

**ZONIFICACIÓN DE SECTORES ESTRATÉGICOS PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN EL MUNICIPIO DE MADRID, CUNDINAMARCA**

Xiomara Andrea Lizarazo López
Ingeniera Catastral y Geodesta

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
BOGOTÁ D.C.

2022

**ZONIFICACIÓN DE SECTORES ESTRATÉGICOS PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN EL MUNICIPIO DE MADRID, CUNDINAMARCA**

Xiomara Andrea Lizarazo López
Ingeniera Catastral y Geodesta

**Trabajo de grado para optar por el título de
ESPECIALISTA EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

DIRECTOR
Andrés Felipe Carvajal Vanegas
Doctor en Geografía

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
BOGOTÁ D.C.

2022

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	9
2.1 Normatividad	9
2.2 Áreas de Importancia Estratégica	10
2.3 Zonificación	10
2.4 Balance Hídrico	11
2.5 Estado del conocimiento	12
3. OBJETIVOS	14
3.1 Objetivo General	14
3.2 Objetivos específicos	14
4. METODOLOGÍA.....	15
4.1 Área de Estudio:	15
4.2 Fases de trabajo:	16
4.2.1 <i>FASE 1: IDENTIFICACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL ÁREA DE ESTUDIO.</i>	16
4.2.2 <i>FASE 2: SELECCIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y EXTRACCIÓN DE LOS DATOS</i>	17
4.2.3 <i>FASE 3: TABULACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS</i>	19
4.2.4 <i>FASE 4: CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO</i>	21
4.2.5 <i>FASE 5: DELIMITACIÓN PRELIMINAR DE ZONAS DE IMPORTANCIA PARA LOS DRENAJES</i>	22
4.2.6 <i>FASE 6: ZONIFICACIÓN DE SECTORES ESTRATÉGICOS</i>	23
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
5.1 FASE 1: Identificación de la cuenca hidrográfica en el área de estudio.	27
5.2 FASE 2: Selección de estaciones meteorológicas y extracción de los datos	

5.3	FASE 3: Tabulación de la información de las estaciones meteorológicas...	29
5.4	FASE 4: Cálculo del balance hídrico.....	32
5.5	FASE 5: Delimitación preliminar de zonas de importancia para los drenajes 34	
5.6	FASE 6: Zonificación de sectores estratégicos	36
6.	CONCLUSIONES.....	42
7.	RECOMENDACIONES.....	43
8.	REFERENCIAS	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estaciones IDEAM de zona de estudio	17
Tabla 2: Estaciones de otras entidades.....	18
Tabla 3: Estaciones seleccionadas en área de estudio	18
Tabla 4: Categoría de áreas de influencia de los drenajes	24
Tabla 5: Categorías de Cobertura de suelo	25
Tabla 6: Categorización de Conflictos de uso del suelo	25
Tabla 7: Total precipitación mensual multianual para cada estación.....	29
Tabla 8: Rangos de distribución de precipitación.....	30
Tabla 9: Temperatura media de las estaciones.....	30
Tabla 10: Rangos de distribución de la temperatura	31
Tabla 11: Rangos de distribución de la evapotranspiración.....	31
Tabla 12: Rangos de distribución del balance hídrico.....	33
Tabla 13: Matriz de decisión.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de Balance Hídrico global en el ciclo hidrológico	11
Figura 2: Localización Municipio de Madrid	15
Figura 3: Crecimiento poblacional Madrid, Cundinamarca.....	16
Figura 4: Localización geográfica de la cuenca Media río Bogotá	17
Figura 5: Componentes de la evapotranspiración.....	20
Figura No. 6: Modelo de Acumulación de Flujo.....	22
Figura 7: Clasificación de Redes Método Strahler	23
Figura 8: Modelo de zonificación de áreas estratégicas	24
Figura 9. Ubicación de Madrid en la cuenca hídrica.....	27
Figura 10: Polígonos de Thiessen	28
Figura 11: Localización de estaciones seleccionadas en área de estudio.....	28
Figura 12: Distribución de la precipitación en la zona de estudio.....	29
Figura 13: Temperatura promedio anual del área de estudio	30
Figura 14: Evapotranspiración área de estudio	31
Figura 15: Balance hídrico en el área de estudio.....	32
Figura 16: Ráster de flujo acumulado	35
Figura 17: Capa shape de drenajes clasificados por orden	35
Figura 18: Zonas estratégicas iniciales.....	36
Figura 19: Aptitud Hídrica en el área de estudio	37
Figura 20: Aptitud del Suelo en el área de estudio	38
Figura 21: Zonificación de sectores estratégicos para el abastecimiento de agua	41

RESUMEN

En el presente documento se propone un modelo que permite identificar aquellos sectores que por sus características biofísicas sean estratégicos para el abastecimiento de agua en el municipio de Madrid, Cundinamarca, mediante la aplicación de herramientas SIG. Para el desarrollo del modelo fue necesario la recolección de datos históricos de las estaciones meteorológicas presentes en el área de estudio, así como los insumos disponibles en las plataformas SIAC (Sistema de Información Ambiental de Colombia), Geoportal IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) y Earthdata (misión SRTM) para obtener el Modelo Digital de Elevación (DEM). Se realizó el cálculo del balance hídrico, la distribución de los drenajes a partir del DEM y se obtuvo las capas que forman parte del modelo. A lo largo de las fases de la metodología, se hizo una categorización de los resultados y asignación de pesos a partir de la importancia para la producción y conservación del recurso hídrico. Mediante el álgebra de mapas y la matriz de decisión, se obtiene el mapa que permite identificar los sectores estratégicos para el abastecimiento de agua en el municipio de Madrid.

Palabras clave: Recurso hídrico, zonificación, sectores estratégicos, Municipio Madrid, abastecimiento de agua.

ABSTRACT

This document proposes a model that allows identifying those sectors that, due to their biophysical characteristics, are strategic for the water supply in the municipality of Madrid, Cundinamarca, through the application of GIS tools. For the development of the model, it was necessary to collect historical data from the meteorological stations present in the study area, as well as the inputs available in the SIAC (Environmental Information System of Colombia), Geoportal IGAC (Agustin Codazzi Geographical Institute) and Earthdata (SRTM mission) to obtain the Digital Elevation Model (DEM). The calculation of the water balance, the distribution of the drainages from the DEM and the layers that are part of the model were obtained. Throughout the phases of the methodology, a categorization of the results and assignment of weights was made based on the importance for the production and conservation of the water resource. Through the algebra of maps and the decision matrix, the map that allows identifying the strategic sectors for the water supply in the municipality of Madrid is obtained.

Keywords: Water resources, zoning, strategic sectors, Madrid Municipality, water supply.

1. INTRODUCCIÓN

Las herramientas SIG brindan la posibilidad, no solo de conocer el territorio en su estado actual, sino también de modelarlo y con esto generar estrategias y brindar lineamientos para la elaboración de políticas públicas en aras de gestionar los recursos que hacen parte de este territorio. Uno de los recursos más importantes para un territorio y, en general, para la vida, es el agua. El conocimiento y gestión adecuada de este recurso, permitirá garantizar algo que se conoce como seguridad hídrica, la cual consiste en tener la disponibilidad de agua adecuada, en cantidad y calidad, para el abastecimiento humano, los usos de subsistencia, la protección de los ecosistemas y la producción (Peña, 2016). En momentos donde prima el crecimiento económico, pero con una creciente preocupación sobre la sustentabilidad ambiental que permita asegurar los recursos naturales necesarios para la vida de las próximas generaciones, urge que se dé una gestión que favorezca el desarrollo sustentable en función del crecimiento económico, la equidad y la sustentabilidad ambiental ((CEPAL)., 1994). Sin embargo, aunque Colombia es un país rico en el recurso agua, el crecimiento de la población y de la economía, concentrado en pequeñas áreas, ha empezado a crear desequilibrios entre la oferta y la demanda de agua y/o entre sus diversos usos (Vélez; Poveda; Mesa, 1999, p. 24).

En este sentido, este trabajo busca, a través de uso de herramientas SIG y sus aplicaciones en hidrología, identificar aquellas zonas que, por sus características meteorológicas y territoriales en general, se consideren como zonas estratégicas para para el abastecimiento de agua en el municipio de Madrid, Cundinamarca, municipio que hace parte de la provincia Sabana de Occidente. La identificación de los sectores estratégicos para el abastecimiento de agua en el municipio, permitirán no sólo su reconocimiento sino también la gestión de procesos que permitan su recuperación y/o preservación y que garanticen, en un mediano y largo plazo, el abastecimiento del recurso hídrico y la seguridad hídrica en el municipio.

2. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 Normatividad

La Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones, en el artículo 111, se declara de interés público las áreas de importancia estratégica para la conservación de recursos hídricos que surten de agua los acueductos municipales y distritales, las cuales deben ser adquiridas por los municipios y/o departamentos como áreas de Interés para Acueductos Municipales.

Por su parte, el Decreto 953 de 2013, por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011, manifiesta que las autoridades ambientales deben identificar, delimitar y priorizar las áreas de importancia estratégica, para la adquisición de predios o la implementación de esquemas de pago por servicios ambientales, con base en la información de los planes y ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas, planes de manejo ambiental de microcuencas o en otros instrumentos de planificación ambiental relacionados con el recurso hídrico. El decreto define que para la selección de los predios se deberán evaluar los siguientes criterios, sin perjuicio de otros adicionales que podrá definir mediante acto administrativo el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible:

1. Población abastecida por los acueductos beneficiados con la conservación del área estratégica dentro de la cual está ubicado el predio.
2. Presencia en el predio de corrientes hídricas, manantiales, afloramientos y humedales.
3. Importancia del predio en la recarga de acuíferos o suministro hídrico.
4. Proporción de coberturas y ecosistemas naturales poco o nada intervenidos presentes en el predio.
5. Grado de amenaza de los ecosistemas naturales por presión antrópica.
6. Fragilidad de los ecosistemas naturales existentes.
7. Conectividad eco sistémica.
8. Incidencia del predio en la calidad del agua que reciben los acueductos beneficiados.

2.2 Áreas de Importancia Estratégica

Para hablar de *áreas de importancia estratégica* para el abastecimiento de agua, se puede aproximar su definición a *Ecosistemas Estratégicos*. Cuando se habla de Ecosistema Estratégico se alude a un espacio determinado, que, a partir de objetivos conservacionistas, es una porción geográfica, concreta, delimitable, en la cual la oferta ambiental, natural o inducida por el hombre genera un conjunto de bienes y servicios ambientales, imprescindibles para la población que los define como tales. Además, la población identifica como especiales, estratégicos, a aquellos lugares de los cuales obtiene recursos limitantes, un ejemplo de ellos son los sitios que proveen agua, estos son estratégicos, son hitos geográficos (Agudelo, 2010).

La delimitación de áreas de importancia estratégica permite hacer un manejo integral de la cuenca hidrográfica y generar información para la toma de decisiones que reduzcan los efectos del calentamiento global y el uso sostenible del recurso hídrico (Galindo, 2006). Esto se alinea a la estrategia de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico que se orienta a la restauración y preservación de los ecosistemas considerados claves para la regulación de la Oferta Hídrica, promoviendo y apoyando procesos para la protección, conservación y restauración de los ecosistemas y la adquisición, delimitación, manejo y vigilancia las áreas donde se encuentran estos ecosistemas (Ministerio de Ambiente, 2010).

2.3 Zonificación

Las áreas de importancia estratégica estarán determinadas por medio de una *Zonificación* de tipo ambiental, entendida como la división del territorio en zonas homogéneas, detectando necesidades compartidas en cuanto a la gestión de recursos, y permite la localización y valoración de áreas conforme a la calidad biofísica. Por tanto, cada espacio de interés está geográficamente delimitado y es reconocido por su importancia conforme a los fines de la conservación; y, por ello, se considera que debería ser objeto de medidas de gestión y manejo con el fin de minimizar los impactos negativos y de asegurar un uso del espacio compatible con la conservación (Romero, 2002).

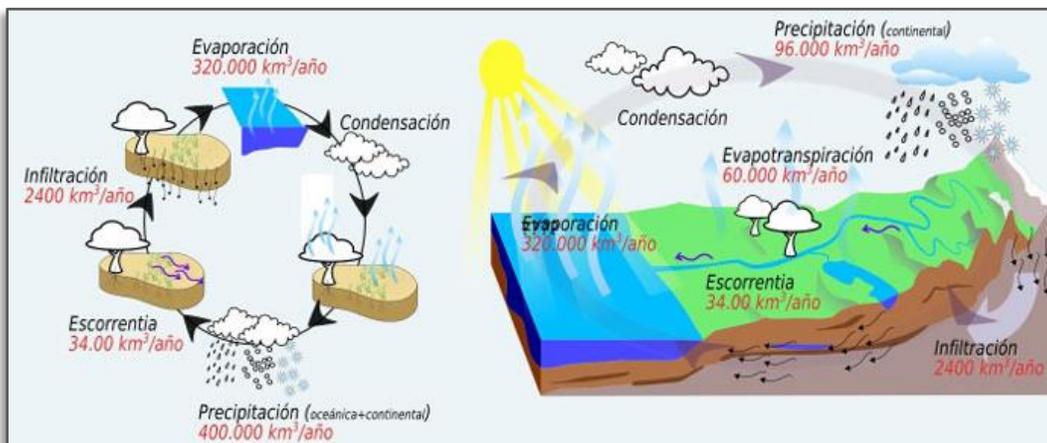
Por su parte, la Resolución 196 de 2006 del Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial define la *zonificación* enfocada al análisis de humedales “como el proceso mediante el cual, a partir de un análisis integral ecosistémico y holístico, se busca identificar y entender áreas que puedan considerarse como unidades homogéneas en función de la similitud de sus componentes físicos, biológicos, socioeconómicos y culturales”

De acuerdo con las definiciones anteriores y para los fines de este trabajo, se puede definir la *Zonificación* como el proceso encaminado a dividir el territorio en zonas con características similares en función de su oferta hídrica y su cobertura de suelo, con la finalidad de identificar aquellas que por su importancia para la conservación y para el abastecimiento de agua en el territorio, deban ser de especial manejo, de acuerdo con lo estipulado en la normatividad vigente, y así minimizar los riesgos de desabastecimiento del recurso hídrico tanto para el consumo humano como para el mantenimiento de los ecosistemas.

2.4 Balance Hídrico

Uno de los temas a abordar en el presente trabajo es el Balance hídrico que, como el propio nombre lo indica, es el balance de agua para un lugar determinado. El Balance Hídrico analiza la entrada y salida de agua en un espacio territorial a lo largo del tiempo, con lo que es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y las modificaciones que presenta por las actividades humanas (Figura 1). El balance hídrico para zonas delimitadas en donde se incluyen variables tomadas en la realidad local se le llama *Balance Hídrico Ajustado* (Ordóñez Gálvez, 2011).

Figura 1: Esquema de Balance Hídrico global en el ciclo hidrológico



Fuente: Ordóñez, 2011

La ecuación general del balance hídrico es la siguiente:

$$P = ET + Q \pm \Delta S$$

Donde:

P: Precipitación (mm)

ET: Evapotranspiración (mm)

Q: Flujo superficial (mm)

ΔS : Variación de almacenamiento (mm)

2.5 Estado del conocimiento

Entre los estudios hidrológicos y de zonificación hidrológica, se encuentran los siguientes:

- *Evaluación Regional del Agua Cuenca Media Río Bogotá*, año 2014, de la Corporación Autónoma Regional (CAR), que a nivel de la cuenca media del río Bogotá, obtuvo el cálculo del balance hídrico para cada subcuenca, entre la que se encuentra la subcuenca del río Balsillas. En este documento se aborda desde un ámbito conceptual el estudio integral de la cuenca, incluyendo elementos como la oferta hídrica, la demanda hídrica, el balance hídrico, la calidad hídrica superficial y los riesgos desde el punto de vista hidrológico, para llegar a su aplicación sobre las subcuencas que conforman la Cuenca Medio del Río Bogotá. Finalmente, se realiza un análisis integrado de todos los resultados obteniendo categorías de criticidad e identificando la subcuenca río Soacha, río Balsillas y río Frío con criticidad Alta en cuanto a disponibilidad, calidad, cantidad reserva, vulnerabilidad y riesgo asociado al recurso hídrico.(CAR, 2014)
- *Cartilla Técnica "BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL"*, año 2011, del Dr. Juan Julio Ordoñez Gálvez, documento técnico que compila la metodología para el cálculo del balance hídrico, que incluye información básica referente a la disponibilidad de agua (oferta hídrica), las variables que hacen parte del balance hídrico y las metodologías utilizadas para el cálculo de cada uno de los parámetros (Ordonez Gálvez, 2011).
- *Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra*, de los autores Adalto Moreira Braz, Patricia Helena Mirandola García, André Luiz Pinto, Eduardo Salinas Chávez y Ivanilton José de Oliveira. A lo largo de este artículo se abordó el manejo de la cuenca hidrográfica del

arroyo Lajeado Amarelo a partir del análisis de las clases de uso del suelo y la evaluación de sus impactos con lo cual se realizaron propuestas para el cambio de uso del suelo y su viabilidad. Se formularon directrices para la conservación de la cuenca hidrográfica buscando el equilibrio entre la preservación y la explotación (Braz et al., 2020).

- *Guía análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial*, documento producto de un trabajo en el marco del Convenio SUBDERE- CEPAL. El documento plantea una guía para obtener la zonificación de cuencas hidrográficas con lo cual se identificará aquellas zonas de conveniencia de protección, que debiesen ser protegidas por sus valores, las zonas que deben ser utilizadas con condiciones referidas a mayores requisitos para la implementación de actividades, siendo necesaria la presentación de planes de manejo y adecuación del procesos productivo y tecnología, y las zonas adecuadas para desarrollo productivo las cuales permiten la realización de cualquier tipo de actividad dentro de lo que dispone la ley (Convenio SUBDERE- CEPAL, 2013).
- *“Determinación de áreas estratégicas para el abastecimiento hídrico de la zona urbana del municipio de Ortega - Tolima a través de ArcGis 10.2.2”*, autor: Andrés Fidel Tafur, año 2016. Trabajo de grado de Especialización en Sistemas de Información Geográfica, en el cual se abordó el manejo de las herramientas geoinformáticas para la determinación de áreas estratégicas a partir de la oferta hídrica. Como resultado final se logró la identificación de 98 corrientes de primer orden las cuales se georreferenciaron espacialmente y de esta forma se generó un mapa que ilustra las áreas de mayor importancia estratégica de la cuenca del Río Anaba y los ecosistemas que incidan en un área de influencia de 100 metros a la redonda (Tafur, 2016).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Zonificar los sectores estratégicos para el abastecimiento de agua en el municipio de Madrid, Cundinamarca.

3.2 Objetivos específicos

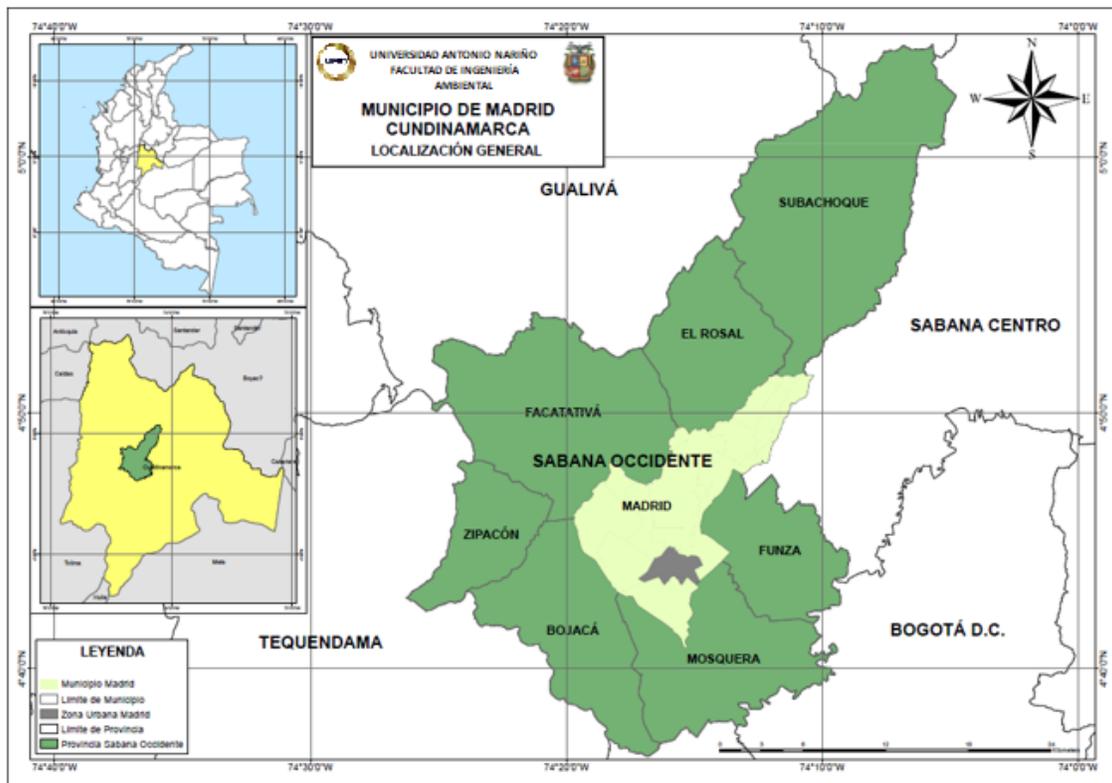
- Identificar la zona hidrográfica, las estaciones meteorológicas y las variables a utilizar en la zonificación.
- Definir los criterios de susceptibilidad para la zonificación, mediante la aplicación de metodologías existentes para la identificación de la oferta hídrica de la zona.
- Determinar los sectores estratégicos para el abastecimiento de agua en el municipio a través de la zonificación con aplicación de herramientas SIG, mediante la construcción de un modelo y matriz de decisión.

4. METODOLOGÍA

4.1 Área de Estudio:

El municipio de Madrid se localiza en el departamento de Cundinamarca y pertenece a una de las 15 provincias de Cundinamarca, llamada Sabana de Occidente (Figura 2). El municipio es atravesado por dos importantes vías de orden regional y nacional, que comunican a la capital con el occidente: la autopista Medellín y la Troncal de Occidente, y se encuentra a 21 kilómetros de Bogotá, en el segundo anillo metropolitano. Madrid tiene una extensión total de 120,5 Km², distribuida en 7,5 Km² de área urbana y 113 Km² de área rural. Su economía está enmarcada en el sector industrial, agricultura, ganadería y floricultura. (Alcaldía de Madrid, n.d.)

Figura 2: Localización Municipio de Madrid



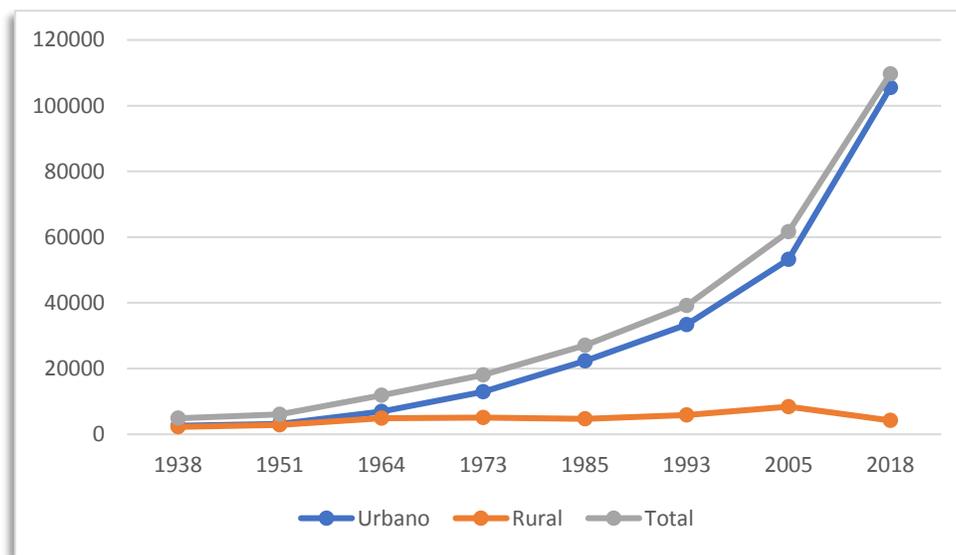
Fuente: Elaboración propia, a partir de base cartográfica IGAC (2013)

Madrid, Cundinamarca, cuenta con varios recursos hídricos superficiales siendo los principales el río Subachoque y el río Bojacá de cuya unión nace el río Balsillas, que desemboca en el río Bogotá. El Río Subachoque nace a una altura de 3.700 msnm e inicia su recorrido por el municipio de Madrid en la zona norte del mismo, constituyendo el límite

noroccidental de Madrid con los municipios de Facatativá y El Rosal en un recorrido de 45.27 Km por el municipio de Madrid. El Río Bojacá recorre el límite sur del Municipio de Madrid constituyéndose en el límite de este con los municipios de Bojacá y Mosquera, en un recorrido total de 15,89 kilómetros a su paso por Madrid (SMAC LTDA, 2013). También cuenta con ecosistemas de humedales, distrito de manejo especial “La Herrera” (CAR, 2019), además de una fuente externa de abastecimiento para consumo humano, realizado a través de la compra de agua en bloque a la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo S.A. E.S.P – EAAA, de la ciudad de Bogotá (Alcaldía de Madrid, n.d.)

Madrid ha tenido un crecimiento poblacional importante en los últimos 13 años, al pasar de 61.599 habitantes en el año 2005 a 109.696 habitantes en el 2018 (DANE, 2018) (Figura 3)

Figura 3: Crecimiento poblacional Madrid, Cundinamarca



Fuente: Consulta base de datos DANE, 2021.

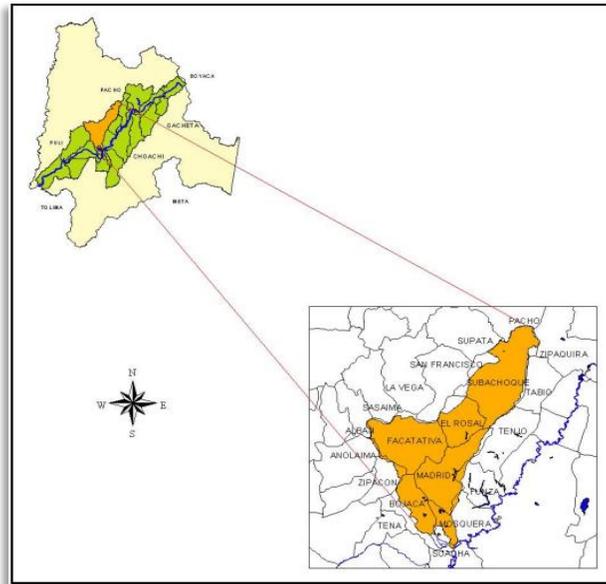
4.2 Fases de trabajo:

La metodología planteada para el desarrollo de este trabajo está dividida en fases:

4.2.1 FASE 1: IDENTIFICACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

A partir de la localización espacial del municipio de Madrid, se validó con las capas de información de la zonificación hidrográfica de Colombia, encontrando que el municipio de Madrid se encuentra dentro de la Zona Hidrográfica del Río Bogotá,

Figura 4: Localización geográfica de la cuenca Media río Bogotá



Fuente: SIG, CAR. 2005

4.2.2 FASE 2: SELECCIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y EXTRACCIÓN DE LOS DATOS

Para el presente trabajo, se descargó el Catálogo Nacional de Estaciones 2017, desde la página de datos abiertos del IDEAM. Así mismo, se definió como periodo de tiempo para el análisis de datos un rango de 20 años, entre 1998 y 2018, debido a que se cuenta con datos más completos para el cálculo de la precipitación, temperatura, evapotranspiración y balance hídrico. Inicialmente se seleccionaron aquellas pertenecientes al departamento de Cundinamarca y entre éstas se identificó la presencia de 6 estaciones dentro del municipio de Madrid. Sin embargo, por el bajo número de estaciones y las amplias zonas del municipio que no tienen una estación meteorológica, se definió utilizar la herramienta *Creates Thiessen polygons* que permite identificar el área de influencia de cada estación y si ésta se encuentra dentro del municipio. Como resultado de este análisis se seleccionaron en total 10 estaciones, de las cuales se escogieron aquellas que se encuentran activas, cuyo tiempo de actividad se halla dentro del rango de tiempo definido para este trabajo y con disponibilidad de datos (Tabla 1).

Tabla 1: Estaciones IDEAM de zona de estudio

Código	Nombre	Categoría	Estado	Fecha Instalación	Fecha Suspensión	Departamento	Municipio	Entidad
21206060	CASABLANCA [21206060]	Meteorológica Especial	Activa	1976-09-15		Cundinamarca	Madrid	IDEAM
21205770	BASE AEREA MADRID [21205770]	Climática Ordinaria	Activa	1974-07-15		Cundinamarca	Madrid	IDEAM
21206200	TUNDAMA [21206200]	Climática Ordinaria	Suspendida	1986-08-15	1992-02-15	Cundinamarca	Mosquera	IDEAM
21205870	SALITRE EL [21205870]	Meteorológica Especial	Activa	1976-09-15		Cundinamarca	Bojacá	IDEAM
21205880	FLORES CHIBCHA [21205880]	Meteorológica Especial	Activa	1976-09-15		Cundinamarca	Madrid	IDEAM
21205980	PROVIDENCIA GRANJA [21205980]	Climática Ordinaria	Activa	1977-02-15		Cundinamarca	Tenjo	IDEAM
21201550	ROBLE EL [21201550]	Pluviómetrica	Activa	1985-07-15		Cundinamarca	Madrid	IDEAM
21201210	HATO EL [21201210]	Pluviómetrica	Activa	1978-06-15		Cundinamarca	Tenjo	IDEAM
21201140	ESPERANZA LA [21201140]	Pluviómetrica	Activa	1974-07-15		Cundinamarca	Tenjo	IDEAM
21201270	TIBAR EL [21201270]	Pluviómetrica	Suspendida	1980-12-15	2002-02-15	Cundinamarca	Madrid	IDEAM

Fuente: IDEAM

Para mejorar la cantidad de datos y el cubrimiento, se tomaron las estaciones de otras entidades, entre las que se encuentra la CAR – Corporación Autónoma Regional y la EAAB – Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, a las que también se aplicó la herramienta *Creates Thiessen polygons*, identificando 14 estaciones que tienen su área de influencia en el municipio. De este grupo de estaciones, se descartaron las de categoría Limnigráfica y Limnimétrica y se seleccionaron aquellas que se encuentran activas, cuyo tiempo de actividad se encuentra dentro del rango de tiempo definido para este trabajo y con disponibilidad de datos abiertos, quedando 4 estaciones (Tabla 2).

Tabla 2: Estaciones de otras entidades

Código	Nombre	Categoría	Estado	Fecha Instalación	Fecha Suspensión	Departamento	Municipio	Entidad
21200680	PTE LARGO [21200680]	Pluviómetrica	Suspendida	1958-11-15	1961-01-15	Cundinamarca	Madrid	EAAB
21205430	CORZO STA TECLA [21205430]	Climática Ordinaria	Suspendida	1958-01-15	1967-11-15	Cundinamarca	Facatativá	EAAB
35020440	AMARILLOS LOS [35020440]	Pluviómetrica	Activa	1966-01-15		Bogotá	Bogota, D.C	EAAB
21205440	LOYOLA [21205440]	Climática Ordinaria	Suspendida	1956-07-15	1957-05-15	Cundinamarca	Facatativá	EAAB
21200750	BOJACA [21200750]	Pluviómetrica	Activa	1960-03-15		Cundinamarca	Bojacá	CAR
21200100	PENAS BLANCAS [21200100]	Pluviómetrica	Suspendida	1933-01-15	1933-08-15	Cundinamarca	Madrid	MINISTERIO DE AGRICULTURA
21200690	TESORO-VERTIENTES [21200690]	Pluviómetrica	Activa	1931-08-15		Cundinamarca	Facatativá	CAR
21200710	MARGARITAS LAS [21200710]	Pluviómetrica	Activa	1959-08-15		Cundinamarca	Subachoque	CAR
21205570	PRIMAVERA LA [21205570]	Climática Principal	Activa	1965-06-15		Cundinamarca	Subachoque	CAR
21205280	TENJO [21205280]	Climática Ordinaria	Suspendida	1943-08-15	1949-12-15	Cundinamarca	Tenjo	MINISTERIO DE AGRICULTURA
21205140	MOSQUERA [21205140]	Climática Ordinaria	Suspendida	1936-09-15	1950-11-15	Cundinamarca	Mosquera	MINISTERIO DE LA ECONOMIA
21201390	MADRID [21201390]	Pluviómetrica	Suspendida	1965-04-15	1980-10-15	Cundinamarca	Madrid	CAR
21205020	BELKIS-MADRID [21205020]	Climática Ordinaria	Suspendida	1925-07-15	1948-02-15	Cundinamarca	Madrid	MINISTERIO DE LA ECONOMIA
21200820	CORCEGA [21200820]	Pluviómetrica	Suspendida	1961-01-15	1964-07-15	Cundinamarca	Facatativá	ESTACIONES PARTICULARES

Fuente: IDEAM

Con todo lo anterior, se obtuvo un total de 6 estaciones meteorológicas dentro del área de influencia y de las que se tiene información (Tabla 3).

Tabla 3: Estaciones seleccionadas en área de estudio

Código	Nombre	Categoría	Estado	Fecha Instalación	Fecha Suspensión	Departamento	Municipio	Entidad
21200750	BOJACA [21200750]	Pluviómetrica	Activa	1960-03-15		Cundinamarca	Bojacá	CAR
21200690	TESORO-VERTIENTES [21200690]	Pluviómetrica	Activa	1931-08-15		Cundinamarca	Facatativá	CAR
21200710	MARGARITAS LAS [21200710]	Pluviómetrica	Activa	1959-08-15		Cundinamarca	Subachoque	CAR
21205570	PRIMAVERA LA [21205570]	Climática Principal	Activa	1965-06-15		Cundinamarca	Subachoque	CAR
21205770	BASE AEREA MADRID [21205770]	Climática Ordinaria	Activa	1974-07-15		Cundinamarca	Madrid	IDEAM
21205980	PROVIDENCIA GRANJA [21205980]	Climática Ordinaria	Activa	1977-02-15		Cundinamarca	Tenjo	IDEAM

Fuente: Autor, a partir de información de IDEAM

4.2.3 FASE 3: TABULACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Se procedió a calcular los parámetros climáticos

- Precipitación: Para este parámetro, se tomaron las precipitaciones medias mensuales multianuales, en el periodo 1999 al 2018. Con estos valores se obtuvieron las medias anuales de las que se obtiene el promedio de precipitación para cada estación. Este nuevo dato se integró en la tabla de atributos de las estaciones meteorológicas. Para la determinación de la precipitación media en el área de estudio, se realiza el método Inverse Distance Weighted (ponderación por distancia), obteniendo así el ráster de precipitación.
- Temperatura: Para determinar la Temperatura dentro del área de estudio y su comportamiento, se tuvieron en cuenta los datos de las estaciones seleccionadas dentro de la zona de influencia; sin embargo, no todas las estaciones cuentan con datos completos por lo que se hace necesario realizar el cálculo de la temperatura a partir de su relación con la altura sobre el nivel del mar. Consultando bibliografía, se encuentra una metodología presentada por Cenicafé, la cual parte de la premisa de que la temperatura del aire cambia según la altitud: a mayor altitud menor temperatura. Proponen una serie de expresiones que permiten calcular con gran confiabilidad los valores de temperatura media, la máxima media y la mínima media de un lugar determinado a partir de la altitud sobre el nivel del mar para cada una de las 5 regiones naturales de Colombia (Jaramillo-Robledo, 2005). En el caso del área de estudio, esta se encuentra localizada en la región Andina, para la cual aplica la siguiente expresión en el cálculo de la temperatura media:

$$T_m = 29,42 - 0,00031 A$$

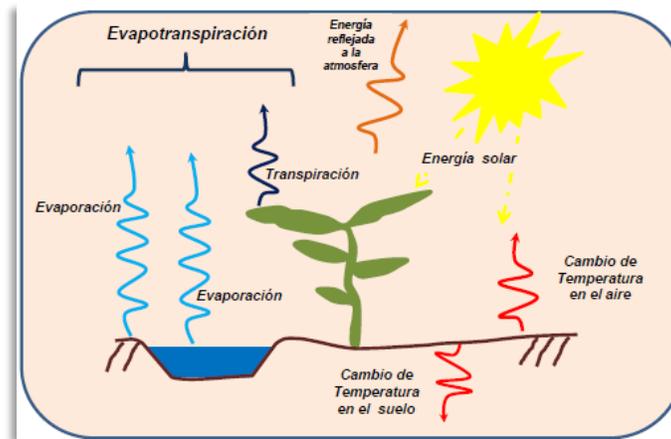
donde T_m es la temperatura media y A es la altitud en metros.

Seguidamente, se calculó el promedio de las medias mensuales multianuales para las estaciones del área de estudio a las que se les aplica el modelo de regresión entre la temperatura media anual (Y en °C) y la altitud (X en m), para una altitud de 0m; estos valores se adjuntan a la tabla de atributos del shapefile de estaciones y se interpolan los valores de temperatura a través del método IDW para obtener la capa ráster que representa espacialmente la distribución de temperatura a una altura de 0 metros. A la interpolación de la temperatura obtenida se agregó el modelo digital del terreno (DEM)

a 30 metros, con el cual se ajustó la temperatura determinada a 0 m de acuerdo con el gradiente altitudinal, por medio de la Raster Calculator.

- Evapotranspiración: La evapotranspiración es la cantidad de agua que retorna a la atmósfera, tanto por transpiración de la vegetación como por evaporación del suelo. Su magnitud depende del agua realmente disponible, así como la que ha sido interceptada por la vegetación (Ordóñez Gálvez, 2011, p. 24)(Figura 5).

Figura 5: Componentes de la evapotranspiración



Fuente: Ordóñez Gálvez, 2011 que lo tomó de Watplan.com

De acuerdo con la información disponible, es decir los ráster de precipitación media anual y de temperatura promedio anual, se definió utilizar la fórmula de cálculo de evapotranspiración de Turc, con la que se obtiene la evapotranspiración real (ETR) que se define la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración (Ordóñez Gálvez, 2011).

La fórmula de Turc permite determinar la evapotranspiración comparando las precipitaciones:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde: $L = 300 + 25 * t + 0.05 * t^3$

$ETR =$ Evapotranspiración real en mm/año

$P =$ Precipitación en mm/año

$T = \text{Temperatura media anual en } ^\circ\text{C}$

Fuente: (Ordonez Gálvez, 2011)

Este cálculo se realizó con la herramienta de ArcGis Raster Calculator, con la que se obtiene una capa ráster con los valores de evapotranspiración para la zona de estudio. La ecuación aplicada es la siguiente:

$$(\$n1_interpolacion_precip_lim) / (0.9 + ((\$n1_interpolacion_precip_lim ** 2) / ((300 + (25 * \$n2_temp_madrid_ajust) + (0.05 * (\$n2_temp_madrid_ajust ** 3))) ** 2))) ** 0.5$$

4.2.4 FASE 4: CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO

Para el cálculo del balance hídrico, se aplicó la ecuación del método del balance hidrológico de largo plazo, con la finalidad de hallar la oferta del recurso hídrico teniendo en cuenta su distribución espacial y temporal. El volumen de control considerado está conformado por las columnas de agua y suelo, donde la frontera horizontal está definida por la divisoria de la cuenca, para este ejercicio es el límite del área de estudio; el borde inferior de la columna de suelo es un estrato impermeable y el borde superior de la columna atmosférica es su tapa (Amaya et al., 2009, p. 30):

$$\text{Caudal Medio} = \int_{\text{Área}} [P(x,y) - E(x,y)] dA$$

Donde, $P(x, y)$ es la precipitación media multianual que recibe el punto (x, y) en el período considerado (mm/año), $E(x, y)$ es la lámina de agua que se pierde por evapotranspiración real en el punto (x, y) en el mismo período (mm/año), y dA es un diferencial de área de la zona de estudio (m^2). Este cálculo se realizó con la herramienta Raster Calculator con la siguiente expresión:

$0.00000000317 * ("strm_madrid_planas_area" * ("interpolacion_precip_lim" - "evapotranspiracion_madrid"))$

Donde: $0.00000000317 = \text{factor de conversión de } \text{m}^3/\text{año a } \text{m}^3/\text{s}$

$strm_madrid_planas_area = dA = \text{área del píxel de la zona de estudio}$

$interpolacion_precip_lim = P = \text{precipitación media del área de estudio}$

$evapotranspiracion_madrid = E = \text{evapotranspiración real del área de estudio}$

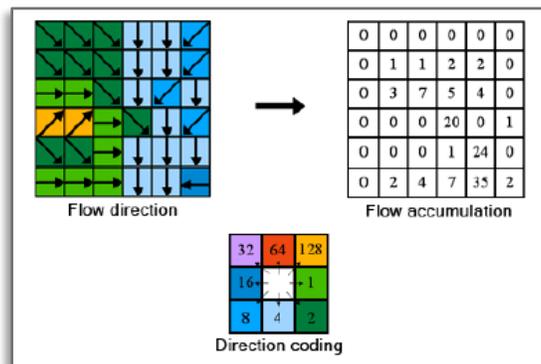
4.2.5 FASE 5: DELIMITACIÓN PRELIMINAR DE ZONAS DE IMPORTANCIA PARA LOS DRENAJES

Por medio de herramientas hidrológicas del software Arcgis, se procedió a modelar el flujo de agua a través del modelo de elevación digital (DEM) obtenido de Earthdata, misión SRTM, con una temporalidad de 2000-02-11 a 2000-02-21 y una resolución espacial de 30 metros. Este DEM se delimita para la zona de estudio.

La metodología aplicada se basa en el Manual de ArcGIS 10 Intermedio, Capítulo V. Análisis Hidrológico y Morfométrico de Cuencas, a partir del paquete de herramientas hidrológicas, que se encuentran en la ruta *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology* (Puerta, 2013). Se siguieron los siguientes pasos:

- i. Rellenar la superficie del DEM para eliminar las imperfecciones existentes, esto se realiza con la herramienta *Fill*.
- ii. Determinar la dirección del flujo, es decir hacia dónde corre el agua; esto se hace con la herramienta *Flow Direction*
- iii. Crear ráster de flujo acumulado, que se define como la cantidad de agua que fluye dentro de la celda desde todas las celdas que drenan hacia ella (Figura 6). Se usó la herramienta *Flow Accumulation* y como insumo el ráster generado en el paso anterior.

Figura No. 6: Modelo de Acumulación de Flujo

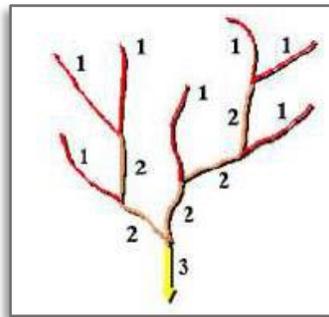


Fuente: Puerta, (2013)

- iv. Clasificar las celdas con acumulación de flujo superior a un umbral especificado, para este caso se define el valor 100. Esto significa que se descartaron los drenajes más pequeños de la red. Para esto se usó la función Condicional (Con) de la herramienta *Raster Calculator*, así: *Con ("DEM_planas_fill_FlowDir_Accum" > 100, 1)*.

- v. Dividir el cauce en segmentos no interrumpidos, que son segmentos que conectan dos uniones sucesivas, una unión y un punto de desagüe o una unión y una división del área de drenaje; para ello se usó la herramienta *Stream Link*.
- vi. Realizar la clasificación del orden de las cuencas usando el método de Strahler, usando el ráster creado anteriormente y el ráster de dirección de flujo, esto con la herramienta *Stream Order*. El método de Strahler se basa en la jerarquía de los afluentes; el ordenamiento de Strahler asigna el orden 1 a todos los nacimientos, es decir, las corrientes que no se bifurcan cuando se recorren hacia aguas arriba (Figura 7). Al avanzar aguas abajo, cuando dos corrientes de igual orden ω se juntan, forman una corriente de orden $\omega + 1$ y cuando dos corrientes de orden diferente se encuentran, el canal aguas abajo preserva el orden del mayor de los dos. Esto se aplica a lo largo de toda la red, y ordena todos los segmentos (Mesa, 2018).

Figura 7: Clasificación de Redes Método Strahler



Fuente: Puerta, (2013)

- vii. Crear el shapefile de drenajes con su respectivo número de nivel de orden dentro de la cuenca con la herramienta *Stream to Feature*
- viii. Con los drenajes como shapefile, se aplicó el buffer de 100 metros, el cual corresponde al área a de influencia para todos los drenajes.

4.2.6 FASE 6: ZONIFICACIÓN DE SECTORES ESTRATÉGICOS

En la zonificación de los sectores estratégicos para el abastecimiento de agua en el municipio de Madrid, se planteó un modelo que permite obtener la zonificación a partir del análisis de la capacidad física del territorio desde dos aspectos: la Aptitud Hídrica y la Aptitud del Suelo (Figura 8).

Figura 8: Modelo de zonificación de áreas estratégicas



Fuente: Autor

La Aptitud Hídrica, que es la capacidad intrínseca del territorio para la producción de agua y se clasifica en una aptitud alta, media o baja a partir de la unión de las siguientes capas de información:

- Balance hídrico, obtenido en el desarrollo de la Fase 4. Este se transformó en un formato vectorial con la categorización planteada en ese proceso, dándole una ponderación de 60% dado que representa la oferta del recurso hídrico en el territorio.
- Área de influencia de los drenajes, obtenido en el desarrollo de la Fase 5. Se le aplicó una categorización en función del orden de los drenajes, dándole más peso a los drenajes de primer orden y menor peso a los drenajes de sexto orden (Tabla 4). A esta capa de información se le otorgó una ponderación de 40% sobre la aptitud hídrica.

Tabla 4: Categoría de áreas de influencia de los drenajes

Orden drenaje	Id Categoría
Orden 1	3
Orden 2	2
Orden 3	
Orden 4	1
Orden 5	
Orden 6	

Fuente: Autor

La Aptitud del Suelo, que representa las mejores características y menores conflictos del suelo en términos de su cobertura para la conservación de los ecosistemas, se clasifica en una aptitud alta, media o baja a partir de la unión de las siguientes capas de información:

- Cobertura del suelo de Corine Land Cover, obtenida de datos abiertos de IDEAM, a la que se le aplicó una categorización (Tabla 5). A esta capa de información se le otorgó una ponderación de 60%.

Tabla 5: Categorías de Cobertura de suelo

código	Leyenda	Id Categoría	Categoría
111	1.1.1. Tejido urbano continuo	1	Bajo
112	1.1.2. Tejido urbano discontinuo		
121	1.2.1. Zonas industriales o comerciales		
124	1.2.4. Aeropuertos		
131	1.3.1. Zonas de extracción minera	2	Medio
2151	2.1.5.1. Papa		
225	2.2.5. Cultivos confinados		
231	2.3.1. Pastos limpios		
233	2.3.3. Pastos enmalezados		
241	2.4.1. Mosaico de cultivos		
242	2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos		
243	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales		
244	2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	3	Alto
315	3.1.5. Plantación forestal		
3221	3.2.2.1. Arbustal denso		
3222	3.2.2.2. Arbustal abierto		
3232	3.2.3.2. Vegetación secundaria baja		
411	4.1.1. Zonas pantanosas		

Fuente: Autor

- Conflictos de uso del suelo, obtenida de datos abiertos de IGAC y de la aplicación de la categorización (Tabla 6); se le asignó la ponderación de 40%.

Tabla 6: Categorización de Conflictos de uso del suelo

UCConfli	Tipo Conflicto	Id Categoría	Categoría
Cpc	Conflictos en áreas pantanosas con pastos	1	Con Conflicto
CM	Conflictos mineros		
CO	Conflictos por obras civiles		
CU	Conflictos urbanos		

UCConfli	Tipo Conflicto	Id Categoría	Categoría
O3	Sobreutilización severa		
U3	Subutilización severa	2	Conflicto Moderado
ZU	Otras coberturas artificializadas (urbanas y suburbanas)		
O2	Sobreutilización moderada		
U1	Subutilización ligera	3	Bajo Conflicto
U2	Subutilización moderada		
A	Usos adecuados o sin conflicto		

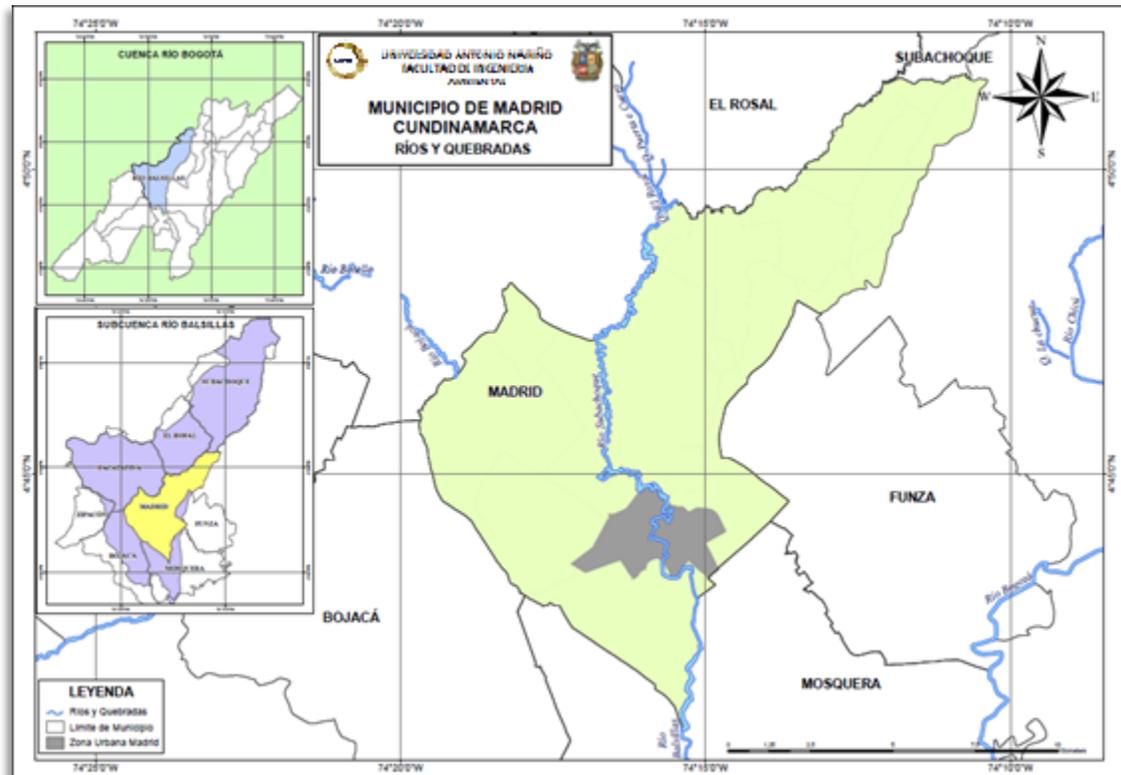
Fuente: Autor

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 FASE 1: Identificación de la cuenca hidrográfica en el área de estudio.

Al analizar la información que se encuentra en formato shapefile, se define que el municipio de Madrid se localiza dentro de la Subzona Hidrográfica del Río Balsillas (Figura 9).

Figura 9. Ubicación de Madrid en la cuenca hídrica

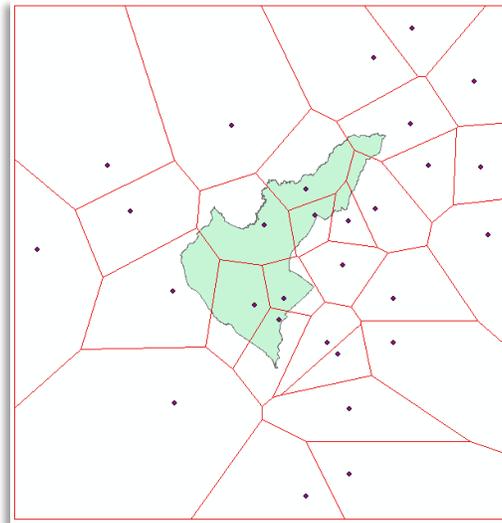


Fuente: Elaboración propia, a partir de base cartográfica IGAC, 2013

5.2 FASE 2: Selección de estaciones meteorológicas y extracción de los datos

A partir de la aplicación de la metodología descrita se determinó el área de influencia de las estaciones cercanas al municipio de Madrid (Figura 10) y tras la validación de información disponible se obtienen las estaciones de la zona de trabajo.

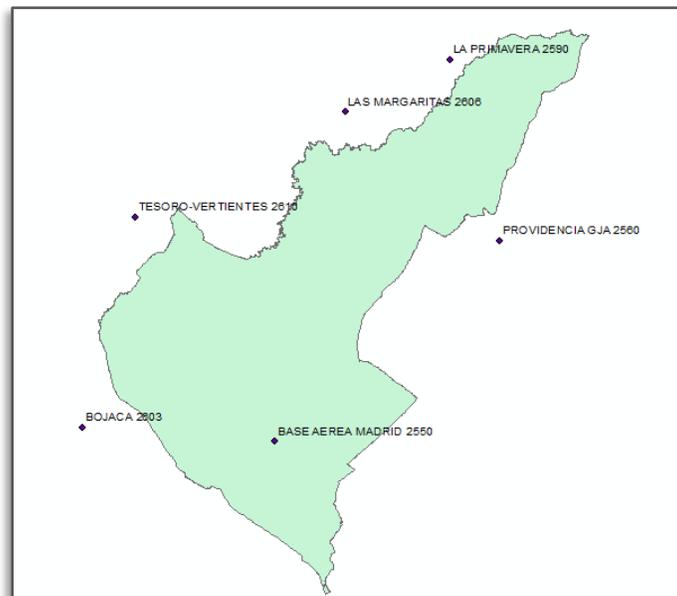
Figura 10: Polígonos de Thiessen



Fuente: Elaboración propia

En total se seleccionaron 6 estaciones meteorológicas, 2 del IDEAM y 4 de la Corporación Autónoma Regional (CAR) (Figura 11).

Figura 11: Localización de estaciones seleccionadas en área de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de información de IDEAM

Se encontró que la cantidad de estaciones y de datos obtenidos de las mismas es una limitante en el estudio y puede inferir en los resultados de este. Sin embargo, con el cálculo de temperatura a partir de la altura sobre el nivel del mar de las estaciones se logra completar los datos necesarios para el análisis.

5.3 FASE 3: Tabulación de la información de las estaciones meteorológicas

➤ Precipitación:

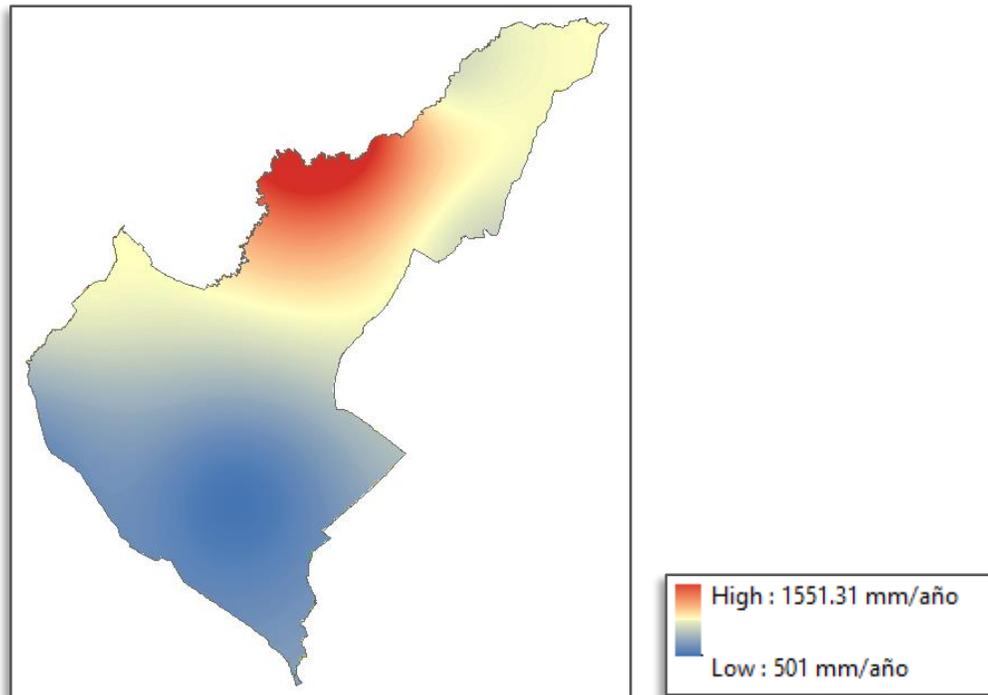
A partir de los datos de las estaciones (Tabla 7) y de su interpolación (Figura 12), se puede establecer que la zona sur de Madrid presenta una precipitación baja, mientras que hacia la parte norte del municipio presenta precipitaciones altas.

Tabla 7: Total precipitación mensual multianual para cada estación

Estación	Precipitación Media anual
Bojacá	539.07
La Primavera	815.25
Tesoro - Vertientes	927.46
Las Margaritas	1'646.90
Base Aérea Madrid	501.00
Providencia Gja	786.00

Fuente: Autor

Figura 12: Distribución de la precipitación en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se evidencia una precipitación media anual para la zona de estudio de 808,27 mm/año. A partir de lo anterior, se establecen los rangos de distribución para el área de estudio (Tabla 8). Este valor de precipitación media anual es muy aproximado al valor

obtenido en la Evaluación Regional del Agua Cuenca Media Río Bogotá para la subcuenca del río Balsillas, el cual es 815,3 mm/año, lo que da resultados congruentes con la caracterización regional sobre esta variable.

Tabla 8: Rangos de distribución de precipitación

Clase	Rango (mm/año)	Descripción
1	501,00 - 711,06	Muy baja
2	711,06 - 921,12	Baja
3	921,12 - 1.131,19	Moderada
4	1.131,19 - 1.341,25	Alta
5	1.341,25 - 1.551,31	Muy alta

Fuente: Elaboración propia

➤ Temperatura:

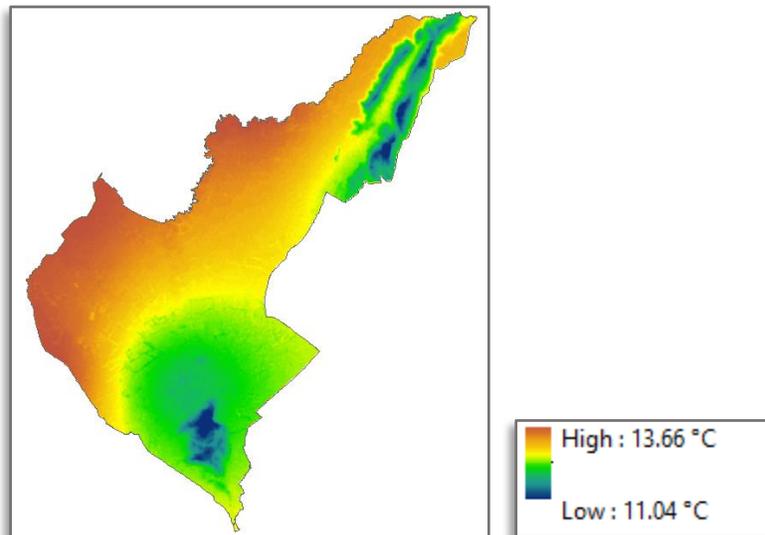
Los valores de temperatura de las estaciones (Tabla 9) y la capa de temperatura promedio anual (Figura 13) permite identificar las mayores temperaturas en la zona baja del municipio localizada al nororiente.

Tabla 9: Temperatura media de las estaciones

Estación	Altura (msnm)	Temperatura media (°C)
Bojacá	2603	*13.54
La Primavera	2590	13.08
Tesoro - Vertientes	2610	*13.50
Las Margaritas	2606	*13.52
Base Aérea Madrid	2550	12.06
Providencia Gja	2560	12.18

Fuente: Cálculo a partir de la información del IDEAM. *Valores calculados a partir de la altitud.

Figura 13: Temperatura promedio anual del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

La temperatura media de la zona de estudio es de 12,78°C. Sin embargo, la variación de temperatura es baja, ya que esta varía en un rango entre 11,04°C y 13,66°C (Tabla 10).

Tabla 10: Rangos de distribución de la temperatura

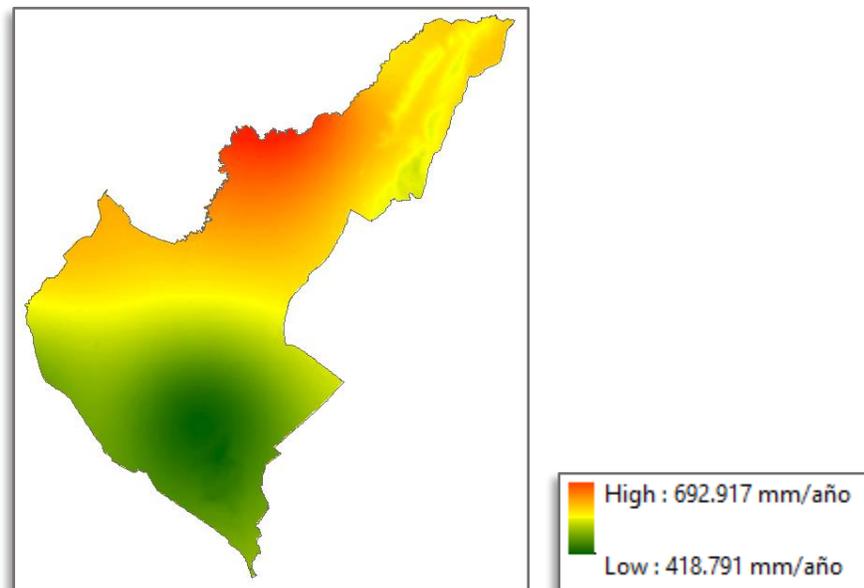
Clase	Rango (°C)	Descripción
1	11,04 - 11,96	Baja
2	11,96 - 12,41	Medio Baja
3	12,41 - 12,81	Moderada
4	12,81 - 13,21	Medio Alta
5	13,21 - 13,66	Alta

Fuente: Elaboración propia

➤ Evapotranspiración

Los mayores valores de evapotranspiración se encuentran en aquellas áreas que cuentan con una alta precipitación y disminuye conforme aumenta la altura del terreno (Figura 14)

Figura 14: Evapotranspiración área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Se definen los rangos de distribución de la evapotranspiración (Tabla 11) y se establece como valor medio para el área de estudio 540,5 mm/año.

Tabla 11: Rangos de distribución de la evapotranspiración

Clase	Rango (mm/año)	Descripción
1	418,79 - 513,39	Bajo
2	513,39 - 595,09	Medio
3	595,09 - 692,92	Alto

Fuente: Elaboración propia

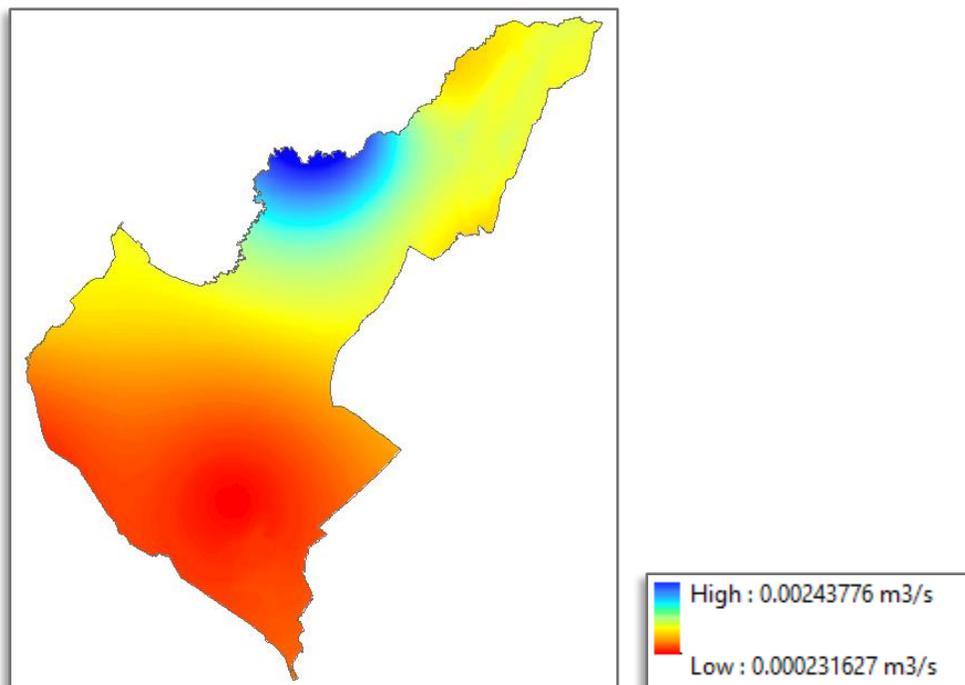
Al comparar este valor medio con el obtenido en la Evaluación Regional del Agua (ERA) Cuenca Media Río Bogotá para la subcuenca del río Balsillas que es de 922,3 mm/año, se evidencia una diferencia por debajo del valor regional. Esta variación puede presentarse por la fórmula empleada y la información disponible. En el estudio realizado para la ERA se tomó la Evapotranspiración potencial (ETP) de las estaciones climatológicas ya procesadas y se calculó para las estaciones pluviométricas a partir de ecuaciones de regresión mensual; con la ETP se realizó el cálculo de la ETR a partir del método de Budyco.

Sin embargo, partiendo de la información recabada de las estaciones del área de estudio y aplicando el modelo de Turc seleccionado luego del análisis bibliográfico, se toma los resultados obtenidos en el presente trabajo como confiables para los objetivos establecidos.

5.4 FASE 4: Cálculo del balance hídrico

Se obtuvo la distribución del balance hídrico en la zona de estudio identificando zonas con mayor y menor oferta hídrica (Figura 15). En términos generales, la mayor parte del área del municipio cuenta con una oferta hídrica baja lo que puede representar un riesgo para el mantenimiento del recurso hídrico y la provisión de los drenajes que recorren el municipio.

Figura 15: Balance hídrico en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Se define una clasificación del balance hídrico (Tabla 12) y se determina como valor medio para el área de estudio de 0,00076548 m³/s.

Tabla 12: Rangos de distribución del balance hídrico

Clase	Rango (m ³ /s)	Descripción
1	0,00023 - 0,00067	Bajo
2	0,00067 - 0,00133	Medio
3	0,00133 - 0,00244	Alto

Fuente: Elaboración propia

El valor medio determinado es menor al calculado en el estudio de la Evaluación Regional del Agua Cuenca Media Río Bogotá, en la cual se tiene un balance hídrico promedio para la subcuenca del río Balsillas de 2.98 m³/s. Uno de los factores puede ser el acceso a la información meteorológica, así como la baja extensión del municipio que reduce la información a usar para el estudio.

Si bien, este estudio de balance hídrico permite definir los valores del área de estudio relacionando la entrada de agua (precipitación) y la pérdida (evapotranspiración), hay elementos que pueden complementar este análisis. De acuerdo con Pladeyra (2003), citado en (Ordonez Gálvez, 2011) la estimación correcta del balance hidrológico incluye conocer la forma en que el agua que se recibe por precipitación y se reparte entre el proceso de evapotranspiración, escorrentía e infiltración; esta definición se representa en la fórmula general de Balance Hidrológico:

$$P = ETR + ES + I$$

Donde **P** es la precipitación, **ETR** la evapotranspiración, **ES** la escorrentía y **I** la infiltración.

La precipitación y evapotranspiración se han analizado en este documento, sin embargo, quedan dos elementos que no se incluyeron debido a que no formaban parte del alcance de este trabajo, pero que igual juegan un papel importante en la caracterización hidrológica del área de estudio.

El primero es la infiltración, que es el volumen de agua procedente de las precipitaciones que atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros del suelo y del subsuelo. Por lo general, en la ecuación del Balance Hídrico, si la escala temporal del

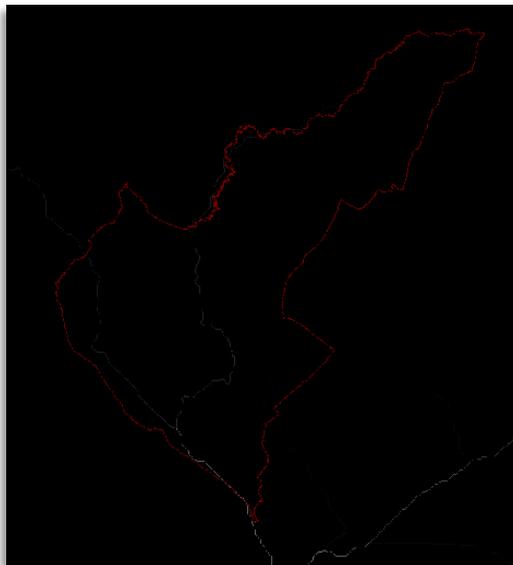
análisis es anual, este valor se asume que su variabilidad es mínima y puede ser considerada cero (Ordonez Gálvez, 2011), por lo que no generaría variabilidad en los resultados expuestos en este documento.

Por su parte la escorrentía representa el agua que no es evaporada ni infiltrada, sino que escurre superficialmente (Ordonez Gálvez, 2011). Un método que se puede aplicar a la estimación de la escorrentía es el índice de humedad topográfica (TWI, por sus siglas en inglés), que refleja la tendencia del suelo a la generación de escorrentías por la precipitación. Se define como $\ln(\alpha / \tan\beta)$ donde α es el área de pendiente ascendente local que drena a través de un cierto punto por unidad de longitud de contorno y $\tan\beta$ es la pendiente local. El TWI se ha utilizado para estudiar los efectos de escala espacial en los procesos hidrológicos y para identificar trayectorias de flujo hidrológico para el modelado geoquímico, así como para caracterizar procesos biológicos como la producción primaria neta anual, los patrones de vegetación y la calidad del sitio forestal (Sørensen et al., 2006). De acuerdo con Sørensen & Seibert, 2007, citado en (Arteaga et al., 2020), permite definir la cantidad de agua subterránea y la humedad presente en el terreno, a partir de datos de elevación provenientes del Modelo Digital de Elevación (DEM), para realizar su respectivo cálculo; el uso del DEM tiene grandes ventajas ya que contienen información totalmente distribuida, espacialmente continua y fácilmente transformable, de allí que la precisión y robustez del TWI depende de la exactitud y escala del DEM utilizado para su generación (Roa Lobo & Kamp, 2012). El TWI brinda una mirada más completa del territorio objeto de estudio, ya que permitiría reconocer las áreas de descarga y recarga de agua; una pendiente suave se encontraría en las partes bajas y tendría un gran potencial de recepción de agua, con una concentración de escurrimiento alta que corresponde a superficies en el terreno donde recibe el escurrimiento de su área inmediata, mientras que una pendiente más pronunciada indicaría que el punto está situado en una zona de recarga. Así mismo, la humedad del suelo en la superficie refleja las condiciones actuales y es más sensible a las características topográficas locales (Sørensen et al., 2006).

5.5 FASE 5: Delimitación preliminar de zonas de importancia para los drenajes

En el ráster de flujo acumulado se logra identificar los principales ríos que atraviesan el municipio (Figura 16).

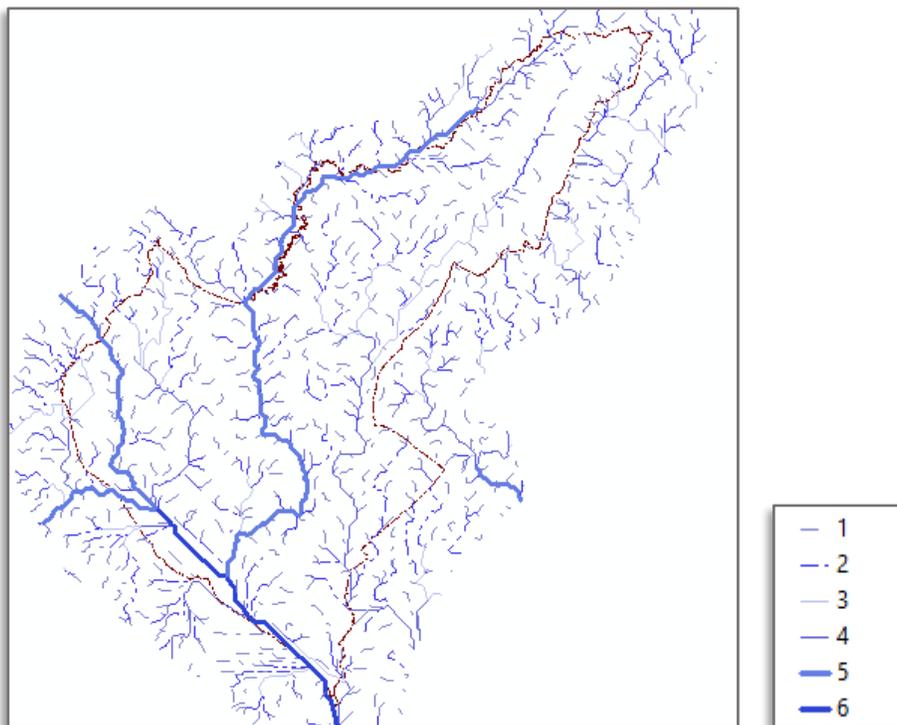
Figura 16: Ráster de flujo acumulado



Fuente: Elaboración propia

Mientras que en el shape de drenajes se observa todos los drenajes presentes en la zona de estudio tipificados en seis categorías (Figura 17), siendo la categoría 1 los nacimientos y la categoría 5 y 6 los drenajes de mayor tamaño, correspondientes al río Subachoque, el río Bojacá y el río Balsillas.

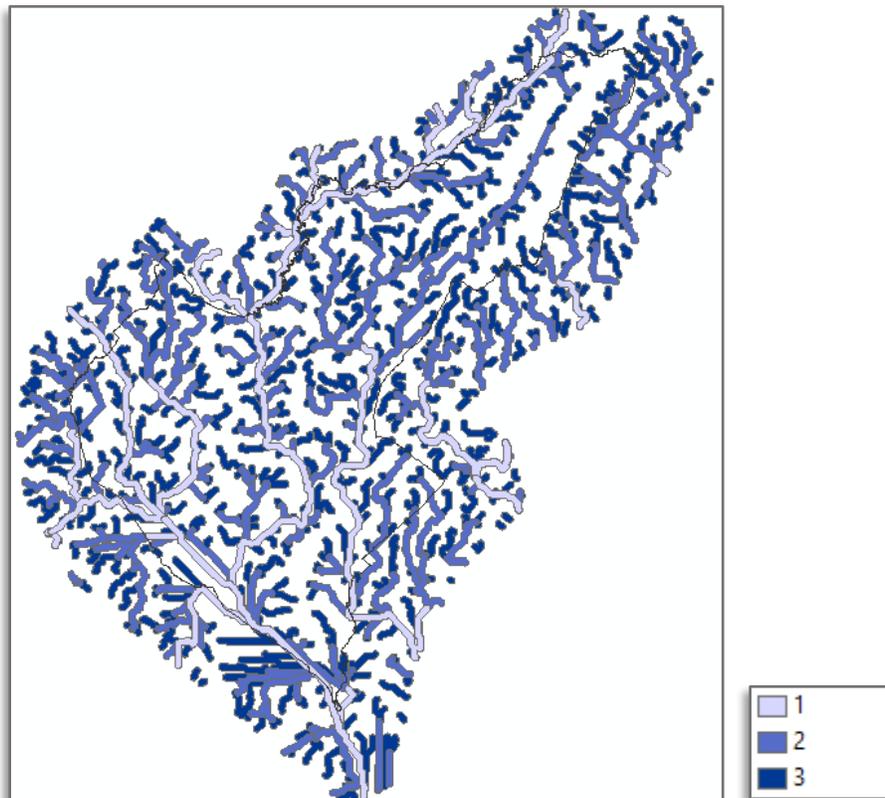
Figura 17: Capa shape de drenajes clasificados por orden



Fuente: Elaboración propia

Las zonas de importancia a nivel de los drenajes permiten identificar las áreas que pueden salvaguardar o impactar el sistema hídrico en presencia de actividad humana (Figura 18). Se define la tipificación en función del orden de los drenajes, siendo las áreas que rodean a los drenajes de menor orden las que adquieren una mayor importancia para el abastecimiento de agua, convirtiéndose en zonas de interés en la conservación ambiental.

Figura 18: Zonas estratégicas iniciales



Fuente: elaboración propia

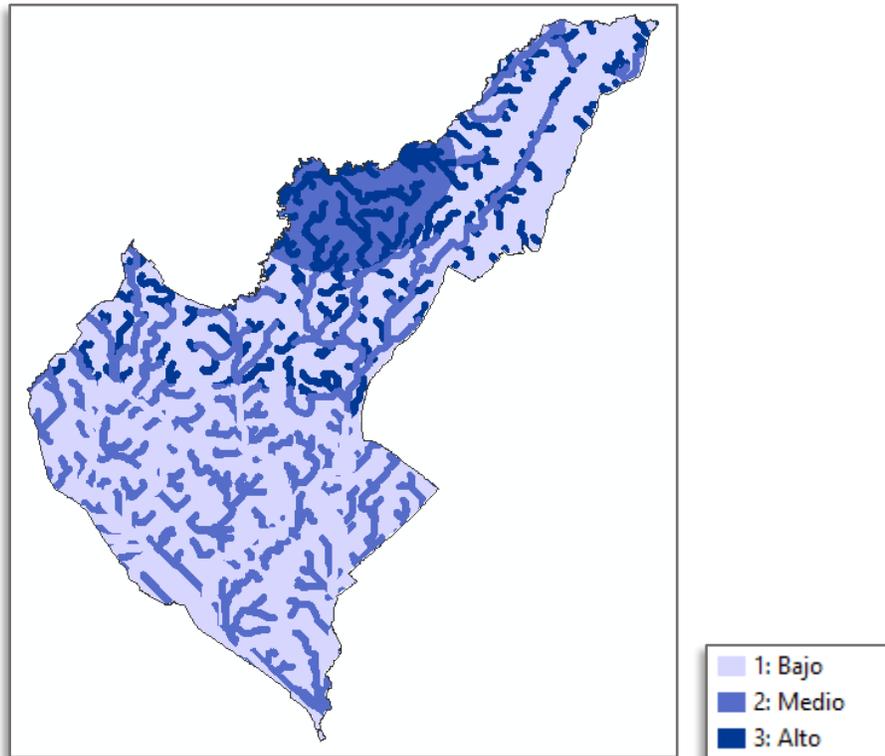
Se obtuvo un total de 14.249,59 Ha, de las cuales 2.082,71 Ha son de la categoría 1, 4.936,12 Ha de categoría 2 y 7.230,76 Ha de categoría 3, la cual reúne las zonas de los drenajes de primer orden.

5.6 FASE 6: Zonificación de sectores estratégicos

Siguiendo el modelo planteado en la metodología, se obtiene las siguientes zonas preliminares:

Aptitud hídrica: Se observa las zonas de importancia para la producción de agua en el área de influencia de los drenajes de menor orden y las áreas con la mayor oferta hídrica (Figura 19).

Figura 19: Aptitud Hídrica en el área de estudio



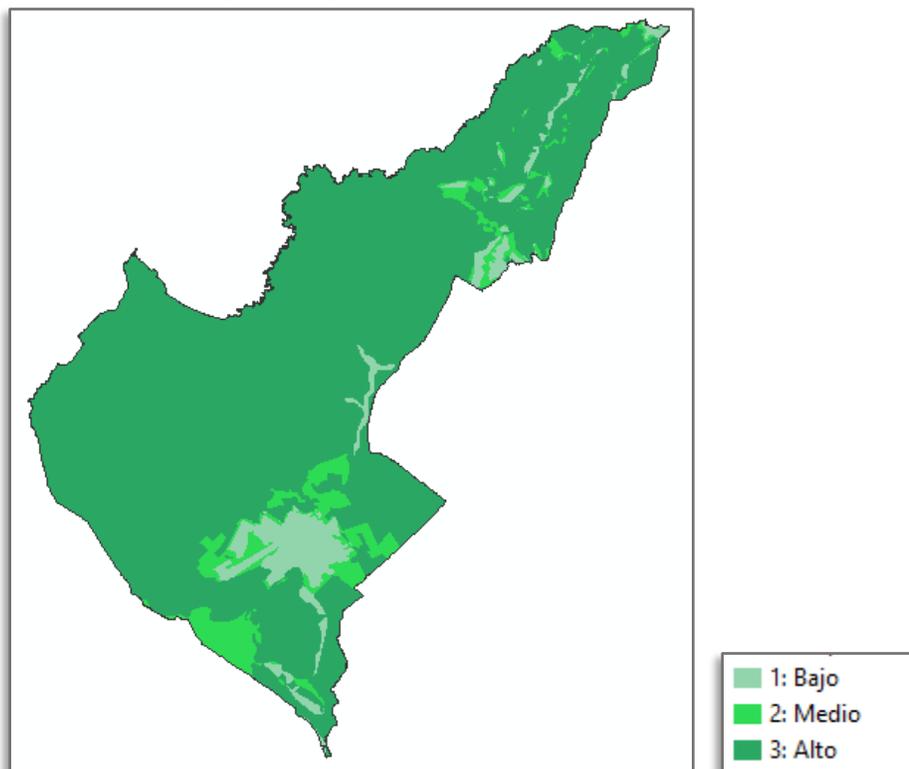
Fuente: Elaboración propia

Se presentan los índices más altos para el componente agua en la zona norte del municipio, donde así mismo se identificó valores favorables de balance hídrico. A diferencia del trabajo realizado por Convenio SUBDERE- CEPAL. (2013) que define 4 zonas basadas en la función hídrica (Zona de producción de agua, Zona de aprovechamiento o preferente de uso, Zona de impacto hídrico y Zona de regulación), en el presente trabajo se definieron en función de la oferta y la capacidad de producción de agua, presentando Aptitud Hídrica alta, media y baja.

Aptitud del Suelo: En el ráster obtenido (Figura 20) se puede identificar unas condiciones favorables en términos de la cobertura del suelo y los conflictos sobre el mismo en gran parte del municipio de Madrid lo que podría favorecer la producción de agua en las fuentes hídricas superficiales y provee al municipio espacios de conservación natural. Por otra parte, las zonas con condiciones desfavorables se localizan principalmente en las áreas urbanas, áreas con cultivos y con explotación minera. Las categorías alta, media y baja de

la Aptitud del Suelo están definidas en función la cobertura y los conflictos de uso, presentando en la categoría Alto suelos con bosque y áreas naturales y bajos o nulos conflictos de uso, mientras que la categoría Bajo esta caracterizada por suelos artificializados y conflictos entre los usos. En tanto el estudio realizado por Convenio SUBDERE- CEPAL. (2013), se clasifica la Aptitud del suelo en función de la potencialidad agroproductiva de los suelos; las categorías son Suelo con potencial agrícola, Suelo con potencial ganadero-forestal y Suelo con potencial para la vida silvestre.

Figura 20: Aptitud del Suelo en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Zonificación de Sectores Estratégicos: La zonificación de los sectores estratégicos para el abastecimiento de agua se obtiene por medio de la aplicación de la Matriz de decisión (Tabla 13) diseñada para este proceso, la cual busca establecer tres tipos de zonas:

- Protección: incluye zonas con coberturas naturales, un balance hídrico alto, bajos o nulos conflictos en el suelo y que incluye las áreas circundantes a los nacimientos de los drenajes. Estas zonas deben ser protegidas, como sectores de restauración ecológica. En general, agrupa sectores con mayor valor ambiental, que cumplen una función ecológica, por lo que deben ser protegidos y/o intervenidos bajo ciertas restricciones.

- Producción con Manejo: zonas con limitaciones al uso, dado que son sectores con cierto grado de fragilidad. En estas zonas se sugiere promover actividades y usos que se desarrollen con medidas encaminadas a minimizar la degradación.
- Producción: cubre las zonas con construcciones, conflictos altos en el uso del suelo y un balance hídrico desfavorable. En esta zona los usos y actividades se pueden ejecutar sin mayores medidas especiales, debido a que los usos ya establecidos no son compatibles con la preservación.

Tabla 13: Matriz de decisión

		APTITUD HIDRICA		
		ALTO	MEDIO	BAJO
APTITUD DEL SUELO	ALTO	PT	PT	PM
	MEDIO	PT	PM	PD
	BAJO	PT	PD	PD
PT: Protección		ZONIFICACIÓN		
PM: Producción con manejo				
PD: Producción				

Fuente: Autor

Los resultados de aplicar la matriz de decisión se muestran en el mapa de áreas estratégicas para el abastecimiento de agua en el municipio de Madrid, Cundinamarca (Figura 21).

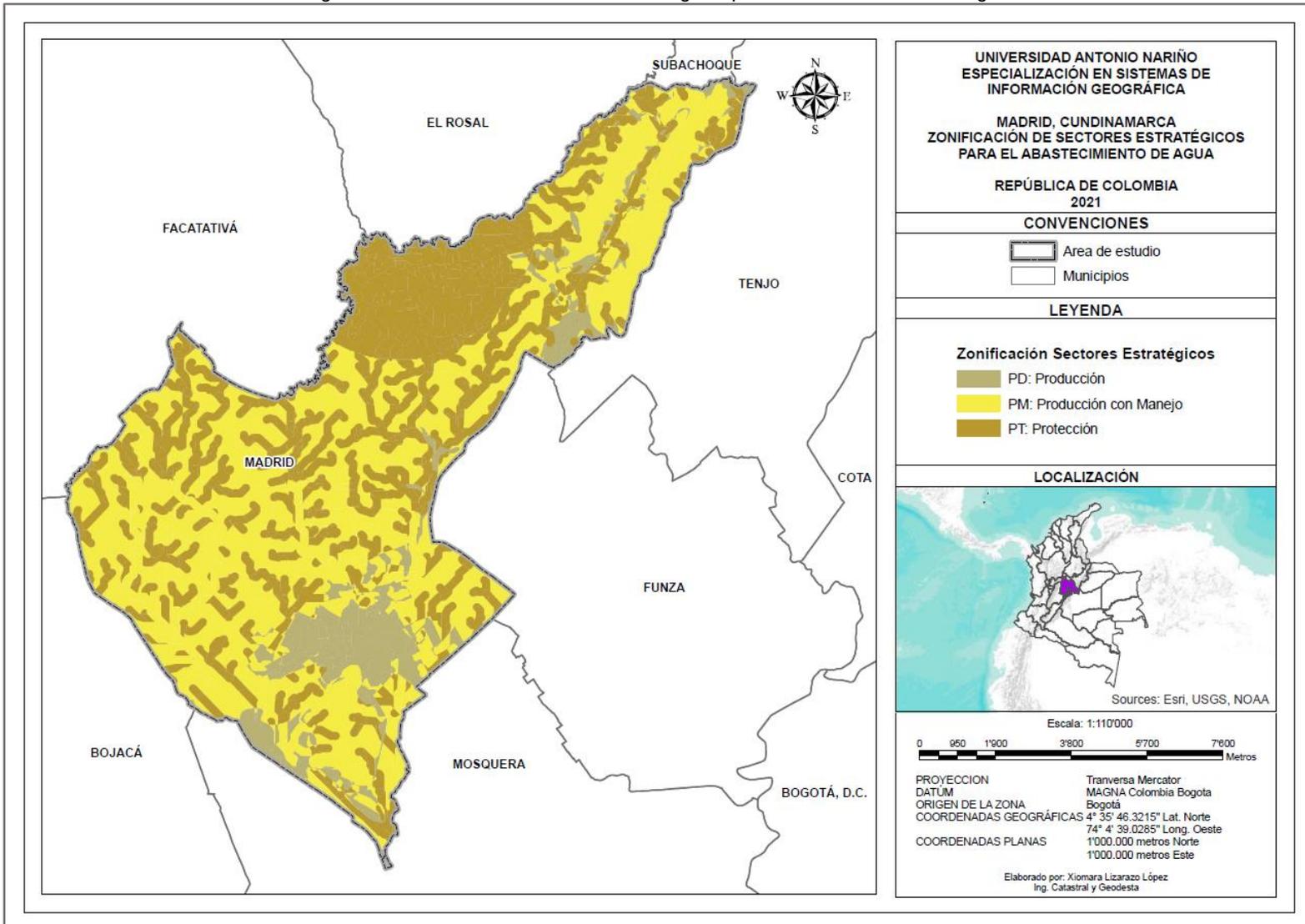
Tal como se evidenció a lo largo de la aplicación de la metodología, la zona con mejores condiciones ecosistémicas se localiza en la parte norte del municipio, definidas como zonas de Protección que cuentan con mayores valores de precipitación, así como cobertura vegetal y también se caracterizan por la localización de los nacimientos de agua, lo que las hacen relevantes en su aporte ambiental, tanto en la regulación como en la provisión del recurso hídrico. Para estas zonas se deben plantear planes que propendan por el cuidado y que incluya la restricción para el desarrollo de ciertos usos o actividades como la minería, la construcción y toda actividad que pueda generar impactos ambientales negativos.

Por otra parte, las zonas de Producción cuentan con pobres condiciones ambientales, se caracterizan por tener un desarrollo urbanístico, la presencia de industrias y actividades mineras, que generan fuertes impactos y degradan los cursos de agua y los ecosistemas que favorecen la provisión de agua. Como estas ya se encuentran consolidadas, las

acciones a aplicar deben estar encaminadas a la educación ambiental, y en el manejo y aprovechamiento del recurso hídrico para los actores que intervienen en estas zonas.

Paras las zonas de Producción con Manejo se sugiere generar planes de manejo y adecuación de los procesos productivos en aras de disminuir los impactos sobre los cursos de agua y el ecosistema circundante a ellos.

Figura 21: Zonificación de sectores estratégicos para el abastecimiento de agua



Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

- Las variables que se pueden implementar en la zonificación no sólo dependen del objetivo que se persiga con la zonificación sino de la disponibilidad de la información. Para el caso de Madrid, se encontraron falencias en la información de las estaciones meteorológicas, ya que algunas de ellas se encontraban suspendidas o con información incompleta lo que llevó a redefinir el periodo de los datos.
- El balance hídrico permite identificar la susceptibilidad hídrica dentro de la zona de estudio. Para el caso del municipio de Madrid, se calculó un balance hídrico promedio de $0,00076548 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Si bien gran parte del municipio tiene valores bajos de balance hídrico, un área importante tiene condiciones adecuadas para ser estratégica en el abastecimiento de agua, debido a la cobertura natural del suelo que favorece los procesos de producción de agua.
- Este estudio permitió identificar que 11.99 Km^2 pertenecen a la zona de Producción, mientras que $61,42 \text{ Km}^2$ pertenecen a la zona de Producción con Manejo y que 49.61 Km^2 a la zona de Protección, lo cual brinda un panorama optimista frente a las zonas estratégicas con las que cuenta el municipio y extiende el compromiso sobre la administración pública para la definición de estrategias de conservación, recuperación y mitigación sobre las zonas identificadas.

7. RECOMENDACIONES

- Para ampliar el estudio y definir con mayor precisión las zonas estratégicas para el abastecimiento de agua, se sugiere incluir información de pendientes a través del índice de humedad topográfica (TWI) que permita reconocer los sectores donde se puede acumular el agua, así como visitas de campo que permitan evidencias algunas características biofísicas y de aprovechamiento del territorio, en especial en las zonas que se definieron como de Protección.
- Dentro del reconocimiento en campo, también se sugiere realizar socialización con los habitantes de las zonas con el fin de reconocer sus actividades y socializar los impactos que estas tienen sobre estas zonas de gran importancia para el abastecimiento de agua, encaminado a generar estrategias conjuntas que permitan disminuir los impactos negativos sobre los ecosistemas.
- El estudio de los sectores estratégicos para el abastecimiento de agua se debe articular con políticas de uso sostenible, tendientes a la conservación y así garantizar el aprovisionamiento del recurso hídrico, en unos niveles adecuados de seguridad hídrica, propendiendo por una mayor independencia hídrica.
- Los resultados de este estudio se pueden articular con el POT y los instrumentos de planificación ambiental, que permitan blindar las áreas definidas como de Protección a través de la definición de usos y manejo del suelo con el fin de viabilizar su conservación y definir estrategias que favorezcan el abastecimiento de agua en el municipio.

8. REFERENCIAS

- (CEPAL)., C. E. para A. L. y el C. (1994). Políticas públicas para el desarrollo sustentable: la gestión integrada de cuencas. In *Cepal* (p. 121).
- Alcaldía de Madrid, C. (n.d.). *Nuestro municipio*. Recuperado 13 de Septiembre 2021.
<http://www.madrid-cundinamarca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Amaya, G., Restrepo Tamayo, C., Vélez, M. V., Vélez, J. I., & Álvarez, O. D. (2009). Modelación Del Comportamiento Hidrológico De Tres Cuencas En El Urabá Antioqueño - Colombia. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 19, 21–38.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=145012892002>
- Arteaga, J., Veliz, L., Giler-Ormaza, A., Félix, J., & Alarcón, J. (2020). Determinación del Índice de Humedad Topográfica para la microcuenca “La Mina” de la costa ecuatoriana. *Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 1(83).
<http://www.dhttps://dilemascontemporaneoseducacionpoliticayvalores.com/index.php/dilemas/article/view/2473/2518>
- Braz, A. M., Mirandola, P. H., Pinto, A. L., Chávez, E. S., & de Oliveira, I. J. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 69–85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>
- CAR. (2019). *Elaboración del diagnostico, prospectiva y formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del río Balsillas*.
<https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac25b19243a8.pdf>
- CAR, C. A. R. de C. (2014). Evaluacion Regional del Agua cuenca Media rio Bogota. In *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*.
- Convenio SUBDERE- CEPAL. (2013). Guía análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial. In C.-S. Centro de Documentación y Publicaciones (Ed.), *Red Madrileña de Lucha contra la Pobreza y la Exclusión Social EAPN* (1st ed.).
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36817/S2014205_es.pdf
- Jaramillo-Robledo, A. (2005). Clima andino y café en Colombia. Cap 6. La Temperatura. In Cencafé (Ed.), *Clima andino y café en Colombia* (pp. 63–74).
<https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/859/8/6.Temperatura.pdf>

- Mesa, O. J. (2018). Cuatro modelos de redes de drenaje. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(165), 379.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.641>
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. In *Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. (Vol. 1). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Presentación_Política_Nacional_-_Gestión_/libro_pol_nal_rec_hidrico.pdf
- Ordóñez Gálvez, J. J. (2011). *Cartilla Técnica "BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL."*
- Peña, H. (2016). Desafíos de la Seguridad Hídrica en América Latina y el Caribe. In *Los servicios de agua potable y saneamiento en el umbral del siglo XXI*.
<https://doi.org/10.3989/arbor.2000.i653.1000>
- Puerta, R. (2013). Manual de ArcGIS 10 Nivel Intermedio. In *Software* (p. 117). Facultad de Recursos Naturales Renovables; Universidad Nacional Agraria de la Selva.
<http://arcgeek.com/descargas/MAG10I.pdf>
- Roa Lobo, J., & Kamp, U. (2012). Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53(1012–1617), 109–126.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347730388007>
- Romero, R. (Instituto de E. y G. (2002). Metodología para la planificación y desarrollo sostenible en espacios naturales protegidos europeos: las zonas de especial protección para las aves. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 2, 1–32.
<https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/11/169>
- SMAC LTDA. (2013). Plan Municipal de Gestión del Riesgo, Municipio de Madrid, Cundinamarca. In *SSRN Electronic Journal* (Vol. 1, Issue 2, p. 102). Alcamdía.
https://madridcundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/madridcundinamarca/content/files/000630/31473_01_pmgr-madrid-v10.pdf
- Sørensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101–112. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>

Tafur, A. (Universidad de M. (2016). Determinación de Áreas Estratégicas para el abastecimiento hídrico de la zona urbana del Municipio de Ortega-Tolima a través de Arcgis 10.2.2. In *Universidad de Manizales* (Vol. 1, Issue 9, p. 48).

Vélez, Jaime; Poveda, Germán; Mesa, O. (1999). *Balances Hidricos de Colombia* (p. 750000). Universidad Nacional de Colombia.
<http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1150%0A>