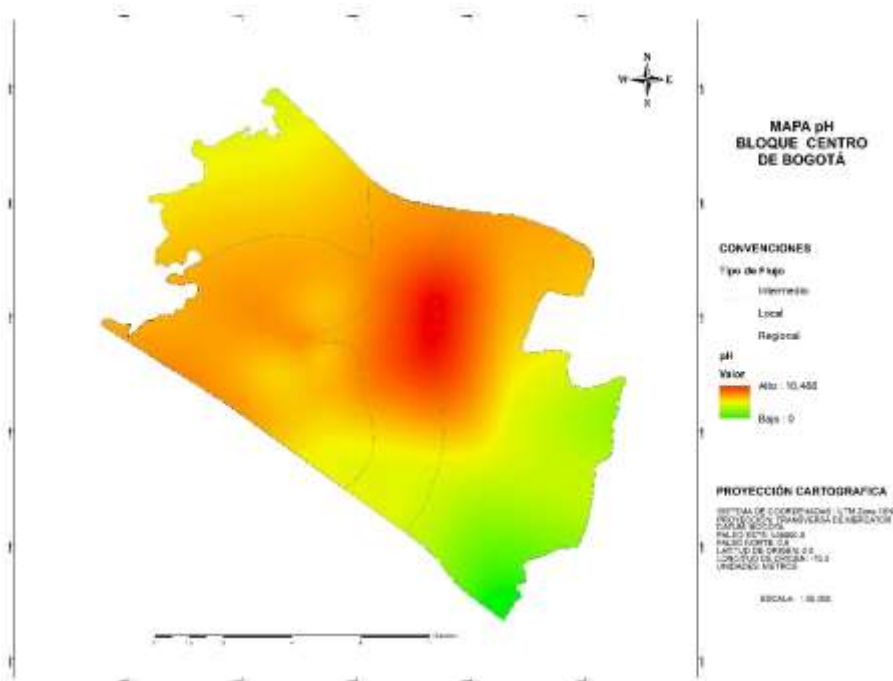
Fuente: Autores

Anexo Q. Distribución Espacial Magnesio

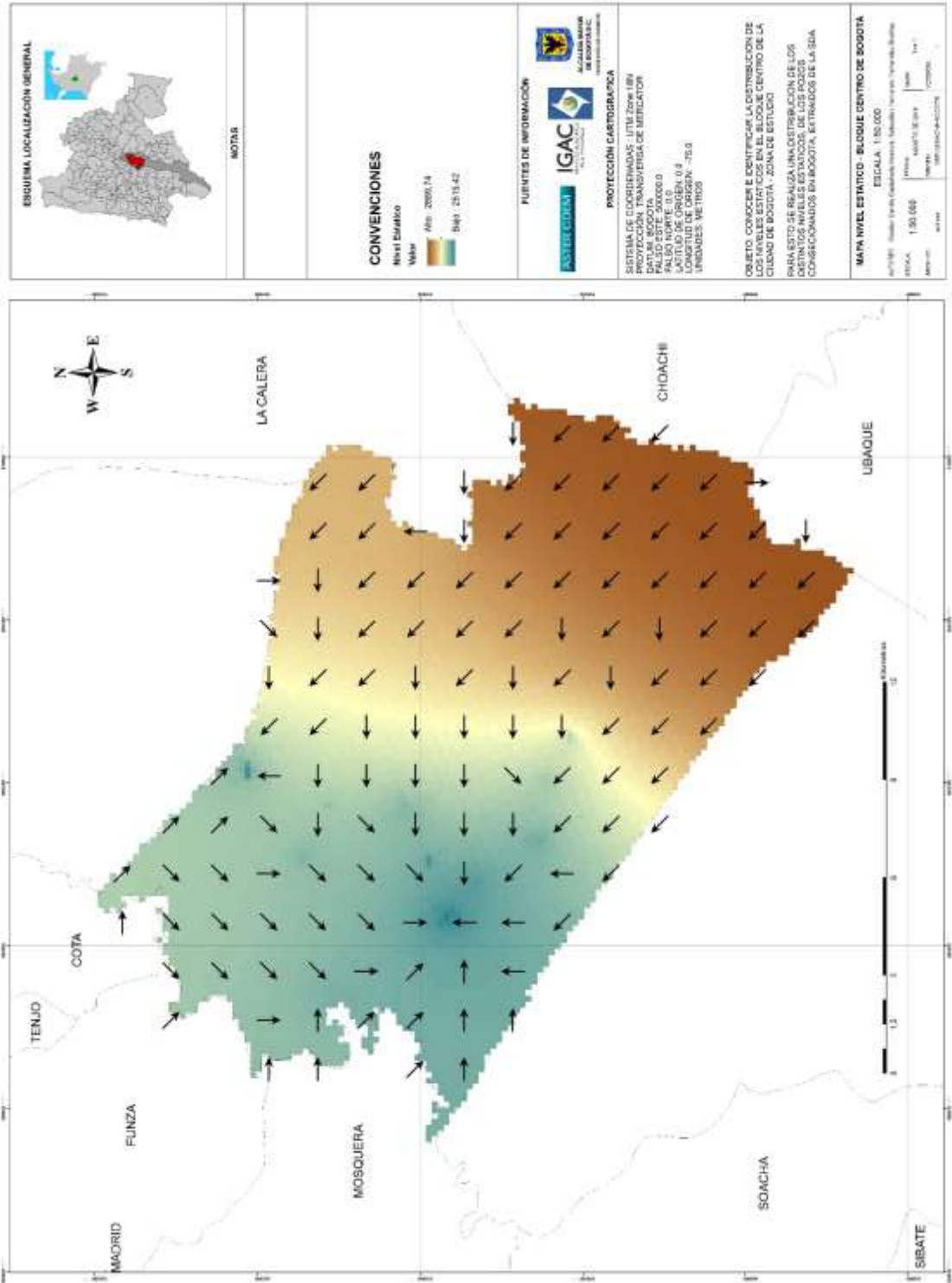


Fuente: Autores

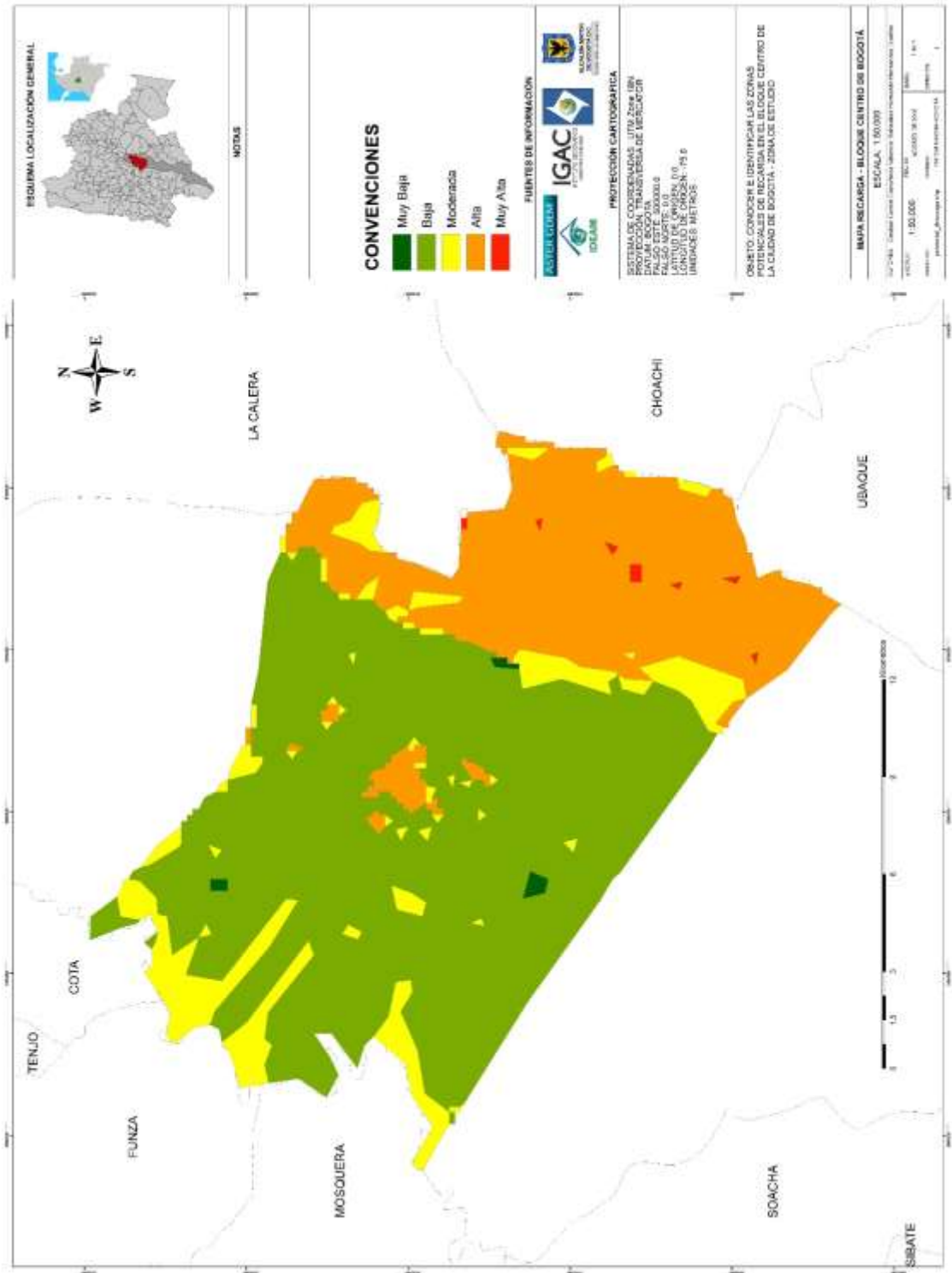
Anexo R. Distribución Espacial pH



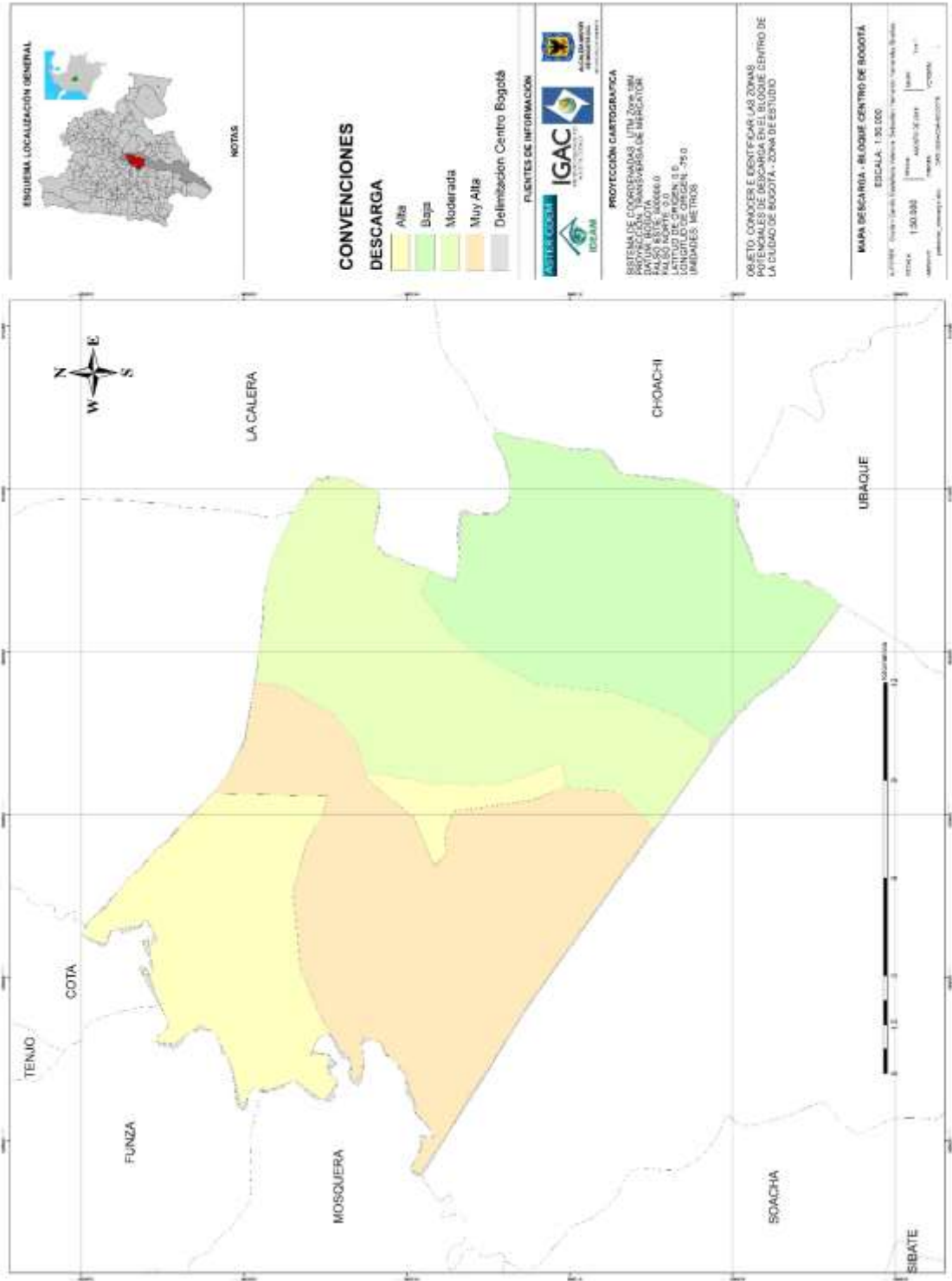
Fuente: Autores



Fuente: Autores
Anexo U. Zonificación del Potencial de Recarga



Fuente: Autores
Anexo V. Zonificación del Potencial de Descarga



Fuente: Autores