

**BALANCE HÍDRICO PARA ESTIMAR RECARGA POTENCIAL EN LA MESA DE
LOS SANTOS Y DIRECCIÓN DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA.**

**NATALY JOHANNA BECERRA HERNÁNDEZ
CRISTIAN GIOVANNY PARRA ESTEPA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

**BALANCE HÍDRICO PARA ESTIMAR RECARGA POTENCIAL EN LA MESA DE
LOS SANTOS Y DIRECCIÓN DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA.**

**NATALY JOHANNA BECERRA HERNÁNDEZ
CRISTIAN GIOVANNY PARRA ESTEPA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Civil**

**Directora:
SULLY GÓMEZ ISIDRO
Doctora en Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

Este proyecto se lo dedico a mi madre María E. Hernández que siempre fue el apoyo y motor incondicional, quien sin importar que tan difíciles fueran los retos siempre estuvo ahí con un buen consejo en el momento apropiado y sin importar que tan lejos fueran mis sueños me acompañó a cumplirlos, a toda mi familia por siempre esperar lo mejor de mí y nunca perder la fe y a mis amigos y compañeros que de una u otra forma ayudaron en mi proceso formativo.

Nataly Becerra

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se lo dedico a:

Primero que todo a Dios, a mi madre Luz Dayssy Estepa por su apoyo incondicional, a mi padre Efraín Parra J, hermano Edison, tía Elovina y demás familiares, a personas tan maravillosas que logre conocer a lo largo de este proceso.

Cristian Parra

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO GENERAL	16
1.1 DESCRIPCIÓN HIDROGEOGRÁFICA DE LA MESA DE LOS SANTOS	16
1.2 BALANCE HÍDRICO	19
1.3 DIRECCIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA	21
2. METODOLOGÍA	24
2.1 PRECIPITACIÓN	25
2.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN	29
2.3 ESCORRENTÍA	34
2.4 EFECTO antrópico.....	39
2.5 DISTRIBUCIÓN DE LAS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	41
2.6 DIRECCIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA	41
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
3.1 BALANCE HÍDRICO	44
3.2 DIRECCIONES DE FLUJO.....	52
4. CONCLUSIONES	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	63

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación de la Mesa de los Santos	17
Figura 2: Esquema del ciclo del agua	19
Figura 3. Clasificación y ubicación de las estaciones en estudio.....	24
Figura 4. Ciclo de precipitación media anual para la zona en estudio	27
Figura 5. Diagrama de doble masa para la estación Gja. Piedecuesta – El pantano	28
Figura 6. EPT y EV mensual para la estación de El Palmar	33
Figura 7. Mapa hidrogeológico de la zona	36
Figura 8. Clasificación del Uso del suelo en la zona.....	38
Figura 9. Distribución de la precipitación mm/año	45
Figura 10. Distribución de la evapotranspiración potencial en mm/año, método de García y López.....	46
Figura 11. Distribución de la evapotranspiración real en mm/año	47
Figura 12. Distribución de la escorrentía directa anual en mm/amo	48
Figura 13. Distribución espacial de las pérdidas por efecto antrópico en mm/año	49
Figura14. Distribución espacial de las pérdidas por efecto antrópico en mm/año	.51
Figura 15. Mapa de curvas de isopiezas desarrollado a partir de los niveles piezometricos.....	53
Figura 16. Mapa de curvas de isopiezas desarrollado a partir de los niveles piezometricos.....	54

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Información de las estaciones en estudio, datos de Precipitación promedio multianual.....	26
Tabla 2. Porcentaje de datos faltantes para las estaciones climatológicas ordinarias.....	30
Tabla 3. Resultados de ETP por cada uno de los métodos.....	31
Tabla 4. Descripción de la clasificación hidrogeológica de la Mesa de los Santos	37
Tabla 5. Descripción de la clasificación del uso del suelo en la Mesa de los Santos.....	37
Tabla 6. Pérdidas por efecto antrópico.....	41
Tabla 7. Clasificación de los puntos de agua subterránea visitados inicialmente en la Mesa de los Santos.....	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A Clasificación hidrogeológica de la Mesa de los Santos.....	63
ANEXO B. Calculo tipo del proceso para completar los datos faltantes por mes de las estaciones para el parámetro de precipitación	64
ANEXO C. Representación gráfica del ciclo anual para todas las estaciones en estudio	68
ANEXO D. Diagrama de doble masa para determinar si la tendencia representa una varianza significativa en las series de cada una de las estaciones. El análisis se hace determinando tres zonas principales, y en cada una de las zonas se toma como referencia la estación que mejor se comporta respecto al ciclo bimodal de las Precipitaciones.	69
ANEXO E. Tabla con la descripción de los métodos que se pueden emplear para el cálculo de la Evapotranspiración real y potencial, su implementación depende de los datos que se encuentren disponibles al sitio de estudio.	73
ANEXO F Evapotranspiración potencial mensual calculada a partir de cada método de estudio para cada estación.	78
ANEXO G. Criterios para selección de la ETP que mejor se ajusta a la zona de estudio	80
ANEXO H. Mapas complementarios Para la división por subcuencas de la zona de estudio	82
ANEXO I. Descripción de las características geológicas de cada tipo de suelo según la clasificación del SCS	84
ANEXO J. Resumen del procedimiento para calcular el CN Ponderado de la Subcuenca 1, este procedimiento se repite para cada subcuenca	85

ANEXO K. Cuadro de características de las subcuencas utilizadas para obtener la escorrentía directa (Pe)	86
ANEXO L. Cultivos de la Mesa de los Santos y su coeficiente de cultivo Kc.....	87
ANEXO M. Valor de precipitación Media multianual para cada estación.....	91
ANEXO N. Datos de evapotranspiración real calculada a partir de la ecuación de BUDIKO para cada estación	92
ANEXO O. Mapas de los parámetros del balance hídrico	93
ANEXO P. Inventario completo de los puntos visitados en época de invierno	95
ANEXO Q. Inventario completo de los puntos visitados en época de verano.....	96

RESUMEN

TÍTULO: BALANCE HÍDRICO PARA ESTIMAR RECARGA POTENCIAL EN LA MESA DE LOS SANTOS Y DIRECCIÓN DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

AUTORES: NATALY JOHANNA BECERRA HERNÁNDEZ**
CRISTIAN GIOVANNY PARRA ESTEPA

PALABRAS CLAVE: BALANCE HÍDRICO, PRECIPITACIÓN, EVAPOTRANSPIRACIÓN, ESCORRENTÍA, EFECTO ANTRÓPICO, ISOPIEZAS.

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se presenta el balance hídrico de largo plazo en la Mesa de los Santos para un periodo de 20 años comprendidos entre 1995 a 2014, en él se desarrolla la estimación y cálculo de las componentes que intervienen en el mismo y son parte importante del ciclo hidrológico como son: la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía, el efecto antrópico y la infiltración. En la zona de estudio se evidencio una oferta hídrica muy baja es decir que no cuenta con un gran potencial para suplir las necesidades de la zona y del acuífero. También presentó valores bajos de precipitación acumulada y un déficit de infiltración, lo que indica que en una escala anual su recarga potencial es nula, dando como resultados que los acuíferos de la zona se vean afectados directamente de manera que no cuentan con un abastecimiento constante por infiltración.

Así mismo se presentan los mapas de direcciones de flujo para la época de invierno y verano que permite conocer los niveles piezométricos y visualizar el sentido del flujo de agua subterránea. En la Mesa de los Santos tiene una dirección de este a oeste, pero se observan zonas de alto bombeo que alteran la dirección natural del flujo del agua presente en los acuíferos de la Mesa de los Santos, esto se debe en gran parte a que en esta zona se realizan bastantes captaciones de agua subterránea como única fuente de suministro de agua potable.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Civil. Directora: Sully Gómez Isidro, Doctora en Ingeniería Civil

ABSTRACT

TITLE: WATER BALANCE CHARGING FOR ESTIMATING POTENTIAL IN THE TABLE OF SAINTS AND ADDRESS GROUNDWATER FLOW

AUTHORS: NATALY JOHANNA BECERRA HERNÁNDEZ**
CRISTIAN GIOVANNY PARRA ESTEPA

KEY BOARDS: Water Balance, Precipitation, Evapotranspiration, Runoff, Anthropogenic Effect, Isohypsas Map

DESCRIPTION

In this work the water balance of Long Term in Mesa de los Santos for a period of 20 years from 1995 a 2014, in the estimation and calculation of the components involved in it develops and are important part is presented as the son hydrological cycle: precipitation, evapotranspiration, runoff, infiltration and anthropic effect. In the study area Very low water supply is feasible was evident that there has a large potential to meet the needs of the area and the aquifer. Also presented low values of accumulated rainfall and a lack of infiltration, indicating that on a yearly scale potential recharge is zero, leading to results that aquifers in the area directly affected so that no air feature UN supply constant infiltration.

Also maps para flow directions the winter time and summer that allows to know the piezometric levels and visualize the flow direction Groundwater are presented. In La Mesa de los Santos has an address de este one west, but areas of high pumping altering natural flow direction of the water present in the aquifers in the Mesa de los Santos are observed, this should be largely a tail esta enough catchments area groundwater as the source of drinking water like are performed.

* Work degree

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Sully Isidro Gomez, PhD in Civil Engineering

INTRODUCCIÓN

Un estudio de balance hídrico a largo plazo es un análisis integral de los parámetros de entrada (precipitación) y salida (evapotranspiración, escorrentía y efecto antrópico) de una cuenca. Una componente importante del balance hídrico es la infiltración, que es la parte de la precipitación que llega a alimentar los acuíferos, esta fuente hídrica es considerada un recurso valioso pues es la reserva con que cuenta una zona para afrontar épocas secas. Luego de hacer el cálculo de los parámetros se analizan los resultados dando que la zona presenta un déficit por infiltración, es decir, que en una escala anual no presenta una recarga potencial, pero en el análisis de aguas subterráneas que se realizó se evidencia que si tiene una recarga efectiva al acuífero en alguna época del año, esto se debe a que su recarga es baja y en la escala anual no se hace visible.

Para determinar las direcciones del flujo subterráneo se representó en un mapa la cota piezométrica de los puntos visitados, se observó que el flujo tiene una dirección de Este a Oeste con zonas de alto bombeo que hacen que la dirección natural del flujo se vea afectada.

1. MARCO GENERAL

1.1 DESCRIPCIÓN HIDROGEOGRÁFICA DE LA MESA DE LOS SANTOS

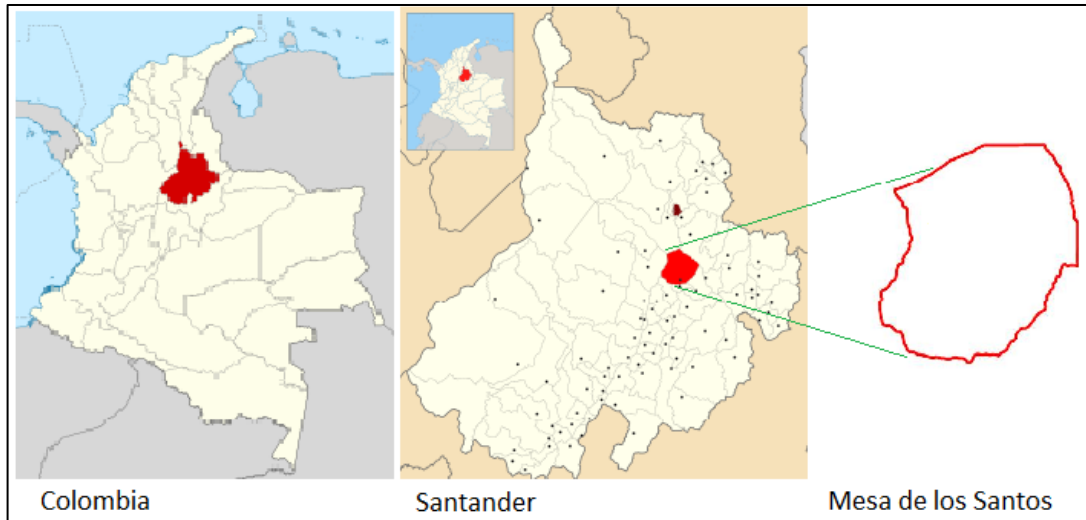
- **Ubicación Geográfica**

La mesa de los Santos es la denominación que se hace al accidente geográfico que se encuentra al oeste del macizo de Santander y al noroeste de esta prolongación donde se encuentra la sierra de Arcabuco, con una altura de 1602 metros.

La Mesa de los santos está ubicada en la provincia Santandereana de Soto, Limita por el norte con Girón y Piedecuesta, por el sur con Jordán, Sube y Villanueva, por el oriente con Aratoca, y por el occidente con Zapatoca. La conforman en su mayor extensión el municipio de los santos, y una porción pequeña del municipio de Girón y Piedecuesta.

Se encuentra ubicada a una latitud de 64° 46' 00" N y una longitud de 73° 05' 00" W, científicamente se dice que la mesa está conformada solamente por la porción de tierra comprendida entre los 1600 y 1675 m.s.n.m, pero ésta es conocida en su total extensión por puntos más bajos comprendidos entre los municipios de Girón y Piedecuesta, si se considera la extensión de la mesa desde la parte más baja cerca de los 300 m hasta los 1700 m o más, la mesa tendría una extensión de cerca de 44.600 hectáreas, pero su extensión plana es de 20.000 hectáreas que son aprovechables por el ser humano para actividades económicas que no generen daños en la zona. En la Figura 1 se observa la ubicación general de la zona en estudio.

Figura 1. Ubicación de la Mesa de los Santos



- **Hidrografía**

La mesa de los santos cuenta con una gran red hidrográfica en toda la zona tales como: el río Sogamoso y el río Chicamocha que pertenecen la Cuenca del río Magdalena.

El municipio de los Santos, es una zona de escasa cobertura vegetal, por dicha razón la mayoría de las quebradas y afluentes permanecen secos, y sirven como canales naturales de drenaje que solo transportan agua cuando se presentan lluvias.

La cuenca del río Sogamoso: El río Sogamoso se origina de la confluencia de los ríos Chicamocha y Suárez en el sitio denominado las juntas, en los límites de los municipios de Villanueva, Los Santos y Zapatoca a una altura de 300 m.s.n.m y lleva sus aguas al río Magdalena. Hacia el río Sogamoso escurren, las microcuencas de las quebradas La Honda, Los Angelinos, Del Potrero, Santera, Chivatera, Zanjon, Aguas Gordas y dos áreas de escurrimiento directo adyacentes a esta última.

La cuenca del río Chicamocha: El río Chicamocha nace en cercanías de la Ciudad de Tunja, capital del Departamento de Boyacá a los 5° 30' de latitud Norte y 73° 22' de longitud al Oeste de Greenwich y su rumbo sigue aproximadamente la misma dirección de la Cordillera Oriental (SW - NE), hasta la confluencia con el río Nevado. Las microcuencas del municipio de Los Santos que escurren hacia el río Chicamocha son: la microcuenca de la quebrada Chinavega y la microcuenca de la quebrada La Mojarra y dos áreas de escurrimiento directo adyacentes a esta última [1].

- **Formación Geológica**

La Mesa de los santos está conformada por varias formaciones geológicas correspondientes a rocas paleozoicas con metamorfismo de bajo a medio grado de la Formación Silgará; cuerpos ígneos intrusivos del Período Jurásico asociados al Granito de Pescadero y rocas sedimentarias continentales del mismo período definidas como la Formación Jordán; rocas sedimentarias de edad Cretácico entre las que se encuentran las formaciones Los Santos, Rosablanca, Paja y Tablazo; y depósitos no consolidados de edad Cenozoico.

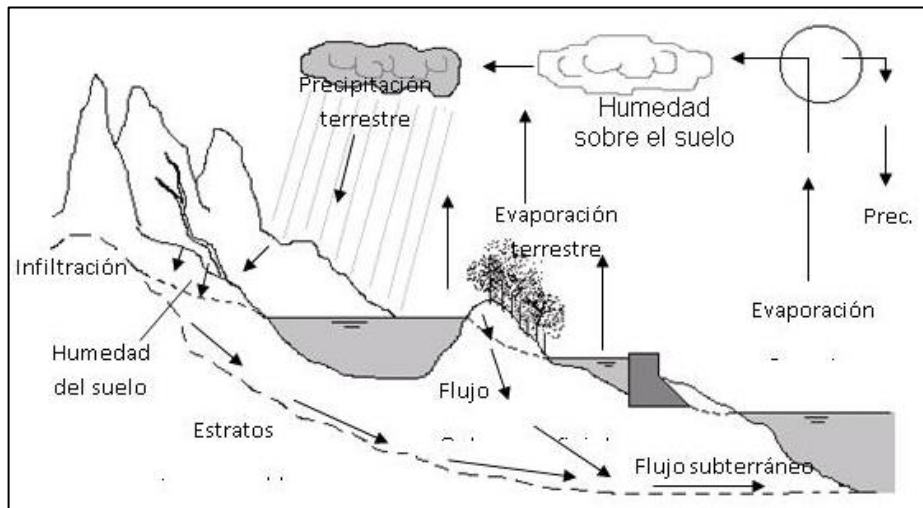
La Mesa de Los Santos se encuentra limitada por las fallas del Suárez al Oeste, Bucaramanga al Este y Los Montes al Norte. La zona presenta fallas con tres orientaciones principales: con dirección NW en su mayoría paralelas, mostrando un alto grado de penetrabilidad; fallas paralelas entre sí con dirección NE y fallas menores con dirección EW [2], (Anexo 1: distribución Hidrogeológica de la Mesa de los Santos).

1.2 BALANCE HÍDRICO

Para poder estudiar y determinar en forma cuantitativa todos estos procesos físicos que contribuyen a la formación y a la variación espacio-temporal del recurso hídrico en una zona determinada, se utiliza el balance hídrico, formulación matemática de la interrelación y distribución espacial del agua en sus diferentes fases.

El balance hídrico se basa en la ley física universal de conservación de masas y representa una de las herramientas de mayor uso en la práctica hidrológica; expresa la equivalencia entre los aportes de agua que entran por un lado en una unidad hidrográfica determinada y la cantidad de agua que se evacua por el otro, considerando además las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante un periodo de tiempo determinado. En la Figura 2 se puede ver que la infiltración hace parte del ciclo hidrológico de la tierra

Figura 2: Esquema del ciclo del agua



Fuente: Google, Ciclos del agua

Los balances hídricos, tanto globales como regionales permiten determinar la disponibilidad hídrica natural de las áreas en consideración y conocer el comportamiento de la oferta de agua, bien sea superficial o subterránea, a través del estudio de las diferentes fases del ciclo hidrológico [3].

Un balance hídrico permite conocer el potencial de infiltración que tiene una zona para estimar la recarga disponible para eventos climáticos difíciles, estudiando así las entradas y las salidas hídricas, para el estudio de este potencial se utilizan 4 aspectos fundamentales: Precipitación, Escorrentía, Evapotranspiración, y efecto antrópico (si este es representativo), de esta forma se puede ajustar así:

$$\text{Entrada} = \text{Salidas} + \frac{ds}{dt} \quad (1)$$

Los balances se pueden hacer a corto o a largo plazo. Para un balance multianual se considera que dt es relativamente grande y esto hace que su relación $\frac{ds}{dt}$ se haga casi nula. Para un balance a corto plazo se requiere de información completa y precisa de cada uno de los parámetros de estudio, y aunque encontrar fuentes confiables y completas de estos parámetros es bastante dispendioso, se puede obtener un análisis de la infiltración más preciso, que permite conocer qué porcentaje se infiltra después de un evento de precipitación [4].

En este Proyecto de investigación se desarrolla un balance Hídrico a largo plazo en la Mesa de los Santos, para el desarrollo del mismo se utilizó la ecuación (2) en el cálculo de la infiltración que se produce en una zona a partir de algunos parámetros biofísicos del misma.

$$P - I - Q - ETR - A = \frac{ds}{dt} \quad (2)$$

Dónde:

P= Precipitación

Q= escorrentía superficial promedio

ETR= evapotranspiración real

A= Perdidas por efecto antrópico (captaciones de agua que utiliza el ser humano para consumo y desarrollo de actividades que no retorna en un tiempo considerado al sistema)

I= Infiltración

La relación de $\frac{ds}{dt}$ se hace nula debido a que es un balance a largo plazo, de esta forma la infiltración de la zona se calcula a partir de la ecuación (3):

$$I = P - Q - ETR - A \quad (3)$$

1.3 DIRECCIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Un mapa de isopiezas es una representación en planta de la distribución del potencial hidráulico del agua de un acuífero. Esta representación se hace a partir de isolíneas que representan puntos de igual potencial hidráulico.

El procedimiento práctico para su elaboración consiste en recopilar el mayor número de datos sobre los niveles piezométricos de la zona de estudio, y referenciarlos con cotas absolutas sobre un mapa, que contenga preferiblemente, una base geológica simplificada. La recopilación de estos datos forma parte del trabajo denominado como "inventario de puntos de agua".

Aljibe: El aljibe o cisterna son obras de perforación excavados a mano, con un diámetro aproximado de 1,5 metros. Su profundidad normalmente es de 20 o 30 metros. Este tipo de obras se realizan en acuíferos de materiales poco consolidados con niveles piezómetros poco profundos. Normalmente, y sobre todo en terrenos poco consolidados, es necesario revestir la obra con objeto de evitar el derrumbe de las paredes, para ello se utiliza piedra, ladrillo, cemento o anillos de hormigón prefabricados, colocados a medida que avanza la perforación. Este último método, llamado de hincado está provisto en la base con una zapata cortante, normalmente de acero, que facilita el descenso del encontrado.

Pozos Profundos: Es probablemente el tipo de captación más antiguo, en la actualidad para poder sustraer el agua de las profundidades de la tierra se realizan excavaciones o perforaciones con máquinas rotativas o de impacto para suelos y materiales granulares, en rocas duras es necesaria la utilización de explosivos. En general un pozo se caracteriza por tener una forma cilíndrica y un diámetro de perforación mucho menor que la profundidad excavada.

Los pozos perforados tienen una profundidad superior a los 30 metros, generalmente con revestimiento impermeable, y por lo tanto poco afectado por las impurezas del agua superficial. Generalmente extrae agua de la zona de saturación, que a pesar de ser relativamente pura, puede también ser dura.

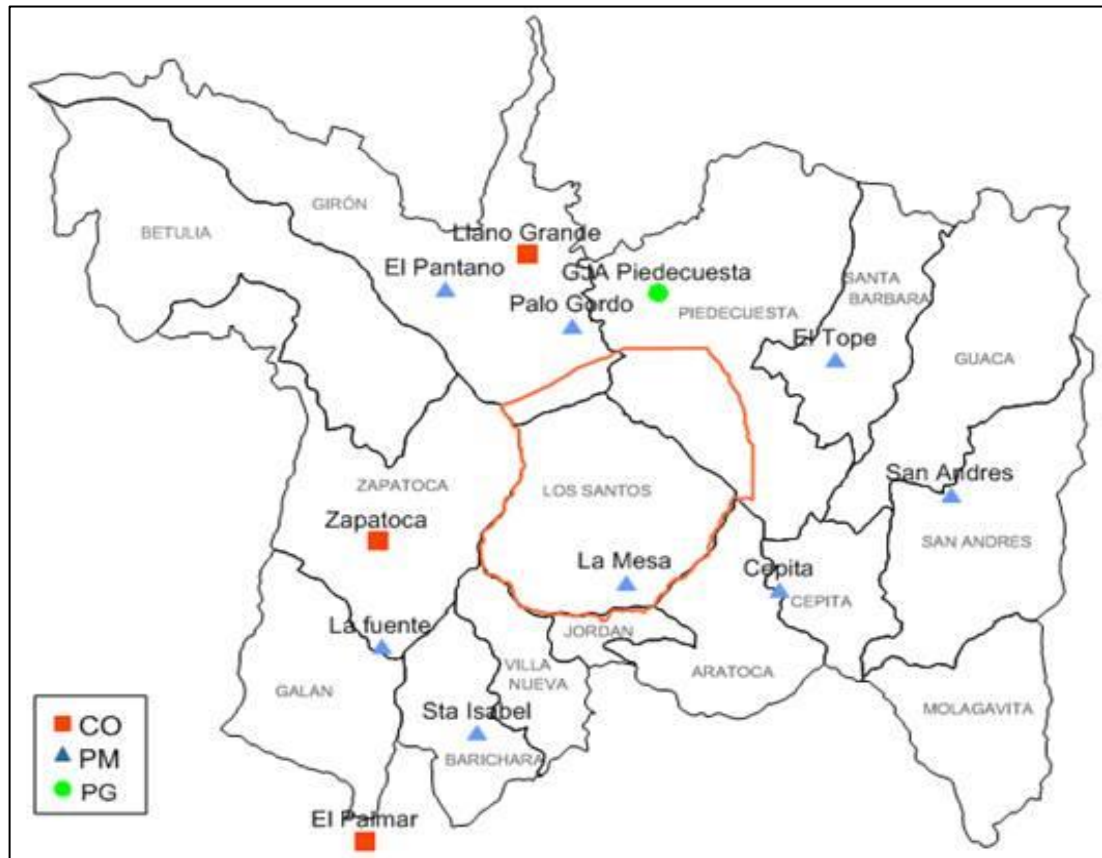
Manantial: Un manantial es un flujo natural de agua que surge del interior de la tierra desde un solo punto o por un área pequeña. Pueden aparecer en tierra firme o ir a dar a cursos de agua, lagunas o lagos. Los manantiales pueden ser permeables o intermitentes y tener su origen en el agua de lluvia que se filtra o tener un origen ígneo, dando lugar a manantiales de agua caliente [5].

Inventario de puntos de agua subterránea: Los inventarios permiten tener acceso a la información disponible de un tema en particular, en este caso, sirve para tener conocimiento ordenado de la información perteneciente a los puntos de captación de agua subterránea.

2. METODOLOGÍA

Dentro de la zona de estudio se encuentra una sola estación meteorológica monitoreada por el IDEAM, y para el estudio se requiere de un número superior de estaciones. Teniendo en cuenta que en el sector hay varias estaciones monitoreadas por esta entidad y que los datos adquiridos por medio de esta institución tienen un alto porcentaje de aceptación para el estudio, se analizó la zona de influencia de las estaciones y se determinó con cuáles se podría realizar el estudio. En la Figura 3 se enuncian las estaciones seleccionadas para el estudio, cuya ubicación se encuentra dentro de la zona de influencia.

Figura 3. Clasificación y ubicación de las estaciones en estudio



Para el análisis y estudio de los parámetros se utilizó una red Pluviométrica de 12 estaciones ubicadas en los municipios aledaños a la Mesa de los Santos. Se establece que el análisis se hace de los últimos 20 años, debido a que todas las estaciones poseen registros meteorológicos del periodo comprendido entre 1995 a 2014.

2.1 PRECIPITACIÓN

Para llevar a cabo la estimación y cálculo de la precipitación en la zona se realizaron tres procedimientos para revisar, completar y verificar los datos obtenidos.

- **Datos faltantes**

Se revisó el porcentaje de datos de precipitación faltantes en los registros mensuales del periodo establecido anteriormente para el estudio. Como se observa en la Tabla 1 el porcentaje de datos faltantes es inferior al 10%, este valor se considera aceptable para realizar el proceso de completar los datos faltantes, a través de un método de interpolación con la estación que se encuentre cercana a la estación en estudio, de manera que las dos presenten una buena correlación y que contengan los datos faltantes de la otra estación (Anexo 2: Ejemplo interpolación de una pareja de estaciones).

La Tabla 1 se observa la precipitación promedio anual en (mm/año) para cada una de las 12 estaciones en estudio luego de realizar el proceso de llenado de datos. La Mesa de los Santos es una zona que se caracteriza por presentar registros bajos de precipitación comparada con las estaciones a su alrededor

Tabla 1. Información de las estaciones en estudio, datos de Precipitación promedio multianual

Estaciones IDEAM								
Estación	Tipo	Registros		Años en servicio	Altura	Periodo de estudio	% datos Faltantes	Precipitación (mm/año)
		Inicio	Fin					
El tope	PM	1958	2015	58	2050	1995-2014	2.08	1330.51
San Andrés	PM	1956	2015	60	1702	1995-2014	0.00	1448.36
Gja. Piedecuesta	PG	1970	2015	46	1000	1995-2014	0.00	1640.74
El Pantano	PM	1967	2014	48	1280	1995-2014	8.75	1032.17
El palmar	CO	1983	2015	33	940	1995-2014	0.83	1888.20
Zapatoca	CO	1973	2014	42	1810	1995-2014	7.50	1234.97
Palo Gordo	PM	1967	2015	49	950	1995-2014	0.83	1081.55
La Mesa	PM	1973	2015	43	1460	1995-2014	0.83	863.61
Sta. Isabel	PM	1973	2014	42	1300	1995-2014	0.42	1057.58
La fuente	PM	1973	2015	43	815	1995-2014	2.50	1462.71
Cepita	PM	1958	2015	58	600	1995-2014	1.25	978.83
Llano Grande	CO	1971	2015	44	777	1995-2014	8.77	986.92

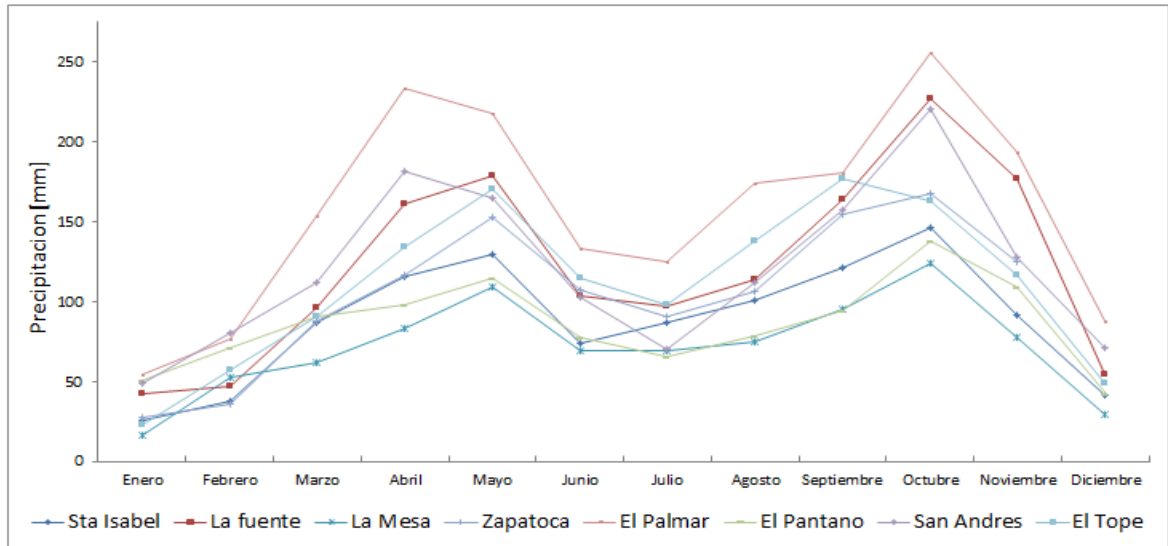
- **Ciclo Anual de llluvias**

Una vez las series se completaron, se analizaron los datos en estudio y su relación con el fenómeno de llluvias que se presenta en el país. Se observó el comportamiento de las estaciones en el ciclo anual de la llluvia. La posición geográfica Colombiana en la zona ecuatorial la sitúa bajo la influencia de los vientos Alisios del Noreste y Sureste. Estas corrientes de aire cálido y húmedo, provenientes de latitudes subtropicales de los dos hemisferios originadas en los océanos Atlántico y Pacífico, confluyen en una franja denominada Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) [6].

En la Figura 4 se representa el ciclo de precipitación media anual, que permite observar un comportamiento bimodal de la llluvia, este se da debido a la influencia de la ZCIT en la zona de estudio, y representa la presencia de dos épocas

húmedas (Abril-Mayo y Septiembre-Octubre-Noviembre) y dos épocas secas (Diciembre-Enero y Junio-Julio-Agosto). (Anexo 3: Ciclo anual de la lluvia para todas las estaciones en estudio).

Figura 4. Ciclo de precipitación media anual para la zona en estudio

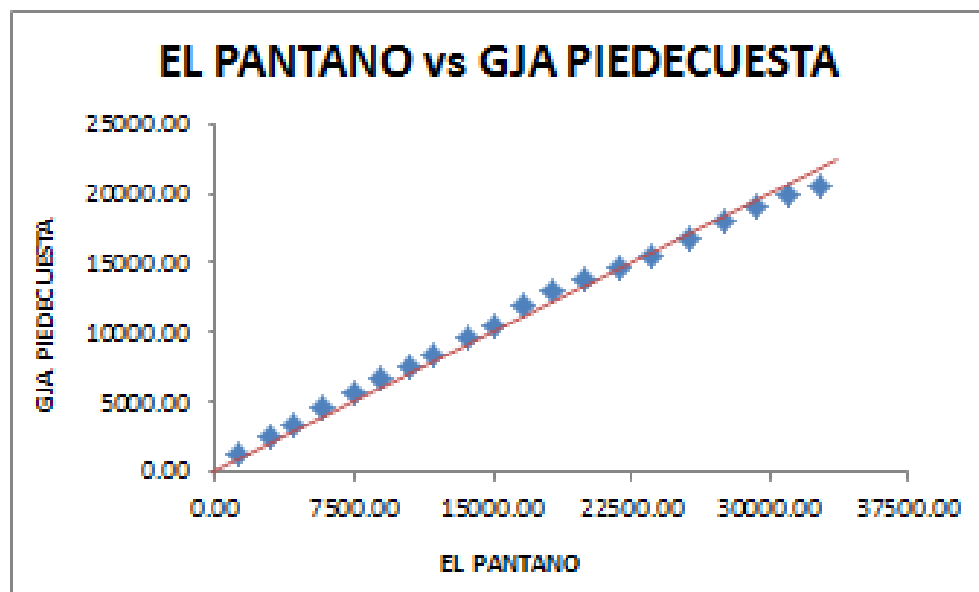


- **Consistencia de los datos**

El gráfico de doble masa acumulada, que por años ha sido empleado en el análisis de consistencia de la información, permite detectar aquellas series que presentan un error sistemático asociado a la toma de datos debido al uso de diferentes instrumentos y/o técnicas de medición durante un período considerado. Debido a la representación que se hace del ciclo de la precipitación en la zona, se analiza que estaciones presentan un comportamiento muy pobre respecto a éste y se hace un análisis a partir de un diagrama de Doble masa con una estación que presente un comportamiento ideal en la zona, así se determina si los datos de las estación se correlacionan, verificando si sus precipitaciones acumuladas se comportan linealmente crecientes

Una de las estaciones que presentó un comportamiento muy pobre respecto al ciclo anual de la precipitación fue la estación de GJA. PIEDECUESTA, entonces se hizo un análisis de Curva de Doble masa para determinar si sus datos se comportan de manera proporcional con la estación de EL PANTANO que presentaba un comportamiento ideal en la zona con el ciclo de precipitación media anual, ver Figura 5. A pesar de que la serie presenta leves fluctuaciones, tienen una tendencia linealmente creciente que se consideró como aceptable para el estudio, entonces no se hace necesario aplicar un factor de corrección de los datos pues estos no representan cambios significativos en la tendencia [7]. Las demás estaciones tienen un mejor comportamiento, es decir, su tendencia es aceptable y no necesitan corrección de datos (Anexo 4: Diagramas de doble masa para cada estación).

Figura 5. Diagrama de doble masa para la estación Gja. Piedecuesta – El pantano



2.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN

En este proceso hidrológico intervienen varios factores que afectan la evapotranspiración y pueden reunirse en tres grupos principales: El Primero son las variables climáticas como la radiación solar, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. En el segundo grupo de factores de cultivo se debe tener en cuenta el tipo y la variedad del cultivo, la altura de las plantas, la etapa de desarrollo, así como la profundidad radicular. En el tercer grupo se hace referencia a las condiciones de manejo del cultivo tales como la cobertura del suelo, la densidad de la vegetación y el contenido de agua como factores que, si no se manejan de manera adecuada, pueden inhibir la respiración de la planta [8]. Es también uno de los procesos más críticos, debe estimarse más no se puede medir, a no ser que se cuente con dispositivos que provean resultados directos tales como evapotranspirómetros o lisímetros.

Este parámetro hidrológico está conformado por dos procesos hidrológicos que son la transpiración (fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmósfera) y la Evaporación (fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor). Cuantificar estos fenómenos por separado es muy difícil y puede generar datos muy inconsistentes, por ello se hace bajo el concepto de Evapotranspiración [9].

- **Evapotranspiración potencial (ETP)**

Para el análisis de este parámetro se verificó la existencia de las variables climáticas que se utilizan en este proceso dentro del periodo que se determinó para realizar el balance. Solo las estaciones climatológicas ordinales (CO) pueden contar con datos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y/o brillo solar. En la zona de estudio se presentan 3 estaciones CO pero ninguna se encuentra dentro de la Mesa de los Santos, por lo tanto el uso de las ecuaciones

para cálculo de ETP es muy limitado. El porcentaje de datos faltantes se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de datos faltantes para las estaciones climatológicas ordinarias

Estación	% de Datos Faltantes			
	Temperatura	Humedad relativa	Velocidad del viento	Brillo solar
El palmar	0	5	NR	NR
Zapatoca	0.417	15	NR	10
Llano Grande	5.263	19.444	NR	NR

*NR= No tiene registros de para ese parámetro

- **Formulas semiempíricas para el cálculo de la ETP**

A través de la historia se han desarrollado fórmulas que permiten evaluar la evapotranspiración potencial con una aproximación suficiente para estudios hidrológicos.

En el análisis de la ETP se utilizaron las formulas enunciadas en la Tabla 3. Se trabaja con 5 métodos de los cuales se tienen la información necesaria para desarrollar la ecuación [10]. (Anexo 5: Ecuaciones y relaciones utilizadas en el cálculo de la ETP de cada método).

Para la zona de la Mesa de los Santos se utilizaron las ecuaciones de THORNTHWAIT, IVANOV, BLANEY-CRIDDLE y GARCÍA Y LÓPEZ en las tres estaciones, la ecuación de TURC MODIFICADO solo se aplicó para la estación de Zapatoca pues esta era la única que tenía datos de Brillo Solar. Al aplicar estas ecuaciones con los parámetros que tiene cada estación se obtuvieron los

resultados descritos en la Tabla 3 (Anexo 6: se encuentran graficadas la ETP calculada a partir de cada método).

Tabla 3. Resultados de ETP por cada uno de los métodos

	El palmar [mm/año]	Zapatoca [mm/año]	Llano Grande [mm/año]
TURC MODIFICADO	-----	1132.85	-----
THORNTHWAIT	1249.33	1067.84	1232.21
IVANOV	1586.58	528.79	1480.52
BLANEY-CRIDDLE	2018.94	1678.93	1991.34
GARCÍA Y LÓPEZ	1576.15	1007.11	1536.10

- **Criterios para seleccionar el método que tiene un mejor ajuste de la ETP en la zona de estudio**

El punto de partida para seleccionar la ecuación que mejor se ajusta a las condiciones reales de la zona, es la comparación entre los datos directos del tanque evaporímetro (EV) y los datos estimados de Evapotranspiración potencial. Esta comparación se hace a partir de 4 criterios [11]. Las comparaciones se realizaron para las estaciones de El Palmar y Zapatoca que eran las únicas que tenían registro de Evaporación.

- **Coefficiente de correlación:** Se calcula el coeficiente de correlación R para cada una de las regresiones efectuadas entre la EV y la ETP de cada método, esto permite conocer qué tan relacionados están los valores de evaporación y los estimados. Cuanto más cercano el valor a 1 mejor es la relación.

Las regresiones efectuadas presentaron una correlación baja (por debajo de los 0.5 para la mayoría de los casos evaluados) y se hace imposible tomar una decisión a partir solamente de este criterio, aunque se resalta que la ecuación de

García y López, presentó un mejor comportamiento comparado con las otras ecuaciones.

- Relación porcentual: Se calcula con fin de apreciar numeralmente la proporción existente entre los valores mensuales, para evaluarla se tomó como marco de referencia los resultados obtenidos por varios investigadores, según los cuales esta proporción ha fluctuado entre 70 y 80%. Si la relación porcentual es superior a 100% indica que los valores de ETP son superiores a los de EV, para la selección del método que mejor se ajusta se debe tener en cuenta que una ETP no debe ser superior de la EV.

$$\%R = \frac{ETP}{EV} \times 100 \quad (4)$$

- Índice Estacional: Se utiliza para establecer si la curva de ETP de las diferentes fórmulas tiene un comportamiento similar con la curva de evaporación

$$IE = \frac{\bar{x}m}{\bar{x}} \times 100 \quad (5)$$

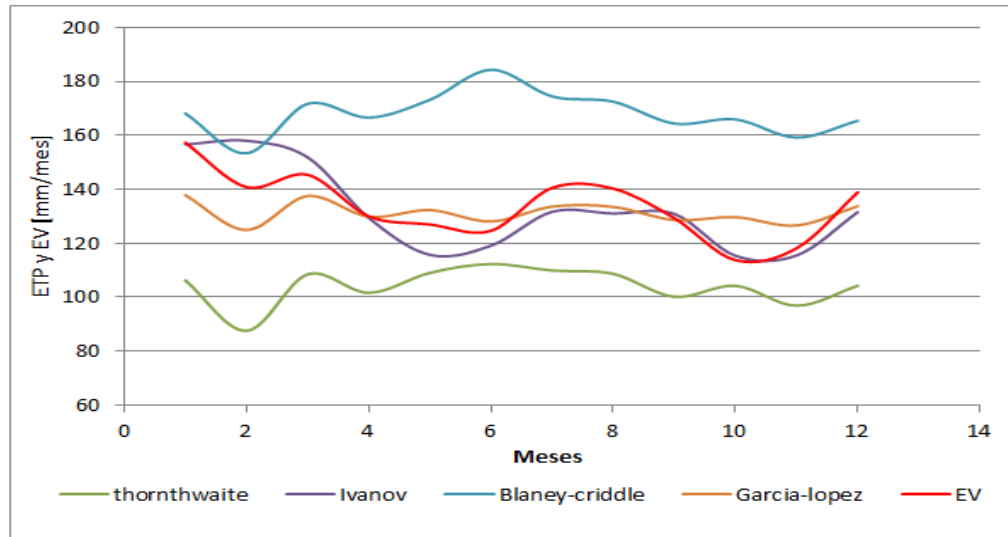
$\bar{x}m$ = valor promedio multianual mensual de la serie

\bar{x} = valor promedio multianual de la serie

Se debe calcular el Índice Estacional para cada mes y cada una de las formulas, Luego se calcula el índice Estacional para la evaporación de tanque en cada mes, se halla las diferencias entre los Índices calculados y el promedio de éstas

- Comparación visual: En la Figura 6 Se observa la tendencia que tiene la ETP calculada y cuál es la que más se asemeja a la EV

Figura 6. EPT y EV mensual para la estación de El Palmar



Después de evaluados los criterios anteriores se concluyó que el método que mejor representa el fenómeno de la evapotranspiración es la ecuación de GARCÍA Y LÓPEZ. Los resultados de cada selección de criterio se encuentran disponibles en el Anexo 7 (Anexo 7: criterios de selección de la ETP).

Evapotranspiración real

Para estimar la ETR se utilizó el método de Budyko, desarrollado en 1974, donde se emplea el estudio de la ETP escogida anteriormente como la que mejor se ajusta a las condiciones reales de la zona. [12]

$$ETR = \sqrt{ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right)} \quad (6)$$

Dónde:

ETP: Evapotranspiración calculada a partir de la ecuación de García y López, seleccionada por que presenta un buen comportamiento en la zona.

P=Precipitación

ETR= Evapotranspiración real

El uso de la ETP y la precipitación permiten obtener una estimación más acertada de la ETR, da un rango de confiabilidad superior para este cálculo, dado que la estimación de la ET es un parámetro que se puede estimar de manera aproximada más no medir.

2.3 ESCORRENTÍA

La Escorrentía es la parte de la Precipitación que llega a alimentar a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes, de una cuenca. Existen distintos tipos de escorrentías dependiendo de su procedencia:

Escorrentía Superficial o Directa: Es la precipitación que no se retiene en la superficie terrestre pero tampoco se infiltra en el suelo y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad. El proceso que describe el agua cuando se inicia un aguacero depende de las características del terreno, la primera lluvia caída se invierte en llenar la capacidad de retención de la parte aérea de las plantas y en saturar el suelo. Cuando la capacidad de infiltración es inferior a la intensidad de la lluvia, el agua comenzará a moverse por la superficie del terreno. Se forma, entonces, una capa delgada de agua. Ésta se mueve por la acción de la gravedad según la pendiente del terreno y es frenada por las irregularidades del suelo y la presencia de vegetación, hasta incorporarse a la red de drenaje, donde se junta con los otros componentes que constituyen la escorrentía total [13].

Para realizar el balance hídrico se necesita conocer la escorrentía superficial que también es denominada como exceso de precipitación, a este exceso se le conoce como pérdidas o abstracciones, para analizar y calcular estas pérdidas se utilizó el método de SCS (Soil Conservation Service), que desarrolló una relación empírica después de analizar y estudiar un gran número de cuencas experimentales pequeñas: $Ia = 0.2S$ [14].

$$Pe = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (7)$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (8)$$

Dónde:

S=Retención potencial máxima

Pe=Escorrentía Directa

P= Precipitación

Ia= Cantidad de precipitación para la que no ocurrirá escorrentía

Para desarrollar este método se hace una división por sub-cuencas de la zona de estudio, que depende de la red de drenaje allí presente y del relieve de la zona. Para cada sub-cuenca se realiza el cálculo de escorrentía de manera que permita especializar este parámetro en la zona de estudio (Anexo 8: Mapas complementarios a la división de sub-cuencas que se hizo para la zona).

- **Numero de Curva (CN)**

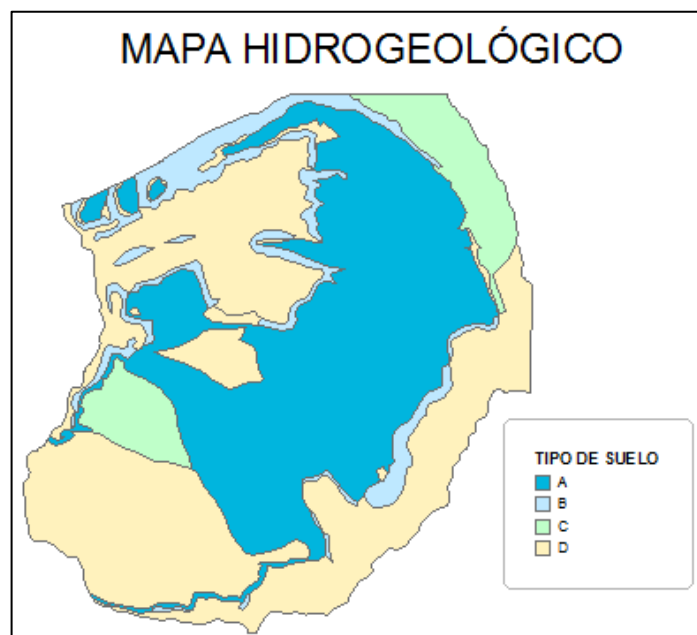
Desarrollado después de representar en graficas la información de P y Pe para muchas cuencas, el SCS estandariza estas curvas y define un número adimensional de curva (CN) [12]. El SCS hace una clasificación para este número bajo tres condiciones: Antecedentes de humedad normales, secas y húmedas (La lluvia acumulada en los 5 días antes del estudio sea mayor a 5 cm).

Una vez se tiene la división por sub-cuencas y trabajando conjuntamente con los mapas de suelo hidrogeológico y uso del suelo se calcula un CN ponderado por sub-cuenca, esto se realizó definiendo el porcentaje de cada uso de suelo presente en cada suelo hidrogeológico.

Hidrogeología del suelo: El SCS, clasificó hidrológicamente más de 4.000 suelos basándose en su potencial de escurrimiento, los agrupó en cuatro grupos de suelos hidrogeológicos, los cuales se identifican con las letras A, B, C y D [15]. (Anexo 9: Características hidrogeológicas de cada tipo de suelo).

La distribución hidrogeológica que presenta la zona de la Mesa de los Santos se representa en la Figura 7.

Figura 7. Mapa hidrogeológico de la zona



Fuente: Pinto J. y Mora J., *Análisis preliminar del potencial hidrogeológico en la Mesa de Los Santos, región central del departamento de Santander*, Modificado por los autores

En la Tabla 4 se presentan las características de porosidad y permeabilidad de cada tipo de suelo según la clasificación que hace el SCS.

Tabla 4. Descripción de la clasificación hidrogeológica de la Mesa de los Santos

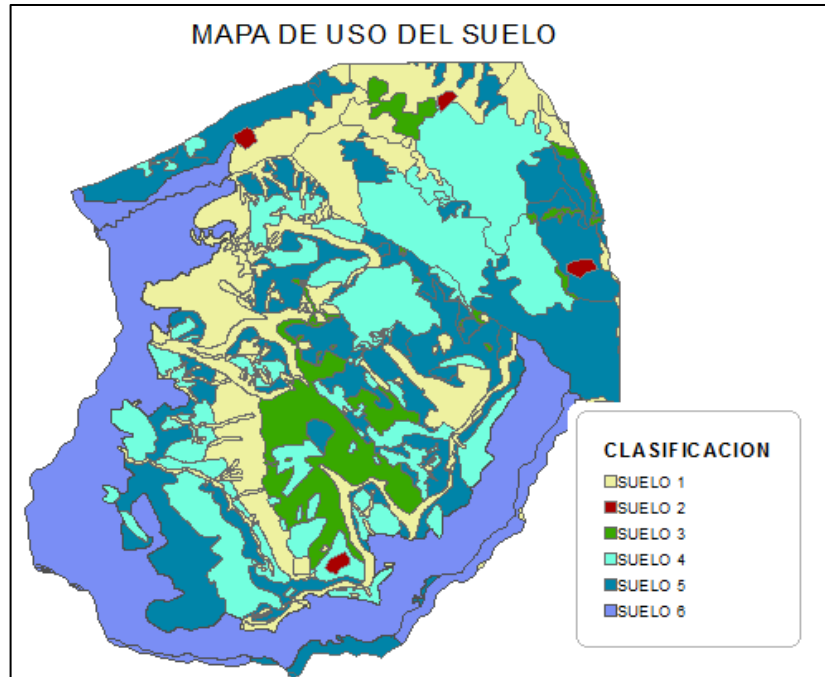
CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN
A	Alto potencial hidrogeológico: Alta Porosidad y alta permeabilidad
B	Buen potencial hidrogeológico: Alta Porosidad y permeabilidad media
C	Bajo potencial hidrogeológico: Porosidad media y permeabilidad media
D	Sin potencial hidrogeológico: Baja Porosidad y baja permeabilidad

Usos del suelo: Para obtener el mapa de uso de suelos se trabajó con una fotografía digital en alta resolución de la zona que permite observar la clasificación de los usos de suelo en muchas categorías, en este artículo se clasificaron en 6 grandes grupos agrupados de la manera como se muestra en la Tabla 5, su representación digital se muestra en la Figura 8.

Tabla 5. Descripción de la clasificación del uso del suelo en la Mesa de los Santos

CLASIFICACIÓN USOS DEL SUELO	DESCRIPCIÓN
Suelo 1	Suelo desnudo, zonas erosionada, rastrojos y afloramientos rocosos
Suelo 2	Zona urbana
Suelo 3	Bosques y pajonales
Suelo 4	Cultivos
Suelo 5	Pastos
Suelo 6	Vegetación y cuerpos de agua

Figura 8. Clasificación del Uso del suelo en la zona



Fuente: *Fotografía digital, Modificado por los autores*

Luego de obtener el CN ponderado de cada subcuenca se aplica la fórmula del SCS para el cálculo de la escorrentía directa (P_e) se usó un CN por cuenca y se obtuvo un P_e para cada cuenca de esta manera se hace una distribución espacial de P_e en la zona de estudio (Anexo 9: Calculo tipo para obtener el CN ponderado por Sub-cuenca).

La escorrentía directa es la parte de la precipitación que no se infiltra o se evapora al momento del evento hidrológico, Al calcularla mediante el método de SCS se tuvo en cuenta solamente la capacidad instantánea del suelo para absorber agua, para establecer la precipitación de la sub-cuenca se hizo mediante el uso del mapa de distribución de la precipitación, se encuentra la precipitación en cada sub-cuenca (Anexo 10: Parámetros CN, S y P utilizados en el cálculo de la escorrentía directa para cada sub-cuenca).

2.4 EFECTO antrópico

Se entiende por factor antrópico, la cantidad de agua necesaria para consumo humano o para realizar las actividades del hombre. El factor antrópico se considera como una salida del sistema en forma subterránea y superficial así se tiene en cuenta el uso de aguas para actividades de consumo humano como se describe en la ecuación (12). (Comunicación Personal)

$$A = I_g + I_s + D \quad (9)$$

Dónde:

A= Perdidas por efecto antrópico

I_g= Perdidas por uso de agua subterránea

I_s= Perdidas por uso de agua superficial para consumo humano

D= Perdidas por uso de agua superficial para agricultura

- Para la Mesa de los Santos el uso de agua subterránea para consumo humano y para desarrollar algunas actividades cotidianas como la agricultura, la avicultura o la ganadería es representativo, El Instituto de INGEOMINAS realizo en el año 2007 un censo abarcando la totalidad de accesos a agua subterránea que hay en la mesa (185 captaciones de agua subterránea) [17]. Para las perdidas por uso de agua subterránea se trabajó con este censo de manera que se obtuvo una relación muy cercana al estado real del agua, se tiene en cuenta que en la Mesa de los Santos no hay un sistema de acueducto y sus habitantes optaron por hacer perforaciones, aljibes o lagos para recoger agua a través de la lluvia o del flujo subterráneo. Se consideró que el 30% del consumo de las captaciones representa las perdidas por uso de agua subterránea

- Para estimar las pérdidas por consumo humano se tiene en cuenta los planes de ordenamiento territorial de los municipios de los Santos, Girón y Piedecuesta. Se estima que en la Mesa de los Santos hay una población aproximada de 17000 habitantes y el valor del consumo per cápita es de 200[lit/hab-día]. Las pérdidas por efecto antrópico se consideraron con un porcentaje del 30% del consumo humano.
- Las pérdidas por uso de agua superficial para agricultura también se tuvieron en cuenta, dado que cerca del 50% del requerimiento se pierde a través del sistema de recolección y distribución, y retorna al sistema de una manera u otra, se entiende como pérdidas la parte del requerimiento hídrico que llega al cultivo y sale por evaporación. Esta pérdida se calcula como un 30 % del consumo hídrico calculado a partir de la evaporación del cultivo según la información de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), que determina un coeficiente para cada tipo de cultivo, y estima el requerimiento a partir de la ecuación (13) [16].

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (10)$$

Siendo:

ET_c = Evapotranspiración del cultivo

K_c= coeficiente de cultivo

ET_o= Evapotranspiración de referencia

En la “tabla 6” se encuentran los valores obtenidos como pérdidas por efecto antrópico relacionados para cada uso del agua, y de esta forma estimar un porcentaje de pérdidas en la zona de estudio (Anexo 11: cultivo de la zona y tabla de coeficientes de cultivo)

Tabla 6. Pérdidas por efecto antrópico

	Pérdidas por efecto antrópico [mm/año]		
	uso de agua subterránea	uso de agua superficial por consumo humano	Uso de agua superficial para agricultura
Consumo humano	8.000	18.65	
Otras	0.59		302.55
Pérdidas	2.40	5.60	90.77

2.5 DISTRIBUCIÓN DE LAS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO

Para representar los parámetros de estudio se generaron mapas de distribución de las variables hidrológicas mediante el programa SURFER 10 producido por la Golden Software, Inc. El cual cuenta con una serie de algoritmos interpoladores. La distribución se hace usando el interpolador Kriging lineal. Kriging es muy utilizado tanto en la generación del modelo digital de elevaciones como en otros campos. Es un procedimiento geo estadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z, está basado en modelos estadísticos que incluyen la auto correlación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones [17].

2.6 DIRECCIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

En el presente estudio se llevó a cabo la identificación de los lugares donde hay aprovechamiento del recurso subterráneo, El Instituto de INGEOMINAS realizó en

el año 2007 un censo abarcando la totalidad de accesos a agua subterránea que hay en la mesa (185 captaciones de agua subterránea) [18], se escogió un total de 28 puntos distribuidos en la formación de los Santos como muestra representativa. Se desarrollaron salidas a campo divididas en dos temporadas, Época de lluvias en Abril de 2015 (invierno) y ya que la Mesa de los Santos paso por una larga temporada seca después de mitad de año se realizó la salida de verano en Octubre de 2015, donde se pudieron visitar y verificar características como el pH, conductividad eléctrica, temperatura, localización y altura sobre el nivel del mar, y así hallar el nivel freático de la zona.

En la zona se visitaron 28 captaciones de agua subterránea clasificadas según su tipo como se registra en la Tabla 7.

Tabla 7. Clasificación de los puntos de agua subterránea visitados inicialmente en la Mesa de los Santos.

Aljibe	17
Pozos Perforados	9
Manantial	2
Total	28

En las visitas realizadas se hizo una toma de los niveles estáticos, utilizando la sonda de nivel, la cual se introduce en el pozo o cisterna de manera muy suave, para evitar que esta se atasque con los cables de la motobomba. Al tener contacto la punta de la sonda con la superficie del agua, ésta emite un sonido, el cual indica que se pueda tomar la lectura de la profundidad del agua en el pozo, para la toma de las características de pH, conductividad y temperatura se utilizó un multiparametros HANNA. Durante el transcurso de la toma de datos en la salida de campo realizada en Abril se presentaron algunos inconvenientes, que

impidieron la recolección o verificación de la información de muchos de los puntos a visitar, algunos de estos problemas se describen a continuación:

- En algunos lugares visitados los pozos se encontraban totalmente cerrados, sellados por tapas de acero y el ingreso de la sonda fue imposible.
- Al nivel que descendió la sonda no se encontró nivel de agua
- El aljibe se selló por condiciones naturales (desbarrancamiento del terreno)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 BALANCE HÍDRICO

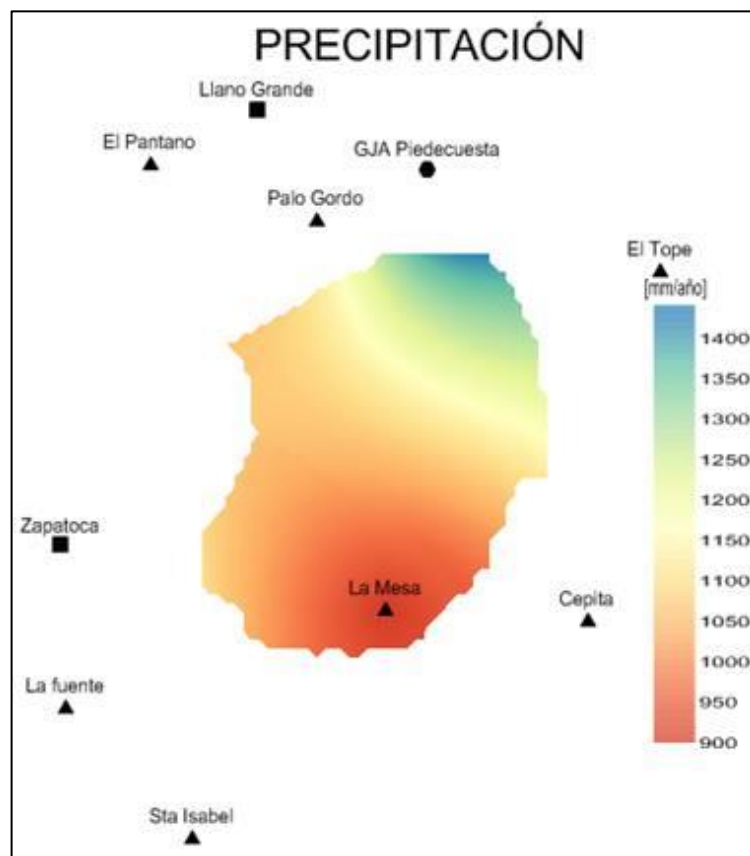
La ecuación de balance hídrico es una expresión muy simple, pero la eficiencia de ésta depende de una adecuada estimación de las componentes del ciclo hidrológico que hacen parte de la ecuación. Es importante comprender el ciclo en sus diferentes fases, la forma en que el agua se recibe por precipitación y se reparte entre los procesos de evapotranspiración, escorrentía, efecto antrópico e infiltración. El cálculo y estimación de sus componentes es complicado debido a la falta de medidas directas, la variación espacial de la evapotranspiración, las pérdidas profundas (en acuíferos) y las variaciones del agua almacenada en la cuenca. El balance hídrico que se desarrolla en la mesa de los santos se hace para conocer la recarga potencial que hay en la zona, es decir la cantidad de agua que está disponible y que ingresa por infiltración al terreno incorporándose a la red de aguas subterráneas luego de un evento de precipitación.

La precipitación (Agua que cae en un determinado sitio P): es la componente del ciclo hidrológico que permite la entrada hídrica, se evidencia que la zona de estudio está afectado por el paso de la ZCIT por Colombia, de esta manera para la mesa de los Santos la precipitación presenta dos épocas secas y dos épocas húmedas al año.

Al distribuir la precipitación promedio multianual se observa que la zona sur-Este de la mesa de los santos presenta los niveles más bajos de precipitación y en zona norte presenta niveles superiores, estos niveles corresponden a la zona de Piedecuesta y Girón que se encuentran dentro de la Mesa de los Santos. En la Figura 9 se muestra el mapa con la distribución de la precipitación promedio

multianual de la Mesa de los Santos considerando que sus valores de precipitación están comprendidos mayormente en niveles bajos a medios. Los valores oscilan entre 900 y 1400 mm/año. Se obtuvo un valor de precipitación multianual promedio de 1145.60 mm/año. (Anexo 12: Precipitación acumulada multianual para cada estación).

Figura 9. Distribución de la precipitación mm/año



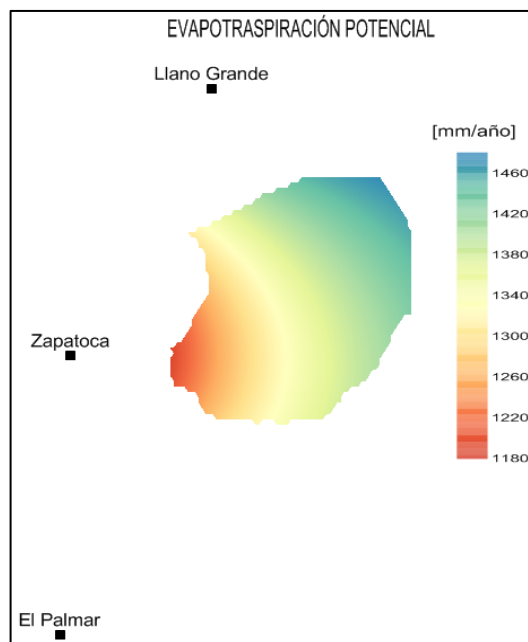
Fuente: Surfer 10, Modificado por los autores

La evapotranspiración (Parte que vuelve a la atmósfera ya sea por evaporación directa o por transpiración de la vegetación ETR): es la componente con mayor incidencia en las salidas del balance hídrico, es decir que gran parte de la

precipitación sale de una cuenca por evapotranspiración, las zonas con mayor precipitación son las zonas que presentan menor evapotranspiración, esto se debe en gran parte a que la temperatura en zonas húmedas es menor a la que se presenta en zonas más secas y esta componente depende también de otros factores climáticos como la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar entre otros.

En el procedimiento para obtener la ETR se realizó el cálculo de la ETP. En la Figura 10 se muestra el mapa de la distribución de ETP calculada a partir del método de GARCÍA Y LÓPEZ en la Mesa de los Santos, sus valores varían entre los 1180 y los 1460 mm/año, se estima que para la zona hay un valor promedio de ETP de 1367.50mm/año.

Figura 10. Distribución de la evapotranspiración potencial en mm/año, método de García y López

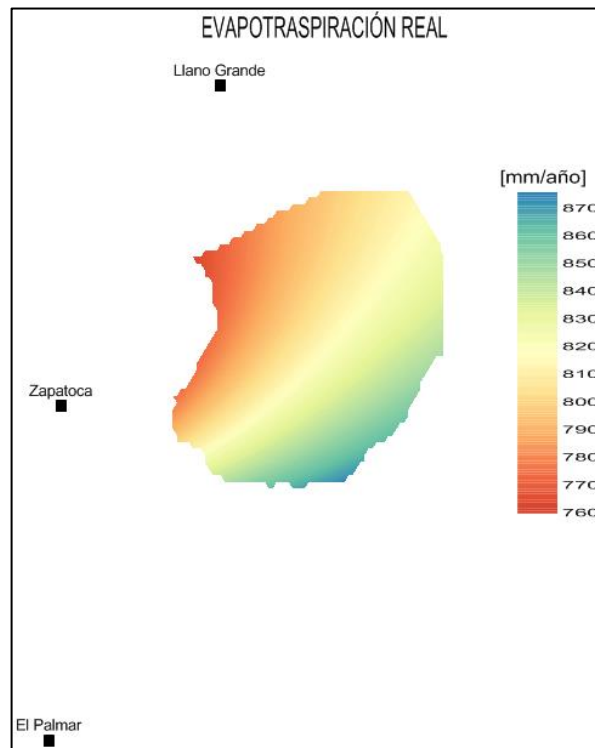


Fuente: Surfer 10, Modificado por los autores

Luego de seleccionar a GARCÍA Y LÓPEZ como la ecuación que representa mejor el fenómeno de ETP en la zona, Se calculó la ETR a partir de la ecuación de BUDIKO. El uso de la ETP y la precipitación permiten obtener una estimación más acertada de la ETR, da un rango de confiabilidad superior para este cálculo, dado que la estimación de la ET es un parámetro que se puede estimar de manera aproximada mas no medir (Anexo 13: Valores de evapotranspiración potencial multianual para cada estación).

En la Figura 11 se muestra el mapa de distribución de la evapotranspiración en la zona, que varía entre los 760 y 880 mm/año, obteniendo una evapotranspiración promedio multianual para la zona de 814.78 mm/año.

Figura 11. Distribución de la evapotranspiración real en mm/año

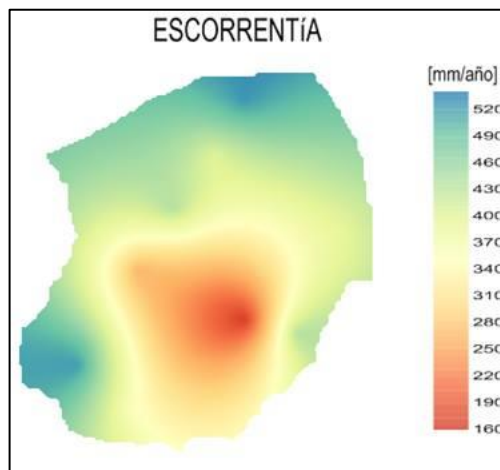


Fuente: *Surfer 10*, Modificado por los autores

La escorrentía (Parte que escurre por la superficie de la cuenca Q): es una componente del ciclo hidrológico que se estima a partir de datos hidrogeológicos de la zona, es decir según la capacidad de permeabilidad y porosidad del suelo y el uso de suelo en la región, la escorrentía también depende directamente de la precipitación por ello las zonas con menor escorrentía es al Sureste de la Mesa de los Santos.

Los cálculos realizados se hacen con base en la Precipitación efectiva, para el balance hídrico esta precipitación representara la escorrentía directa de la zona. Al realizar la distribución de la precipitación efectiva en la zona de estudio se obtiene un mapa mostrado en la Figura12 y una escorrentía que varía entre los 160 y 520 mm/año, con un promedio multianual de 400.43 mm/año.

Figura 12. Distribución de la escorrentía directa anual en mm/amo



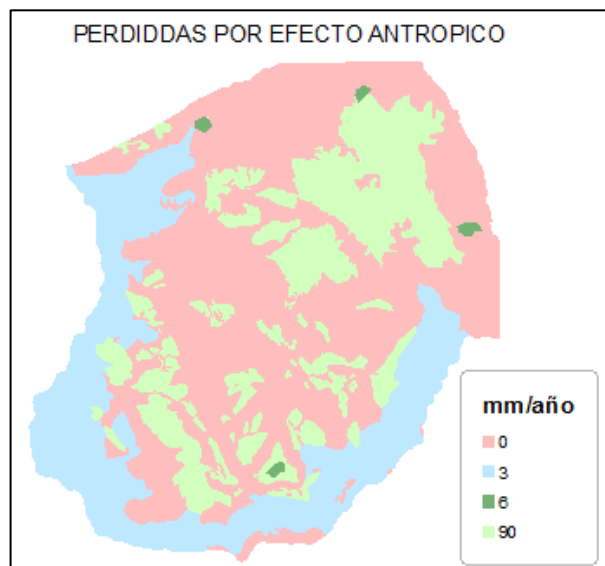
Fuente: Surfer 10, Modificado por los autores

Las pérdidas por efecto antrópico (Captaciones de agua para desarrollar actividades de consumo humano A): se hacen muy bajas, pues la mayor parte de la mesa presenta escasez de agua en varias épocas del año por ello su agricultura

es muy baja y el cultivo con mayor incidencia en la zona es el tabaco pues este se adapta bien a las condiciones climáticas de la zona. Para la Mesa de los Santos su principal actividad es el turismo, pero no cuentan con una fuente estable de agua potable como lo es sistema de acueducto local, sus habitantes optan por suministrar agua para consumo humano por medio de captaciones de agua subterránea, lagos, o por suministro que hace el carro de bomberos en épocas muy secas.

Al distribuir las pérdidas por efecto antrópico en la zona de estudio se estimó un valor promedio Multianual de 17.53 mm/año, un valor bajo debido a que la pérdida que más salida genera es el uso de agua superficial para la agricultura, pero la extensión de la zona agrícola en la Mesa de los santos es baja en comparación con su extensión total 242 Km². La visualización de estas pérdidas se hace a través de un mapa representado en la Figura 13.

Figura 13. Distribución espacial de las pérdidas por efecto antrópico en mm/año



Fuente: *Modificado por los autores*

Recarga potencial: Luego de hacer el estudio y análisis a los parámetros involucrados en la ecuación de balance se hace el cálculo para obtener la recarga potencial con el uso de la ecuación (3). Para la zona de estudio la infiltración anual es un valor negativo, es decir su recarga potencial en escala anual es nula, pero esto no indica que en una escala más pequeña también sea negativo. Un valor por debajo de cero en la infiltración indica que la zona presenta mayor demanda por salida que la oferta que se produce por precipitación. La demanda por evapotranspiración y escorrentía son parámetros que dependen en gran medida de la cobertura vegetal de la zona y del tipo de suelo como se evidencia en las estimaciones de cada parámetro realizadas anteriormente. La Mesa de los Santos presenta una cobertura vegetal escasa que desfavorece el fenómeno de infiltración del agua en la tierra. Así mismo se puede observar que la oferta hídrica ($OF = P - ETR$) es baja (330.82 mm/año), esto indica que el agua disponible para abastecer las necesidades del ser humano y el acuífero es poca y que probablemente el acuífero presente déficit en el balance hídrico.

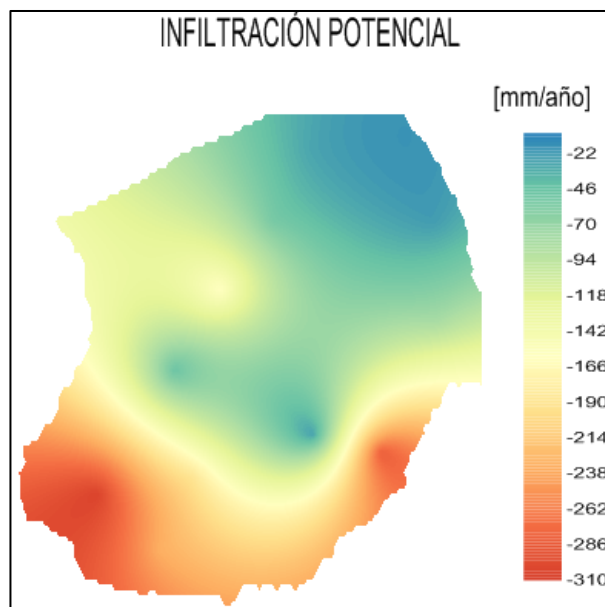
Para el balance hídrico a largo plazo se utilizan los valores promedio multianual de cada parámetro y se obtiene un valor de infiltración potencial como se muestra en la tabla 9. Se obtuvo un valor negativo en la escala anual de (-) 82.07 mm/año, es decir la recarga potencial es nula y hay un déficit en el balance hídrico (Anexo 14: Mapas de los parámetros del balance hídrico).

Tabla 9: *Valores promedio multianual de las componentes del balance hídrico en la Mesa de los Santos*

PARÁMETRO	Valor mm/año
Precipitación (P)	1145.6
Evapotranspiración (ETR)	814.78
Escorrentía (Q)	400.43
Efecto antrópico (A)	17.53
Infiltración potencial (I)	-85.14

Sin embargo existe una recarga efectiva que se observa en las la cantidad de agua bombeada y el número de captaciones de agua subterránea de la zona (180 en total). La distribución de la infiltración en la zona se hizo operando los mapas entre si y aunque la zona noreste presenta un déficit menor se puede observar que la Mesa de los Santos Presenta un déficit en el balance por infiltración de valores entre los (-) 22 y (-) 310 mm/año, con un promedio anual de (-) 82.07 mm/año, es decir que su recarga potencial no se hace visible en una escala anual, ver Figura 14.

Figura14. Distribución espacial de las pérdidas por efecto antrópico en mm/año



3.2 DIRECCIONES DE FLUJO

Para determinar niveles y direcciones de flujo subterráneo se realizaron medidas de campo en dos épocas del año, y se analizaron los datos obtenidos de niveles piezométricos.

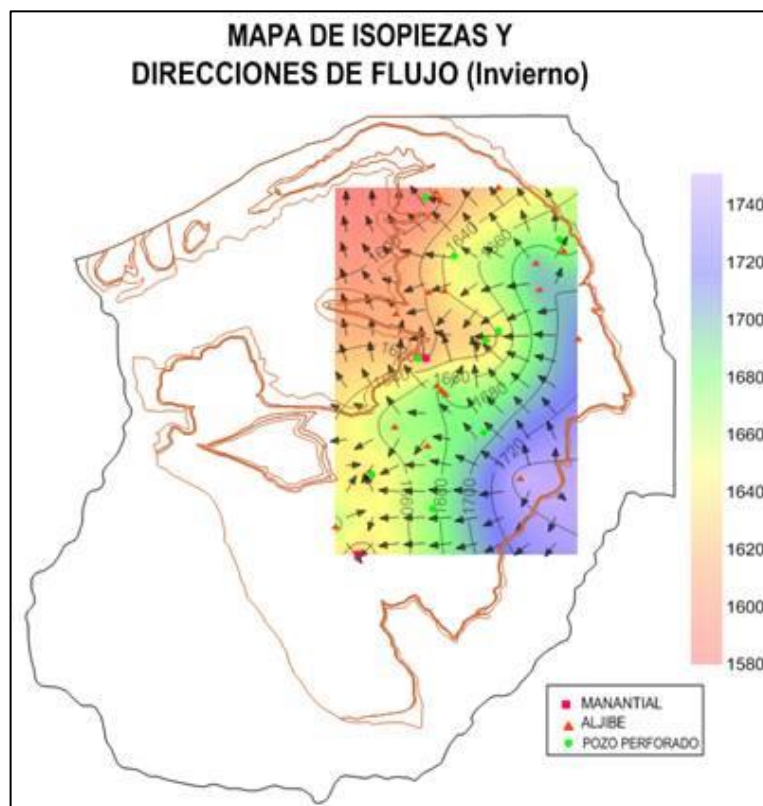
En el análisis comparativo de los mapas de direcciones de flujo se puede observar que presenta un sentido de Este a Oeste (dirección natural del flujo) pero se ve afectado por zonas de alto bombeo que hacen que la dirección del flujo cambie y genere una denominada zona de drenaje. Que la dirección del flujo se ve afectada indica que el acuífero presenta sobreexplotación en las captaciones de agua subterránea. La dirección del flujo no se ve afectada por el cambio climático, es decir que esta permanece constante en las dos épocas, presentando la misma afectación por sobreexplotación.

Otra característica a resaltar es que el nivel en la época de verano bajo comparado con la época de invierno, se puede observar este cambio inicialmente porque 3 aljibes no presentaron nivel de agua (se secaron) y en 5 pozos perforados la sonda de nivel descendió hasta encontrar un obstáculo y no registro nivel de agua, puntos que para en la salida de invierno si tuvieron este registro. Una vez encontrado el nivel piezométricos de las dos épocas se observó que descendió en promedio 3.04 m para la época de verano respecto de la época de invierno

Invierno: Se conformó un listado con un total de 28 tomas o puntos de agua subterránea en la formación geológica Los Santos ubicada en la Mesa de Los Santos, de los cuales, 17 son aljibes, 9 pozos perforados y 2 Manantiales, que se denominaran como puntos de acceso a aguas subterráneas. Al ubicar estos puntos y sus niveles piezométricos en un mapa de la formación geológica

presente en la Mesa de los santos, e interpolar sus niveles piezométricos se obtuvo un mapa de direcciones de flujo del agua subterránea Figura 15 (Anexo 15: Cuadro con registro de los parámetros medidos en campo para la época de invierno).

Figura 15. Mapa de curvas de isopiezas desarrollado a partir de los niveles piezométricos

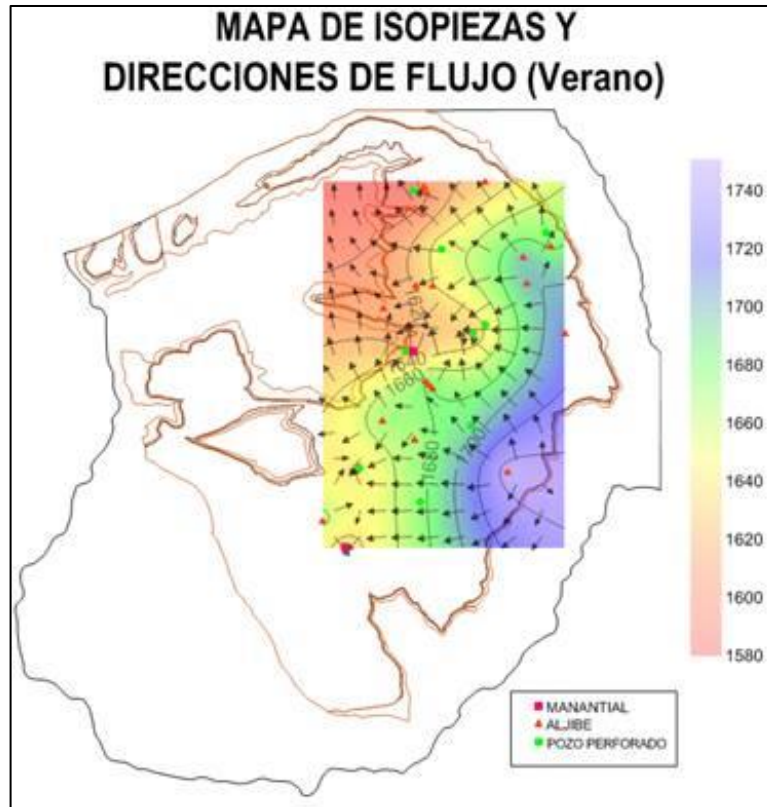


Fuente: Surfer 10, Modificado por los autores

Verano: se visitaron los mismos puntos que en la salida de invierno, pero para algunas de las captaciones fue imposible obtener registro. Al ubicar estos puntos y sus niveles piezométricos en un mapa de la formación geológica presente en la Mesa de los santos, e interpolar sus niveles piezométricos se obtuvo un mapa de

direcciones de flujo del agua subterránea Figura 16. (Anexo 16: Cuadro con registro de los parámetros medidos en campo para la época de verano).

Figura 16. Mapa de curvas de isopiezas desarrollado a partir de los niveles piezométricos



Fuente: Surfer 10, Modificado por los autores

4. CONCLUSIONES

- La precipitación en la Mesa de los Santos está caracterizada por la influencia de la ubicación de Colombia en la zona de convergencia intertropical (ZCIT), Esta influencia causa que en la precipitación anual se presente el fenómeno bimodal de la lluvia caracterizado por tener dos épocas húmedas (Abril-Mayo y Septiembre-Octubre-Noviembre) y dos épocas secas (Diciembre-Enero y Junio-Julio-Agosto). En la zona de estudio se encuentra que la estación ubicada en la Mesa de los Santos (La Mesa) presenta los niveles más bajos de precipitación mensual y precipitación anual (863.61 mm/año)
- Estimar la recarga potencial de una zona es útil para saber la infiltración que puede ocurrir después de un evento de precipitación, para la Mesa de los Santos este valor es nulo en la escala anual, lo que indica que debido a la condiciones climáticas y de suelo no presenta un potencial para almacenar agua o aportar al acuífero. Inicialmente se observa que la Mesa de los Santos presenta un valor promedio de 330.82 (mm/año) para la oferta hídrica, es decir que el 29% de la precipitación queda disponible para abastecer las necesidades hídricas de la zona. Se considera que el valor de esta oferta es bajo por lo tanto se entiende que la zona presente un déficit de (-) 85.14 (mm/año) en la infiltración potencial. Este balance se realizó a largo plazo y su valor de recarga potencial absoluta es nula, pero no se puede asumir que sea nula para todas las épocas del año, para tener mayor certeza es recomendable realizar un balance hídrico en una escala de tiempo más pequeña.
- Las captaciones de agua subterránea en la Mesa de los Santos se encuentran sobre el Miembro Superior de la Formación geológica Los Santos que presenta mayor potencial hidrogeológico, esto favorece la posibilidad de recarga a los acuíferos luego de un evento de lluvia. Para el suroeste de la

mesa donde se encuentra la formación geológica Rosablanca no se registran puntos de acceso a agua subterránea debido a que este tipo de formación presenta baja porosidad y baja permeabilidad que no favorecen la infiltración después de un evento de lluvia. El sistema acuífero se caracteriza hidrodinámica por presentar un flujo general de aguas subterráneas en dirección de este a oeste. Sin embargo a partir representación gráfica de los datos medido en campo se observan zonas alto bombeo donde se puede decir que el acuífero esta siendo sobreexplotado, razón por la cual la dirección del flujo se modifica alrededor de la captación, desarrollando una red denominada zona de descarga en ambas épocas (invierno y verano).

- Las direcciones del flujo de agua subterránea no presentan diferencias considerables de una época a la otra. Pero para la época de verano se encuentra que el nivel piezométricos desciende en promedio 3.04 m, en algunos puntos desciende tanto que no registra nivel, lo que ocasiona que algunos aljibes se sequen afectando a la población que utiliza el agua subterránea como fuente hídrica para consumo humano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Tomado del Esquema de ordenamiento territorial municipio de Los Santos-Santander

[2] Pinto J. y Mora J., Análisis preliminar del potencial hidrogeológico en la Mesa de Los Santos, región central del departamento de Santander. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

[3] Balance Hídrico Nacional. Disponible en: <http://encolombia.com/medio-ambiente/interesa/estudioagua/estudiocolombianoaguas1/#sthash.J853VYQE.dpuf> [Citado 14 de octubre de 2015]

[4] Gómez S., Rojas N., Colegial J., Zelandia. -2007. Proyecto de Investigación Geológica e Hidrogeológica en la Región central del departamento de Santander. Tomo II. Convenio UIS-Ingeominas.

[5] Rodríguez J., Torres D., Inventario de puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentarios de la región de Bucaramanga, trabajo de grado para Ingeniería Civil, UIS, Bucaramanga, 2011

[6] Gómez S., Rojas N., Colegial J., Velandia. -2007. Proyecto de Investigación Geológica e Hidrogeológica en la Región central del departamento de Santander. Tomo II. Convenio UIS-Ingeominas.

[7] Castro L., Carvajal Y., Análisis de tendencias y Homogeneidad en series climatológicas: Revista EIDENAR, Junio 2010

[8] Marín V., Evaluación de la relación entre evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca, Trabajo de Grado ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá DC 2010

[9] García S., Otero J., Estimación De La Evapotranspiración Real En La Cuenca Superior Del Rio Lebrija; Trabajo de Grado Ingeniería Civil, UIS, Bucaramanga 2005

[10] Almorox J., Metodos de estimación de la Evapotranspiracion ETP y ETr, Universidad politécnica de Madrid, disponible en: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/evapotranspiraciones> [Citado: 17 de Noviembre de 2015]

[11] Castro M., Guzmán O., Estudio Comparativo de Formulas de Evapotranspiración Potencial en Colombia, Bogotá, 1985.

[12] Amaya G., Restrepo C., Velez M., Vélez J., Álvarez O., Modelación del comportamiento hidrológico de tres cuencas en el Urabá Antioqueño-Colombia, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Medellín 2009.

[13] Hidrología superficial y subterránea, Capitulo 5, Universidad de Coruña-España, Disponible en: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/ [Citado: 15 de Noviembre de 2015]

[14] Chow V., Maidment D., Mays L., Hidrología Aplicada, McGraw Hill

[15] Rivera H., Ramírez R., Vanegas R., Metodología del cálculo de índices de escases, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá, 2004

[16] Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M., Evapotranspiración de cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos, Roma, 2006.

[17]ArcGIS Resource Center. Disponible en:
<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z00000076000000> [Citado: 14 octubre de 2015]

[18]Investigación Geológica e Hidrogeológica en La Mesa de los Santos, Sector Nordeste de Curití y Borde Occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander, Inventario de Puntos de agua (aljibes), INGEOMINAS ,2007.
Investigación Geológica e Hidrogeológica en La Mesa de los Santos, Sector Nordeste de Curití y Borde Occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander, Inventario de Puntos de agua (Pozoz), INGEOMINAS ,2007.

BIBLIOGRAFÍA

ALLEN R., PEREIRA L., RAES D., SMITH M., Evapotranspiración de cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos, Roma, 2006.

ALMOROX J., Métodos de estimación de la Evapotranspiración ETP y ETr, Universidad politécnica de Madrid, disponible en: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/evapotranspiraciones> [Citado: 17 de Noviembre de 2015]

AMAYA G., RESTREPO C., VÉLEZ M., VÉLEZ J., ÁLVAREZ O., Modelación del comportamiento hidrológico de tres cuencas en el Urabá Antioqueño-Colombia, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Medellín 2009.

ArcGIS Resource Center. Disponible en: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009z00000076000000> [Citado: 14 octubre de 2015]

Balance Hídrico Nacional. Disponible en: <http://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/estudioagua/estudiocolombianoaguas1/#sthash.J853VYQE.dpuf> [Citado 14 de octubre de 2015]

CASTRO L., CARVAJAL Y., Análisis de tendencias y Homogeneidad en series climatológicas: Revista EIDENAR, Junio 2010

CASTRO M., GUZMÁN O., Estudio Comparativo de Formulas de Evapotranspiración Potencial en Colombia, Bogotá, 1985.

CHOW V., MAIDMENT D., MAYS L., Hidrología Aplicada, McGraw Hill

GARCÍA S., OTERO J., Estimación De La Evapotranspiración Real En La Cuenca Superior Del Rio Lebrija; Trabajo de Grado Ingeniería Civil, UIS, Bucaramanga 2005

GÓMEZ S., ROJAS N., COLEGIAL J., VELANDIA. -2007. Proyecto de Investigación Geológica e Hidrogeológica en la Región central del departamento de Santander. Tomo II. Convenio UIS-Ingeominas.

Hidrología superficial y subterránea, Capitulo 5, Universidad de Coruña-España, Disponible en: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/ [Citado: 15 de Noviembre de 2015]

Investigación Geológica e Hidrogeológica en La Mesa de los Santos, Sector Nordeste de Curití y Borde Occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander, Inventario de Puntos de agua (aljibes), INGEOMINAS ,2007. Investigación Geológica e Hidrogeológica en La Mesa de los Santos, Sector Nordeste de Curití y Borde Occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander, Inventario de Puntos de agua (Pozos), INGEOMINAS ,2007.

MARÍN V., Evaluación de la relación entre evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca, Trabajo de Grado ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá DC 2010

PINTO J. y MORA J., Análisis preliminar del potencial hidrogeológico en la Mesa de Los Santos, región central del departamento de Santander. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

RIVERA H., RAMÍREZ R., VANEGAS R., Metodología del cálculo de índices de escases, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá, 2004

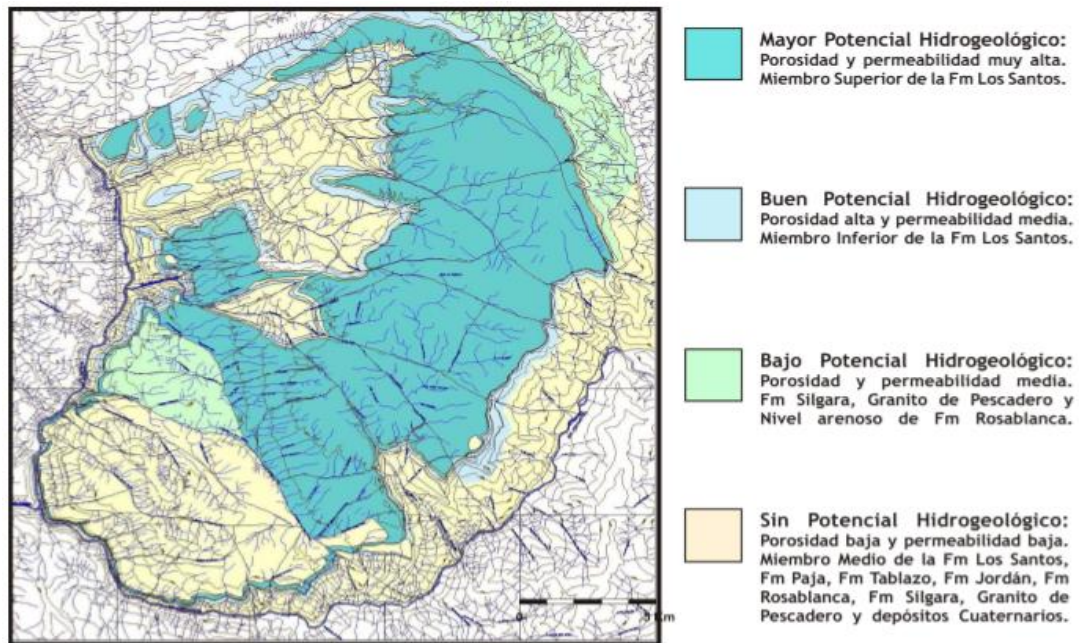
RODRÍGUEZ J., TORRES D., Inventario de puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentarios de la región de Bucaramanga, trabajo de grado para Ingeniería Civil, UIS, Bucaramanga, 2011

Tomado del Esquema de ordenamiento territorial municipio de Los Santos-Santander

ANEXOS

ANEXO A Clasificación hidrogeológica de la Mesa de los Santos

Figura 1. Mapa Hidrogeológico la Mesa de los Santos



Fuente: Análisis Preliminar del potencial hidrogeológico de la Mesa de los Santo, Región central del departamento de Santander. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander.

ANEXO B. Calculo tipo del proceso para completar los datos faltantes por mes de las estaciones para el parámetro de precipitación

- Estaciones Sta. Isabel- El Palmar

Tabla 1. Registro de datos recopilados y procesados por el IDEAM estación Sta. Isabel

Valores totales mensuales de Precipitación (mms)													
Estación: STA. ISABEL													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Valor anual
1995	0	26	95	115	160	72	95	180	83	210	34	55	1125
1996	31	37	150	88	120	75	111	121	103	164	78	23	1101
1997	40	96	70	85	130	56	38	103	90	98	33	0	839
1998	4	20	50	68	116	69	135	142	86	160	66	107	1023
1999	0	72	51	117	104	95	128	65	152	168	82	17	1051
2000	56	52	28	93	76	34	76	40	194	148	84	31	912
2001	20	19	15	56	92	80	134	98	199	132	59	34	938
2002	51	3	137	125	228	72	64	32	132	152	49	28	1073
2003	8	41	96	184	59	89	70	116	106	133	84	25	1011
2004	83	40	35	100	205	46	45	19	130	175	91	9	978
2005	56	53	0	35	208	113	60	97	113	116	136	49	1036
2006	17	14	186	88	106	96	83	76	73	178	78	71	1066
2007	28	7	81	94	149	93	99	211	94	209	78	89	1232
2008	4	31	114	67	140	113	92	125	185	104	133	9	1117
2009	62	89	185	76	73	65	46	82	97	116	49	36	976
2010	0	17	82	140	170	83	173	119	167	215	131	25	1322
2011	0	87	70	263	121	89	77	65	119	128	208	101	1328
2012	56	5	225	190	124	64	73	49	98	132	108	10	1134
2013	0	35	65	118	94	38	80	165	141	71	132	102	1041
2014	1	17	4	206	116	44	52	118	61	114	112	3.64	845

Total de datos 240

Datos faltantes 0

% datos faltantes 0

Tabla 2: Registro de datos recopilados y procesados por el IDEAM estación Sta. Isabel

Valores totales mensuales de precipitación (mm)													
Estación: EL PALMAR													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VR ANUAL
1995	1.7	36.4	115.3	130.9	302.7	137.8	152.9	253.8	184.8	236.3	171.4	142.4	1866.4
1996	34.4	99.6	203.3	332.1	242.6	204.9	97.3	205.7	175.9	337.5	146.3	28.2	2107.8
1997	44.7	184.1	82.5	283	231.9	86.7	61.8	240.8	222.8	196.1	138.3	1	1773.7
1998	12	83	99	211.4	186.9	126.8	214.9	160.3	126.8	248.7	207	149.6	1826.4
1999	42.6	172.7	71.8	271.3	235.9	164.9	102.8	125.7	285.5	224.6	261.4	41.5	2000.7
2000	107.2	79.2	178.3	243.9	160.2	122.9	108.8	79.2	184.6	305.5	108.7	22.2	1700.7
2001	45.1	21.6	163.5	245.9	121	255.1	77.8	205.8	103.2	252.7	117.5	63.8	1673
2002	29.8	40.8	229.5	372.2	222.5	97.3	78.5	182.1	178.8	163.6	109.3	126.6	1831
2003	31.5	70	131.3	268.7	114.1	193.1	153.6	121.5	232.2	257.3	215.1	76.4	1864.8
2004	71.5	59.9	161.2	207.2	234.9	53.8	96	70.5	184.8	297.4	209.8	64.4	1711.4
2005	167.4	62	16.2	150.4	208.4	85.6	253.4	114.8	188.5	253.8	336.8	87.1	1924.4
2006	81.3	70.5	242.5	170.5	151.8	247.3	91.5	87.1	82.5	215.6	251.2	124.3	1816.1
2007	97.2	46.9	111.1	206.2	300.4	69.8	174.5	152.2	157.8	293.9	183.7	173	1966.7
2008	58.5	67.5	56	117.8	287.8	166.7	133.9	145.9	182.4	231.7	196.6	31.1	1675.9
2009	76.4	120.1	328.4	161.6	117.5	109.9	40	171.5	96.2	147	232.3	DF	1600.9
2010	17.9	32.2	71.9	200.3	270.8	196.1	254.6	162.8	374.1	494.7	282.5	64.4	2422.3
2011	66.8	115.9	247.7	444.3	316.1	112.8	66.7	200.8	113.1	311.2	202.6	178.7	2376.7
2012	62.6	2.9	296.7	313.9	163.3	123.9	132.5	150.6	153.1	138.2	139.7	25.5	1702.9
2013	23.3	72.7	146.3	134.9	279.5	43	123.3	363.2	190.9	248.6	182.6	DF	1808.3
2014	26.7	95.7	129.3	199.4	209	70.6	81.1	289.9	204.7	271.4	172.7	113	1863.5

Total de datos 240
 Datos faltantes 2
 % datos faltantes 0.83

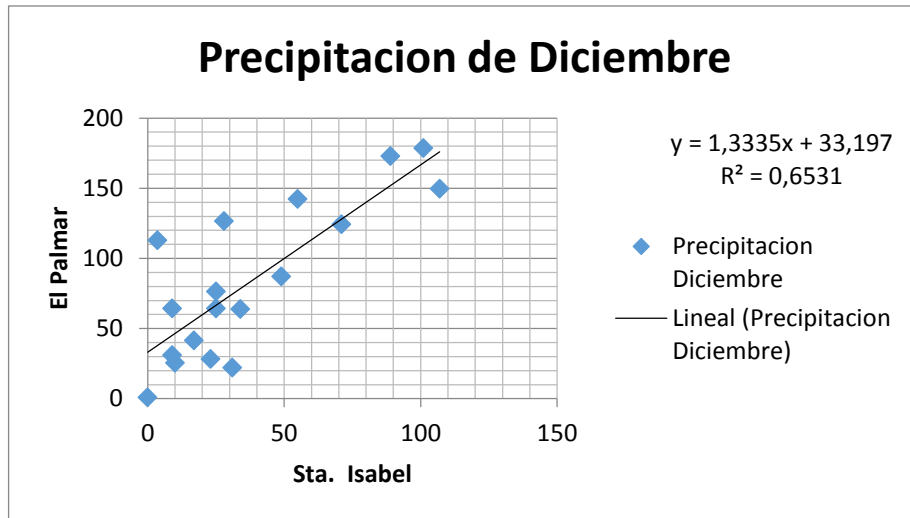
Regresión para encontrar la ecuación que relaciona los registros de la estación Sta. Isabel con los registros de la estación El Palmar y completar los Datos faltantes (DF)

Tabla 3: *Datos de interpolación para el mes de Diciembre*

Datos faltantes			
AÑO	Sta. Isabel	El Palmar	
2009	36	DF	81.2
2013	102	DF	169.2

AÑO	La Fuente	Zapotoca
1995	55.0	142.4
1996	23.0	28.2
1997	0.0	1.0
1998	107.0	149.6
1999	17.0	41.5
2000	31.0	22.2
2001	34.0	63.8
2002	28.0	126.6
2003	25.0	76.4
2004	9.0	64.4
2005	49.0	87.1
2006	71.0	124.3
2007	89.0	173.0
2008	9.0	31.1
2010	25.0	64.4
2011	101.0	178.7
2012	10.0	25.5
2014	3.6	113.0

Figura 2: Grafica de interpolación



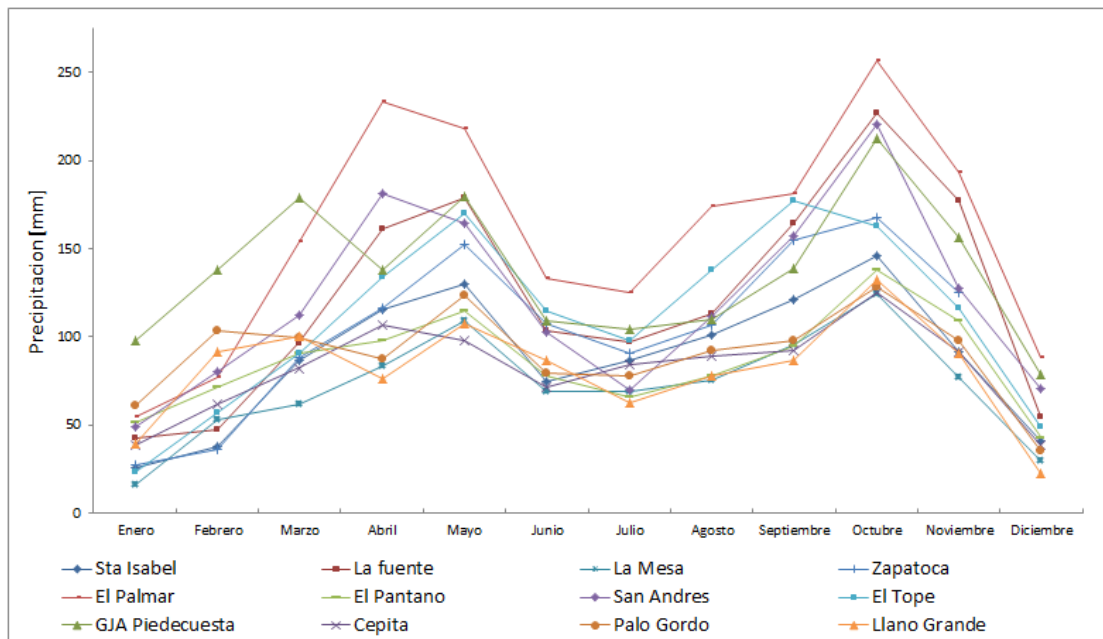
Fuente: Modificado por los autores

ANEXO C. Representación gráfica del ciclo anual para todas las estaciones en estudio

Tabla 4: Precipitación media mensual para las estaciones en estudio [mm].

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Sta Isabel	25.9	38.1	87.0	115.4	129.6	74.3	86.6	101.2	121.2	146.2	91.3	41.2
La fuente	42.2	47.5	96.7	161.3	178.8	103.4	97.3	113.5	164.0	227.1	176.9	54.2
GJA Piedecuesta	98.1	137.7	178.7	138.1	179.5	109.5	103.9	109.7	138.8	212.4	156.1	78.2
Cepita	38.3	61.7	82.2	106.4	98.2	71.5	84.4	88.8	92.3	124.9	91.6	38.6
La Mesa	16.3	53.0	61.7	83.5	109.1	69.0	69.0	75.3	95.3	124.5	77.3	29.5
Palo Gordo	61.1	103.3	99.2	87.1	123.3	79.2	77.5	91.9	97.7	128.0	98.2	35.3
Zapatoca	27.3	36.1	88.1	116.2	152.6	107.5	90.5	106.7	155.1	167.4	125.0	62.3
El Palmar	54.9	76.7	154.1	233.3	217.9	133.5	124.8	174.2	181.1	256.3	193.3	88.2
El Pantano	51.1	71.3	90.8	98.2	114.7	77.8	65.7	78.2	94.6	137.9	109.0	42.9
San Andrés	49.0	80.3	112.0	181.5	164.5	102.6	70.2	111.9	157.3	220.6	127.6	70.9
El Tope	23.2	57.2	91.0	134.2	170.1	114.5	97.9	137.7	176.9	162.7	116.3	48.7
Llano Grande	39.7	91.5	99.9	76.2	107.3	86.9	62.6	78.1	86.6	132.0	90.6	22.2

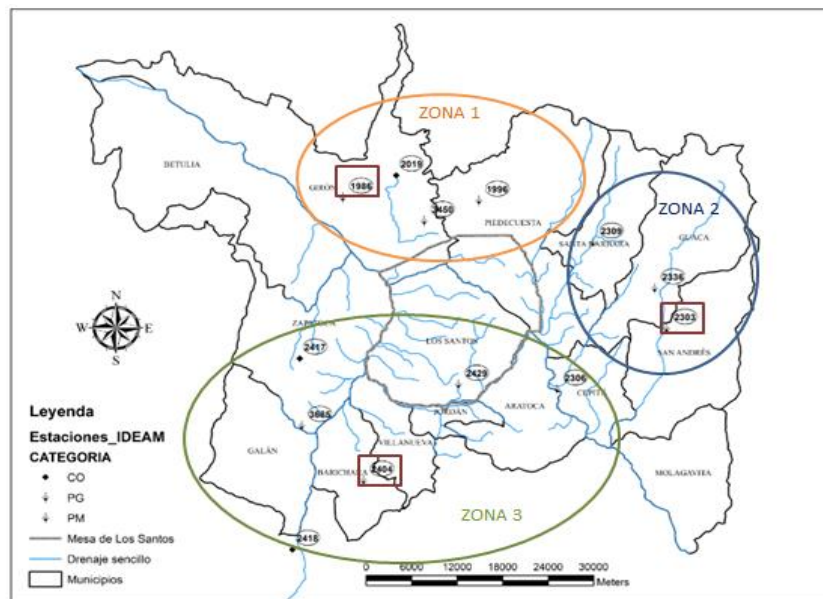
Figura 3: Ciclo de precipitación anual de las estaciones de estudio



Fuente: Modificado por los autores

ANEXO D. Diagrama de doble masa para determinar si la tendencia representa una varianza significativa en las series de cada una de las estaciones. El análisis se hace determinando tres zonas principales, y en cada una de las zonas se toma como referencia la estación que mejor se comporta respecto al ciclo bimodal de las Precipitaciones.

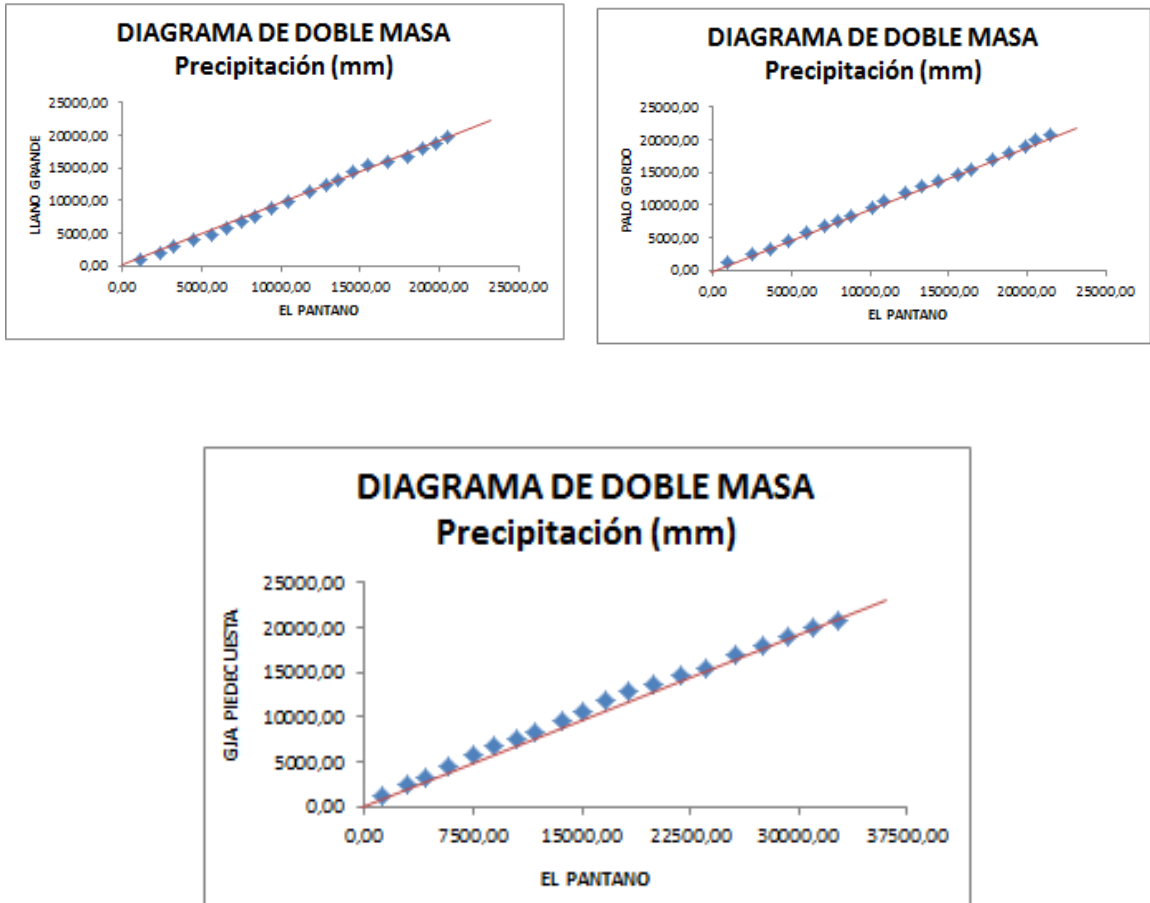
Figura 4: *División por zonas para el análisis de diagramas de doble masa*



Fuente: Modificado por los autores

- ZONA 1: Tomando como referencia la estación de EL PANTANO que presentaba un comportamiento ideal con el comportamiento del ciclo de precipitación anual.

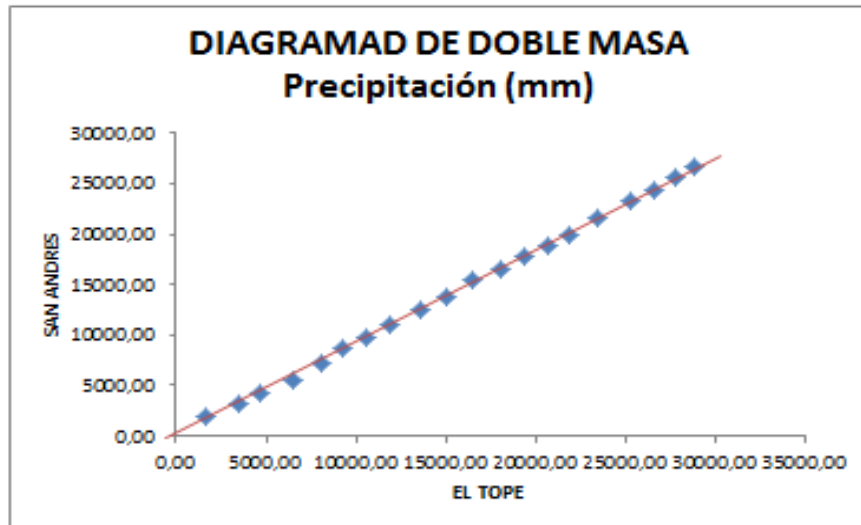
Figura 5: Diagramas de doble masa para las estaciones de la zona 1



Fuente: Modificado por los autores

- ZONA 2: Tomando como referencia la estación de EL TOPE que presentaba un comportamiento ideal con el comportamiento del ciclo de precipitación anual.

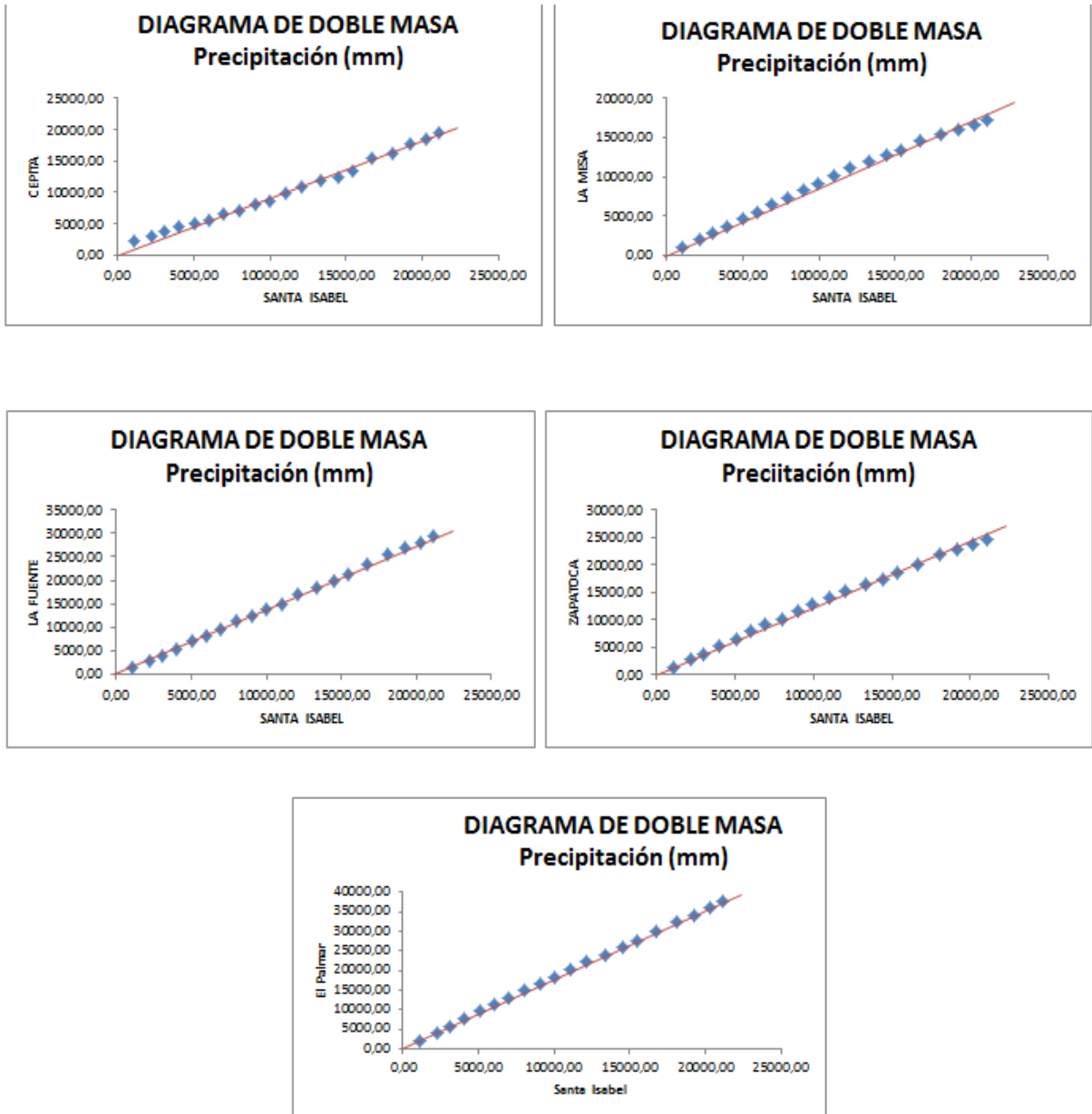
Figura 6: *Diagramas de doble masa para las estaciones de la zona 2*



Fuente: Modificado por los autores

- ZONA 3: Tomando como referencia la estación de STA. ISABEL que presentaba un comportamiento ideal con el comportamiento del ciclo de precipitación anual.

Figura 7: Diagramas de doble masa para las estaciones de la zona 3



Fuente: Modificado por los autores

ANEXO E. Tabla con la descripción de los métodos que se pueden emplear para el cálculo de la Evapotranspiración real y potencial, su implementación depende de los datos que se encuentren disponibles al sitio de estudio.

Tabla 5: Descripción de las ecuaciones para el cálculo de la ET

Método	Descripción	Formula	Tipo
TURC	Esta ecuación utiliza como base el balance de masas	<p>Para $P/L > 0.316$</p> $ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$ <p>Para $P/L < 0.316$</p> $ETR = P$ $L = 300 + 25 * T + 0.5 * T^3$	ETR anual
*TURC-Modificado	Fue desarrollado en zonas húmedas de Europa pero fue ajustado para los casos en los que la humedad relativa es menor a 50%	<p>Para Humedad relativa mensual superior al 50%</p> $ETP = K \left(\frac{T}{T + 15} \right) * (R_g + 50)$ <p>Para Humedad relativa mensual inferior al 50%</p> $ETP = K \left(\frac{T}{T + 15} \right) * (R_g + 50) \left(1 + \frac{50 - H_g}{70} \right)$ <p>K= 0.4 Para meses de 30 y 31 días K=0.37 Para mes de febrero</p>	ETP mensual
COUTAGNE	Se basa en características meteorológicas simples como la precipitación y la temperatura	<p>Para $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$</p> $ETR = P - \lambda P^2$ $\lambda = \frac{1}{0.8 + 1.4 * T}$ <p>Para $P < 1/8\lambda$</p> $ETR=P$ <p>Para $P > 1/2\lambda$</p> $ETR = \frac{1}{4\lambda} = 0.2 + 0.035 * T$	ETR anual

Método	Descripción	Formula	Tipo
*THORNTHWAIT	Esta Formula funciona bien para la zona donde fue desarrollada, pero bajo otras condiciones su comportamiento es muy deficiente	$ETP = 1.6 * \left(\frac{10T}{I}\right)^a$ $I = 12 \left(\frac{T \text{ anual}}{5}\right)^{1.514}$ $a = 675x10^{-9} * I^3 - 771x10^{-7} * I^2 + 179x10^{-4} * I + 0.492$	ETP mensual
CHRISTIANSEN	1966, formula empírica desarrollada a partir de la radiación solar al borde de la atmosfera, humedad relativa, velocidad del viento y datos del lisímetro Tc=Temperatura media W=velocidad media del viento Hm=Humedad relativa S=Brillo solar e=Elevación de la estación	$ETP = 0.324 * Rtt * Ctt * Cwt * Cht * Cst * Ce$ $Ctt = 0.463 + 0.42 \left(\frac{Tc}{Tco = 20^\circ C}\right) + 0.122 \left(\frac{Tc}{Tco = 20^\circ C}\right)^2$ $Cwt = 0.672 + 0.406 \left(\frac{w}{6.7 [Km/hora]}\right) - 0.178 \left(\frac{w}{6.7 [Km/hora]}\right)^2$ $Cht = 1.305 + 0.240 \left(\frac{Hm}{0.60}\right)^2 - 0.275 \left(\frac{Hm}{0.60}\right)^3$ $Cst = 0.340 + 0.856 \left(\frac{S}{0.8}\right) - 0.196 \left(\frac{S}{0.8}\right)^2$ $Ce = 0.970 + 0.030 \left(\frac{e}{305 [m]}\right)$	ETP mensual
*GARCÍA Y LÓPEZ	De acuerdo a estudios realizados en base a esta ecuación se evidencia que tiene un buen comportamiento en las zonas tropicales	$ETP = 1.21x10^n * (1 - 0.01HR) + 0.21T - 2.30$ $n = \frac{7.45T}{234.7 + T}$ <p>HR= humedad relativa promedio</p>	ETP mensual

Método	Descripción	Formula	Tipo
*BLANEY-CRIDDLE	En el trópico esta fórmula presenta generalmente un comportamiento bastante pobre debido a la poca variación que registran en estas latitudes los factores de P y T	$U = K * [P * (8.12 + 0.457T)]$ <p>U= uso consuntivo mensual K coeficiente del cultivo</p> $ET_o = [P * (8.12 + 0.457T)]$ <p>ET_o=Evapotranspiracion de referencia</p>	ET _o Mensual
PENMAN	Se basó en una fórmula que calculaba la evaporación desde una superficie libre de agua, y a partir de ella desarrollo la fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial. Y su uso en la zona tropical es deficiente pues utiliza parámetros muy escasos pues solo los miden estaciones de primer orden	$ETP = \frac{\frac{P_o \Delta}{P \gamma} \left[0.75RA \left(0.29 + 0.42 \frac{n}{N} \right) - \sigma TK^4 (0.56 - 0.79\sqrt{Ed}) + 0.26(Ea - Ed)(1.0 + 0.54U) \right]}{\frac{P_o \Delta}{P \gamma} + 1.0}$ <p>Po=Presión atmosférica a nivel del mar Δ=Gradiente de presión de vapor de saturación γ=Coficiente Psicometrico Ra= Radiación evaporable N=Duración de insolación astronómica máxima durante determinado periodo n=Duración de insolación durante el periodo en estudio σTK⁴=Radiación del cuerpo negro Ea=Presión de Vapor de saturación Ed=Presión de vapor durante el periodo de estudio U= velocidad del viento a dos metros</p>	ETP Mensual
GENICAFE	Obtenida por el Centro Nacional de Estudios del Café , Al aplicar l método de Penman a los datos de las estaciones climatológicas	$ETP = 4.658e^{(-0.002h)}$	ETP diaria

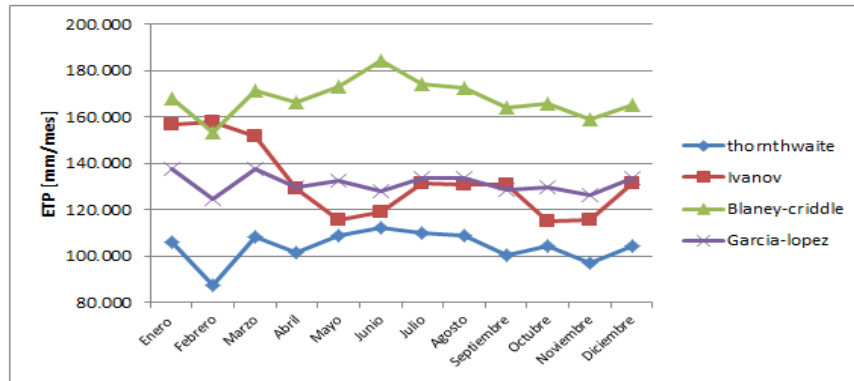
Método	Descripción	Formula	Tipo
	colombianas		
MEYER	Se basa en la ley de Dalton	$ETP = C_1(e_s - e_a) \left(1 + \frac{u}{16.09}\right)$ <p> e_s=Presión de vapor de saturación e_a=Presión de vapor u=velocidad del viento C_1=coeficiente empírico (38 para depósitos pequeños y evaporímetros y 28 para grandes depósitos) </p>	ETP mensual
LESLIE R. HOLDRIDGE	Este método se basó en los diagramas de clasificación de zonas de vida mundiales o formaciones vegetales y el diagrama de movimientos de agua en asociaciones	<p><i>Biotemperatura</i> =</p> $T - \frac{3 * \text{latitud (grados)}}{100} (t - 24)^2$ $ETP = 58.93T_{bio}$ <p>En Colombia:</p> <p>$1 < ETP/P < 64$</p> $\%ETP = 66.182 \left(\frac{ETP}{P}\right)^{-1.0105}$ <p>$0.2 < ETP/P < 1$</p> $\%ETP = 231.5 \left(\frac{ETP}{P}\right)^3 - 495.14 \left(\frac{ETP}{P}\right)^2 + 289 \left(\frac{ETP}{P}\right) + 41.314$ <p>$0.015625 < ETP/P < 0.25$</p> $\%ETP = 33.127 \ln \left(\frac{ETP}{P}\right) + 141.04$ $ETR = (\%ETP)ETP$	ETP Anual ETR Anual
*IVANOV	Este modelo fue propuesto por el investigador ruso Konstantin Evgenevich Ivanov en 1954.	$ETP = 0,018(25 + T_m)^2 \cdot (100 - HR)$	ETP Mensual

Método	Descripción	Formula	Tipo
*BUDYKO	Basada en el estudio de masas	$ETR = \frac{ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right)}{\sqrt{\left(1 - \cosh\left(\frac{P}{ETP}\right) + \sinh\left(\frac{P}{ETP}\right)\right)}}$	ETR Mensual
*Ecuaciones utilizadas para el cálculo y análisis de la Evapotranspiración			

ANEXO F Evapotranspiración potencial mensual calculada a partir de cada método de estudio para cada estación.

- Estación EL PALMAR

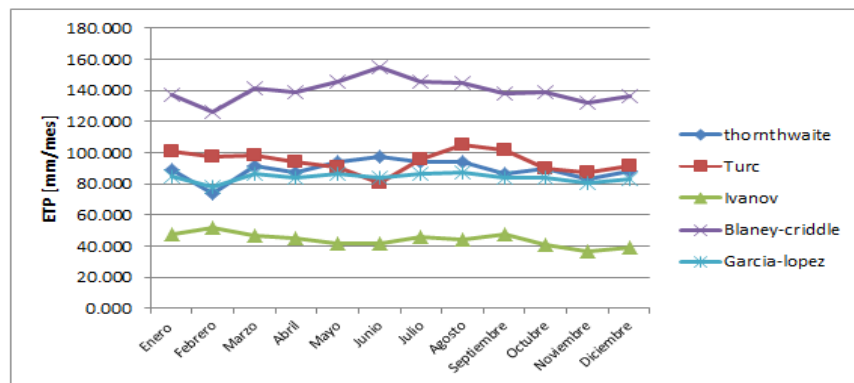
Figura 8: ETP mensual de la estación El Palmar



Fuente: Modificado por los autores

- Estación ZAPATOCA

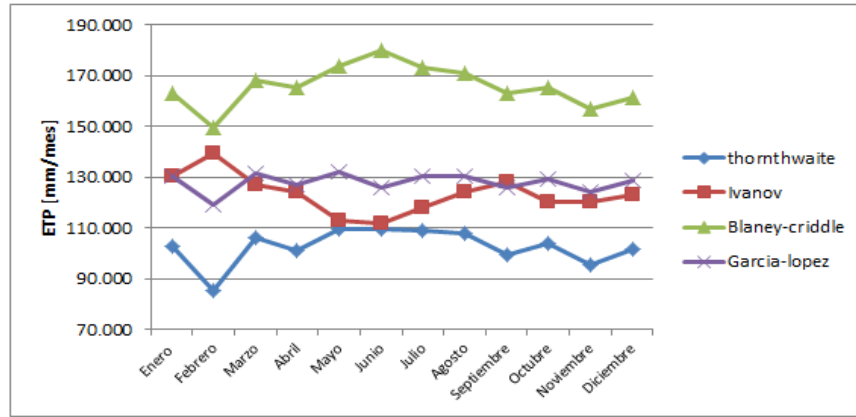
Figura 9: ETP mensual de la estación Zapatoaca



Fuente: Modificado por los autores

- Estación LLANO GRANDE

Figura 10: ETP mensual de la estación Llano Grande



Fuente: Modificado por los autores

ANEXO G. Criterios para selección de la ETP que mejor se ajusta a la zona de estudio

Tabla 6: Coeficientes de correlación

Formula	El Palmar	Zapotoca
THORNTHWAIT	0.0080	0.1070
IVANOV	0.7451	0.4130
BLANEY-CRIDDLE	0.0003	0.1255
GARCÍA Y LÓPEZ	0.4488	0.3149
TURC MODIFICADO	-----	0.3557

Tabla 7: Relación Porcentual

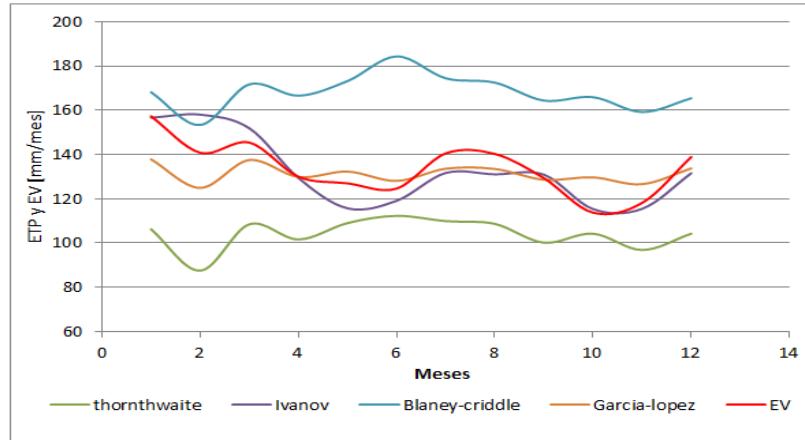
Formula	El Palmar	Zapotoca
THORNTHWAIT	78.37	96.11
IVANOV	98.73	47.45
BLANEY-CRIDDLE	126.69	151.16
GARCÍA Y LÓPEZ	98.75	90.68
TURC MODIFICADO	-----	112.49

Tabla 8: Índice estacional

Formula	El Palmar	Zapotoca
THORNTHWAIT	7.59	6.19
IVANOV	4.47	5.13
BLANEY-CRIDDLE	7.90	6.27
GARCÍA Y LÓPEZ	5.85	5.14
TURC MODIFICADO	-----	4.88

- Estación EL PALMAR

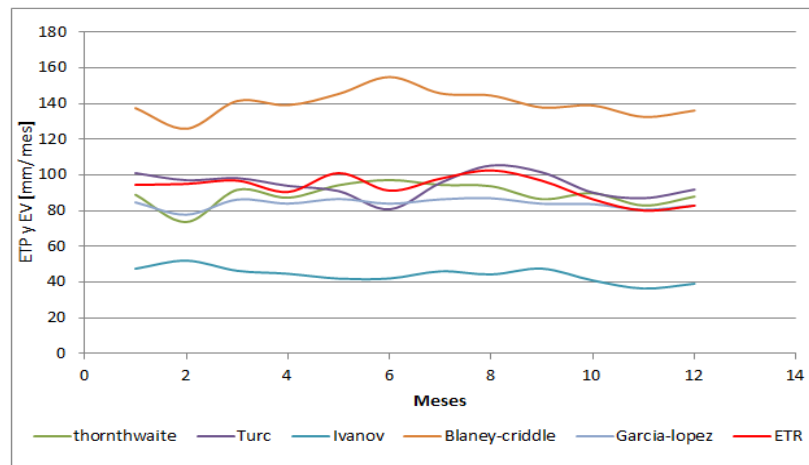
Figura 11: Comparación visual de la EV y las ETP para la estación de El Palmar



Fuente: Modificado por los autores

- Estación ZAPATOCA

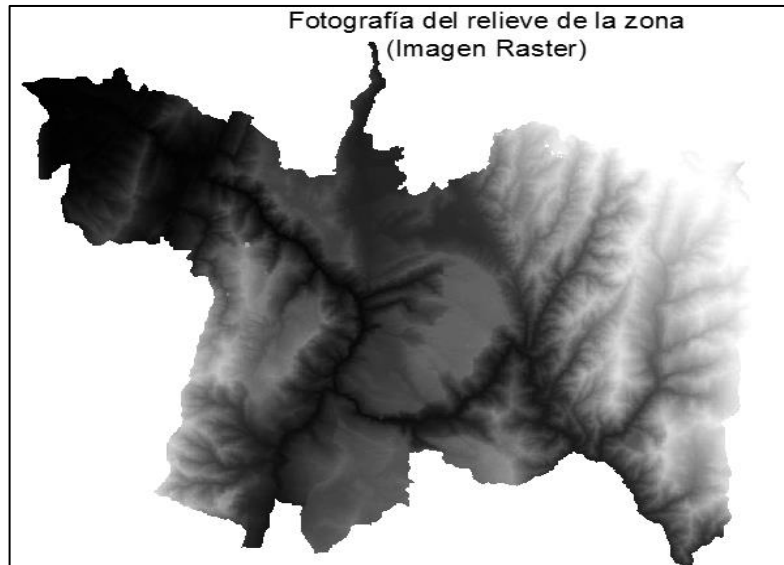
Figura 12: Comparación visual de la EV y las ETP para la estación de Zapatoaca



Fuente: Modificado por los autores

ANEXO H. Mapas complementarios Para la división por subcuencas de la zona de estudio

Figura 13: Imagen tipo Raster de la zona de estudio (estas imágenes contiene información de profundidad y relieve)



Fuente: Modificado por los autores

Figura 14: Red de drenaje de la Mesa de los Santos



Fuente: Modificado por los autores

Figura 14: *Delimitación de las subcuencas*



Fuente: Modificado por los autores

ANEXO I. Descripción de las características geológicas de cada tipo de suelo según la clasificación del SCS

Tabla 9: *Clasificación de los suelos hidrogeológicos*

Suelo tipo A: Potencial de escurrimiento bajo. Suelos con altas capacidades de infiltración cuando están completamente húmedos, principalmente arenas y gravas muy bien ordenadas. Suelos con alta transmisión de agua.
Suelo tipo B: Suelos con capacidades de infiltración moderadas cuando están completamente húmedos, principalmente suelos medianamente profundos y drenados, con textura de sus agregados variando entre moderada y muy fina. Tiene velocidades medias de transmisión de agua.
Suelo tipo C: Suelos con capacidades de infiltración baja cuando están completamente húmedos, principalmente suelos que contiene una capa que impide el movimiento hacia abajo o suelos con textura fina o moderadamente fina. Estos suelos tienen baja transmisión de agua.
Suelos tipo D: Suelos con capacidades de infiltración muy bajas cuando están completamente húmedos. Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos. Suelos con transmisión del agua muy baja.

ANEXO J. Resumen del procedimiento para calcular el CN Ponderado de la Subcuenca 1, este procedimiento se repite para cada subcuenca

Tabla 10: CN ponderado

Área		24735075.33	[m ²]	24.74	[Km ²]					
Uso Hidrológico			Usos de suelo			CN				
[m ²]	[Km ²]	%	[m ²]	[Km ²]	% Por Uso HD	% General	CN	Producto		
A	3023687.89	3.02	12.22	Suelo 1	788915.27	0.79	26.09	3.19	72.00	229.64
				Suelo 2	193005.72	0.19	6.38	0.78	77.00	60.08
				Suelo 3	10596.07	0.01	0.35	0.04	45.00	1.93
				Suelo 4	1517612.16	1.52	50.19	6.14	72.00	441.75
				Suelo 5	513558.66	0.51	16.98	2.08	39.00	80.97
				Suelo 6	0.00	0.00	0.00	0.00	49.00	0.00
B	9801921.38	9.80	39.63	Suelo 1	2708237.11	2.71	27.63	10.95	82.00	897.82
				Suelo 2	375083.38	0.38	3.83	1.52	85.00	128.89
				Suelo 3	0.00	0.00	0.00	0.00	66.00	0.00
				Suelo 4	942089.18	0.94	9.61	3.81	81.00	308.51
				Suelo 5	5725822.40	5.73	58.42	23.15	61.00	1412.06
				Suelo 6	50689.31	0.05	0.52	0.20	69.00	14.14
C	11388352.87	11.39	46.04	Suelo 1	6352160.36	6.35	55.78	25.68	87.00	2234.23
				Suelo 2	799.19	0.00	0.01	0.00	90.00	0.29
				Suelo 3	26286.12	0.03	0.23	0.11	77.00	8.18
				Suelo 4	2851112.35	2.85	25.04	11.53	88.00	1014.34
				Suelo 5	2157994.85	2.16	18.95	8.72	74.00	645.61
				Suelo 6	0.00	0.00	0.00	0.00	79.00	0.00
D	521113.19	0.52	2.11	Suelo 1	57255.49	0.06	10.99	0.23	89.00	20.60
				Suelo 2	53220.78	0.05	10.21	0.22	92.00	19.80
				Suelo 3	0.00	0.00	0.00	0.00	83.00	0.00
				Suelo 4	69117.93	0.07	13.26	0.28	91.00	25.43
				Suelo 5	341518.99	0.34	65.54	1.38	80.00	110.46
				Suelo 6	0.00	0.00	0.00	0.00	84.00	0.00
Sumatoria								7654.73		
CN ponderado								76.55		

ANEXO K. Cuadro de características de las subcuencas utilizadas para obtener la escorrentía directa (Pe)

Tabla 10: *Parámetros para cálculo de la precipitación efectiva*

cuenca	CN	S max [mm]	P [mm/año]	Pe [mm/año]
1	76.55	77.82	1241	575.82
2	70.51	106.23	1240	453.01
3	76.63	77.47	1058	440.11
4	71.78	99.85	1136.5	402.73
5	70.93	104.12	1136.5	392.63
6	80.34	62.16	954	438.08
7	68.10	118.97	999.5	264.99
8	81.21	58.78	979	480.62
9	83.53	50.07	969	521.79
10	74.29	87.88	906	307.79
11	61.94	156.08	940	161.90
12	81.49	57.69	789	365.70

ANEXO L. Cultivos de la Mesa de los Santos y su coeficiente de cultivo Kc

Tabla 11: Área y Kc de los cultivos de la Mesa de los Santos

Cultivo	Área [Ha]	Kc medio
Tabaco	600	0.83
Tomate	70	1.50
Pimentón	70	0.75
Yuca	125	0.80
Maíz	70	1.12
Frijol	30	1.05
Piña	50	0.30
Patilla	40	1.00

Figura 15: Coeficiente de cultivo

Cultivo	$K_{c,ini}^1$	$K_{c,max}$	$K_{c,fin}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
a. Hortalizas Pequeñas	0,7	1,05	0,95	
Brécol (Brócoli)		1,05	0,95	0,3
Col de Bruselas		1,05	0,95	0,4
Repollo		1,05	0,95	0,4
Zanahoria		1,05	0,95	0,3
Coliflor		1,05	0,95	0,4
Apio (Céleri)		1,05	1,00	0,6
Ajo		1,00	0,70	0,3
Lechuga		1,00	0,95	0,3
Cebolla		1,05	0,75	0,4
– seca		1,00	1,00	0,3
– semilla		1,05	0,80	0,5
Espinaca		1,00	0,95	0,3
Rábano		0,90	0,85	0,3
b. Hortalizas- Familia de la Solanáceas	0,6	1,15	0,80	
Berenjena		1,05	0,90	0,8
Pimiento Dulce (campana)		1,05 ²	0,90	0,7
Tomate		1,15 ²	0,70–0,90	0,6
c. Hortalizas- Familia de las Cucurbitáceas	0,5	1,00	0,80	
Melón		0,85	0,60	0,3
Pepino		1,00 ²	0,75	0,3
– Cosechado Fresco		0,5	1,00	0,3
– Cosechado a Máquina			0,90	0,3
Calabaza de Invierno		1,00	0,80	0,4
Calabacín (zucchini)		0,95	0,75	0,3
Melón dulce		1,05	0,75	0,4
Sandía	0,4	1,00	0,75	0,4
d. Raíces y Tubérculos	0,5	1,10	0,95	
Remolacha, mesa		1,05	0,95	0,4

Cultivo	$K_{c_{in}}^1$	$K_{c_{med}}$	$K_{c_{fin}}$	Período máx. Cultivo (h) (m)
e. Leguminosas (Leguminosae)	0,4	1,15	0,55	
Frijoles o judías, verdes	0,5	1,05 ²	0,90	0,4
Frijoles o judías, secos y frescos	0,4	1,15 ²	0,35	0,4
Garbanzo (chick pea)		1,00	0,35	0,4
Habas – Fresco	0,5	1,15 ²	1,10	0,8
– Seco/Semilla	0,5	1,15 ²	0,30	0,8
Garbanzo hindú	0,4	1,15	0,35	0,8
Caupis (cowpeas)		1,05	0,60-0,35 ⁴	0,4
Maní		1,15	0,60	0,4
Lentejas		1,10	0,30	0,5
Guisantes o arveja – Frescos	0,5	1,15 ²	1,10	0,5
– Secos/Semilla		1,15	0,30	0,5
Soya		1,15	0,50	0,5-1,0
f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)	0,5	1,00	0,80	
Alcachofa	0,5	1,00	0,95	0,7
Espárragos	0,5	0,95 ⁷	0,30	0,2-0,8
Menta	0,60	1,15	1,10	0,6-0,8
Fresas	0,40	0,85	0,75	0,2
g. Cultivos Textiles	0,35			
Algodón		1,15-1,20	0,70-0,50	1,2-1,5
Lino		1,10	0,25	1,2
Sisal ⁸		0,4-0,7	0,4-0,7	1,5
h. Cultivos Oleaginosos	0,35	1,15	0,35	
Ricino		1,15	0,55	0,3
Canola (colza)		1,0-1,15 ⁹	0,35	0,6
Cártamo		1,0-1,15 ⁹	0,25	0,8
Sésamo (ajonjolí)		1,10	0,25	1,0
Girasol		1,0-1,15 ⁹	0,35	2,0
i. Cereales	0,3	1,15	0,4	
Cebada		1,15	0,25	1
Avena		1,15	0,25	1
Trigo de Primavera		1,15	0,25-0,4 ¹⁰	1
Trigo de Invierno – con suelos congelados	0,4	1,15	0,25-0,4 ¹⁰	1
– con suelos no-congelados	0,7	1,15	0,25-0,4 ¹⁰	
Maíz, (grano)		1,20	0,60,0,35 ¹¹	2
Maíz, (dulce)		1,15	1,05 ¹²	1,5
Mijo		1,00	0,30	1,5

Cultivo	$K_{c,ini}^1$	$K_{c,med}$	$K_{c,fin}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
j. Forrajes				
Alfalfa (heno)				
– efecto promedio de los cortes	0,40	0,95 ¹³	0,90	0,7
– periodos individuales de corte	0,40 ¹⁴	1,20 ¹⁴	1,15 ¹⁴	0,7
– para semilla	0,40	0,50	0,50	0,7
Bermuda (heno)				
– efecto promedio de los cortes	0,55	1,00 ¹³	0,85	0,35
– cultivo para semilla (primavera)	0,35	0,90	0,65	0,4
Trébol heno, Bersím				
– efecto promedio de los cortes	0,40	0,90 ¹³	0,85	0,6
– periodos individuales de corte	0,40 ¹⁴	1,15 ¹⁴	1,10 ¹⁴	0,6
Rye Grass (heno)	0,95	1,05	1,00	0,3
Pasto del Sudán (anual)				
– efecto promedio de los cortes	0,50	0,90 ¹⁴	0,85	1,2
– periodo individual de corte	0,50 ¹⁴	1,15 ¹⁴	1,10 ¹⁴	1,2
Pastos de Pastoreo				
– pastos de rotación	0,40	0,85-1,05	0,85	0,15-0,30
– pastoreo extensivo	0,30	0,75	0,75	0,10
Pastos (césped, turfgrass)				
– época fría ¹⁵	0,90	0,95	0,95	0,10
– época caliente ¹⁵	0,80	0,85	0,85	0,10
k. Caña de azúcar	0,40	1,25	0,75	3
l. Frutas Tropicales y Árboles				
Banana				
– 1 ^{er} año	0,50	1,10	1,00	3
– 2 ^{do} año	1,00	1,20	1,10	4
Cacao	1,00	1,05	1,05	3
Café				
– suelo sin cobertura	0,90	0,95	0,95	2-3
– con malezas	1,05	1,10	1,10	2-3
Palma Datilera	0,90	0,95	0,95	8
Palmas	0,95	1,00	1,00	8
Piña ¹⁶				
– suelo sin cobertura	0,50	0,30	0,30	0,6-1,2
– con cobertura de gramíneas	0,50	0,50	0,50	0,6-1,2
Árbol del Caucho	0,95	1,00	1,00	10
Té				
– no sombreado	0,95	1,00	1,00	1,5
– sombreado ¹⁷	1,10	1,15	1,15	2
m. Uvas y Moras				
Moras (arbusto)	0,30	1,05	0,50	1,5
Uvas				
– Mesa o secas (pasas)	0,30	0,85	0,45	2
– Vino	0,30	0,70	0,45	1,5-2
Lúpulo	0,3	1,05	0,85	5

e. Leguminosas (Leguminosae)	0,4	1,15	0,55	
Frijoles o judías, verdes	0,5	1,05 ²	0,90	0,4
Frijoles o judías, secos y frescos	0,4	1,15 ²	0,35	0,4
Garbanzo (chick pea)		1,00	0,35	0,4
Habas – Fresco	0,5	1,15 ²	1,10	0,8
– Seco/Semilla	0,5	1,15 ²	0,30	0,8
Garbanzo hindú	0,4	1,15	0,35	0,8
Caupís (cowpeas)		1,05	0,60-0,35 ⁴	0,4
Maní		1,15	0,60	0,4
Lentejas		1,10	0,30	0,5
Guisantes o arveja – Frescos	0,5	1,15 ²	1,10	0,5
– Secos/Semilla		1,15	0,30	0,5
Soya		1,15	0,50	0,5-1,0
f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)	0,5	1,00	0,80	
Alcachofa	0,5	1,00	0,95	0,7
Espárragos	0,5	0,95 ⁷	0,30	0,2-0,8
Menta	0,60	1,15	1,10	0,6-0,8
Fresas	0,40	0,85	0,75	0,2
g. Cultivos Textiles	0,35			
Algodón		1,15-1,20	0,70-0,50	1,2-1,5
Lino		1,10	0,25	1,2
Sisal ⁸		0,4-0,7	0,4-0,7	1,5
h. Cultivos Oleaginosos	0,35	1,15	0,35	
Ricino		1,15	0,55	0,3
Canola (colza)		1,0-1,15 ⁹	0,35	0,6
Cártamo		1,0-1,15 ⁹	0,25	0,8
Sésamo (ajonjolí)		1,10	0,25	1,0
Girasol		1,0-1,15 ⁹	0,35	2,0
i. Cereales	0,3	1,15	0,4	
Cebada		1,15	0,25	1
Avena		1,15	0,25	1
Trigo de Primavera		1,15	0,25-0,4 ¹⁰	1
Trigo de Invierno – con suelos congelados	0,4	1,15	0,25-0,4 ¹⁰	1
– con suelos no-congelados	0,7	1,15	0,25-0,4 ¹⁰	
Maíz, (grano)		1,20	0,60,0,35 ¹¹	2

Fuente: Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos, modificado por los autores

ANEXO M. Valor de precipitación Media multianual para cada estación

Tabla 12: *Precipitación media multianual*

Precipitación Media Multianual	
Estación	mm/año
El tope	1330.51
San Andrés	1448.36
Gja Piedecuesta	1640.74
El Pantano	1032.17
El palmar	1888.20
Zapatoca	1234.97
Palo Gordo	1081.55
La Mesa	863.61
Sta Isabel	1057.58
La fuente	1462.71
Cepita	978.83
Llano Grande	986.92

ANEXO N. Datos de evapotranspiración real calculada a partir de la ecuación de BUDIKO para cada estación

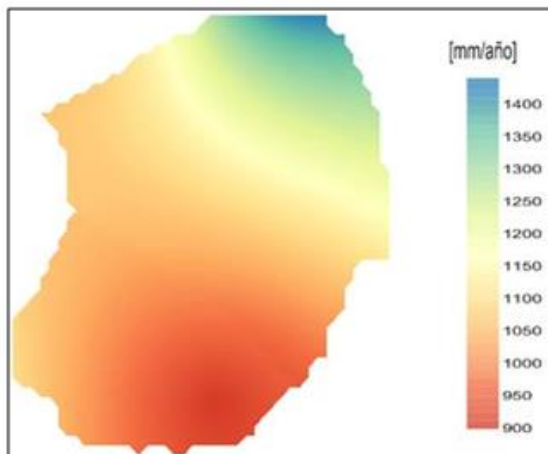
Tabla 13: *Evapotranspiración real mm/año*

	El Palmar	Zapatoca	Llano grande
Enero	51.323	26.248	38.347
Febrero	64.894	32.791	71.639
Marzo	100.509	60.422	78.460
Abril	110.624	66.538	64.961
Mayo	110.355	73.413	82.001
Junio	90.618	64.710	70.823
Julio	89.581	61.258	56.513
Agosto	103.639	65.967	66.627
Septiembre	102.499	71.899	70.609
Octubre	112.684	72.836	90.625
Noviembre	103.441	66.144	72.319
Diciembre	72.938	49.163	22.049
Total	1113.105	711.388	784.972

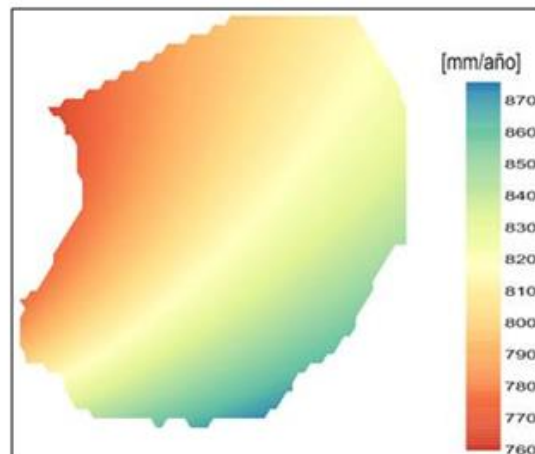
ANEXO O. Mapas de los parámetros del balance hídrico

Figura 16: La representación completa en mapas de cada componente del balance hídrico

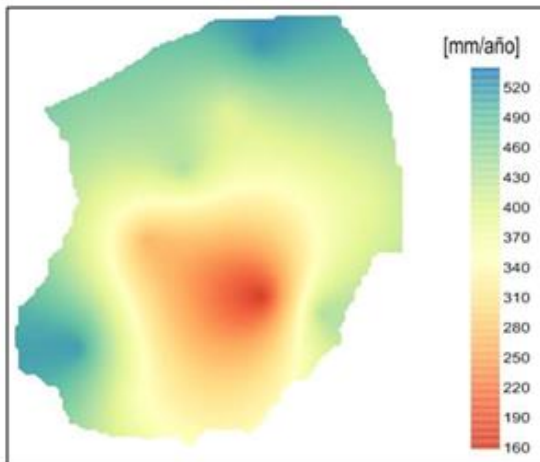
PRECIPITACIÓN



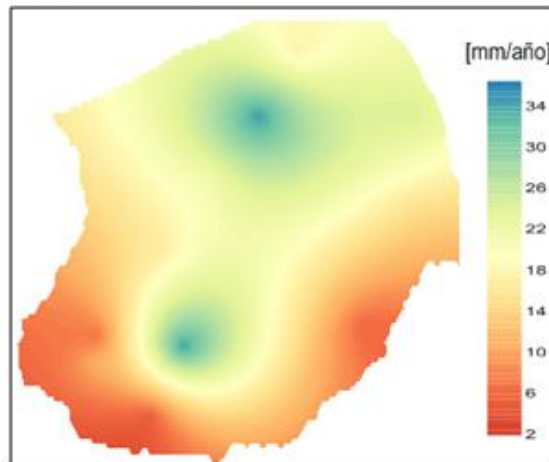
EVAPOTRANSPIRACIÓN



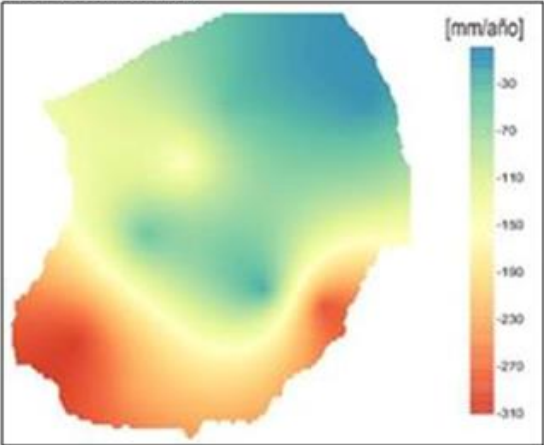
ESCORRENTÍA



EFEECTO ANTRÓPICO



INFILTRACIÓN



Fuente: Modificado por los autores

ANEXO P. Inventario completo de los puntos visitados en época de invierno

Figura 17: Inventario invierno, Abril 2015

CODIGO	UBICACIÓN DEL POZO		CARACTERÍSTICAS		ALTIMETRIA		CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS			
	ZONA/SUBZONA	COTA DEL SUELO		NATURALEZA DEL POZO	PROF. NIVEL DEL AGUA (m)	ALTURA (m.s.n.m)	NIVEL PIEZOMÉTRICO (m)	CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	TEMPERATUR A (°C)	PH
		N	E							
1	Mesitas de San Javier	1257066	111649	Aljibe	2.57	1602	1599.43	222	217	5.69
2	La Esperanza	1256022	1112168	Pozo perforado	7.54	1660	1652.46	320	25.1	5.3
3	El Duende	1253778	111825	Aljibe	2.27	1642	1639.73	400	22.5	5.61
4	El Enjorado	1252338	1113732	Pozo Perforado	16.2	1659	1642.8	290	24.5	7.27
5	Mesa de Jeridas	1252006	1113287	Pozo Perforado	0	1627	1712.06	131	26.2	6.5
6	Los Cacacs	1252060	1116593	Aljibe	13.94	1726	1676.2	247	21.6	5.96
7	Mesa de Jeridas	1255179	1116079	Aljibe	2.8	1679	1676.2	134	24.2	6.62
8	Gujabal	1255617	1116906	Pozo Perforado	SIN ACCESO	1687	SIN ACCESO	55	22.9	5.38
9	Acuarala	1251363	1110896	Pozo Perforado	*	1627	*	26	24.8	4.79
10	Rosa Blanca	1244388	1108731	Manantial	0	1630	1630	13	26.4	6.35
11	Rosa Blanca	1245378	1107942	Aljibe	3.75	1669	1665.25	**	**	**
12	El Guajabal	1253836	1115204	Aljibe	12.5	1712	1699.5	136	22.6	5.38
13	Mesitas de San Javier	1257470	1113727	Aljibe	13.46	1640	1626.54	80	22	5.94
14	Mesitas de San Javier	1251375	1111157	Manantial	0	1617	1617	41	22.7	6.04
15	Tabaca	1247106	1114518	Aljibe	2.15	1750	1747.85	45	25.6	5.57
16	El verde	1248272	1111196	Aljibe	12.2	1682	1669.8	30	24.8	6.53
17	Majal Alto	1248948	1110039	Aljibe	9.2	1682	1672.8	30	24.8	5.61
18	Villa Provincia	1247230	1103235	Pozo Perforado	18	1656	1638	**	**	**
19	La Fuentecita	1246010	1114107	Pozo Perforado	*	1650	*	60	23.9	6.3
20	Parador Holanda	1254780	1115066	Aljibe	2.9	1699	1696.1	110	23.1	6.27
21	Acuarala	1250374	1111572	Aljibe	1.71	1682	1680.29	60	22.2	5.97
22	Acuarala	1250218	1111732	Aljibe	6.8	1687	1680.2	50	23.4	6.46
23	Acuarala	1250088	1111847	Aljibe	8.6	1688	1679.4	20	22.5	5.49
24	El Duende	1252973	1110111	Aljibe	3.71	1617	1613.29	20	22.5	5.29
25	El Duende	1253745	1111252	Aljibe	4.8	1626	1621.2	120	24.2	6.52
26	Mesitas de San Javier	1257109	1111150	Pozo Perforado	18.75	1602	1593.25	60	23.5	4.97
27	Mesitas de San Javier	1257300	1111528	Aljibe	1.15	1613	1611.85	330	23.7	7
28	Mesa de Jeridas	1248725	1113215	Pozo Perforado	27.29	1717	1699.71	20	23.6	5.36

* La sonda descendió hasta encontrar un obstáculo, no se encontró nivel de agua

** Imposible obtener muestra

Fuente: Modificado por los autores

ANEXO Q. Inventario completo de los puntos visitados en época de verano

Figura 18: Inventario verano, Octubre de 2015

CODIGO	UBICACION DEL POZO		COTA DEL SUELO		CARACTERÍSTICAS NATURALIZA DEL POZO	ALTIMETRIA		CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS		PH
	ZONA	SUBZONA	N	E		PROF. NIVEL DEL AGUA (m)	ALTURA (m.s.n.m)	NIVEL PIEZOMÉTRICO (m)	CONDUCTIVIDAD (M S/cm)	
1	Mesitas de San Javier		1257066	1111649	Aljibe	3.75	1602	1598.25	128	7
2	La Esperanza		1255022	1112168	Pozo perforado	*	1660	*	246.6	7.18
3	El Duende		1253778	1111825	Aljibe	SECO	1642	SECO	SECO	SECO
4	El Enjovado		1252338	1113732	Pozo Perforado	17.53	1659	1641.47	69.8	7.63
5	Mesa de Jeridas		1252006	1113287	Pozo Perforado	*	1627	*	126.6	7.77
6	Los Caicos		1252060	1116559	Aljibe	SECO	1726	SECO	SECO	SECO
7	Mesa de Jeridas		1255179	1116079	Aljibe	3.15	1679	1675.85	109.3	7.41
8	Guyabal		1255617	1115896	Pozo Perforado	49.75	1687	1637.25	34.9	6.6
9	Acuarela		1251363	1110886	Pozo Perforado	*	1627	*	**	**
10	Rosa Blanca		1244388	1108731	Manantial	0	1630	1630	12.69	7.05
11	Rosa Blanca		1243378	1107942	Aljibe	3.54	1669	1665.46		
12	El Guayabal		1253836	1115204	Aljibe	13.38	1712	1698.62	50.6	6.88
13	Mesitas de San Javier		1257470	1113727	Aljibe	14.5	1640	1625.5	66.9	5.86
14	Mesitas de San Javier		1251375	1111157	Manantial	0	1617	1617		
15	Tabaca		1247106	1114518	Aljibe	5.15	1750	1744.85	22.3	6.29
16	El verde		1248272	1111196	Aljibe	13.4	1682	1668.6	19.26	6.64
17	Majaral Alto		1248948	1110039	Aljibe	13.17	1682	1668.83	8.69	6.67
18	Villa Provincia		1247230	1109235	Pozo Perforado	23.1	1656	1632.9	31	7.22
19	La Fuentecita		1246010	1111407	Pozo Perforado	*	1650	*	37.7	6.77
20	Parador Holanda		1254780	1115066	Aljibe	SECO	1699	SECO	SECO	SECO
21	Acuarela		1250374	1111572	Aljibe	6.8	1682	1675.2	**	**
22	Acuarela		1250218	1111732	Aljibe	7.05	1687	1679.95	**	**
23	Acuarela		1250088	1111847	Aljibe	22.5	1688	1665.5	7.36	6.57
24	El Duende		1252973	1110111	Aljibe	5.63	1617	1611.37	13.62	5.9
25	El Duende		1253745	1111252	Aljibe	7.25	1626	1618.75	60.4	7.15
26	Mesitas de San Javier		1257109	1111150	Pozo Perforado	23.43	1602	1578.57	212	7.98
27	Mesitas de San Javier		1257300	1111528	Aljibe	3.54	1613	1609.46	321	9.26
28	Mesa de Jeridas		1248725	1113215	Pozo Perforado	*	1717	*	7.7	6.38

* La sonda descendio hasta encontrar un obstaculo, no se encontro nivel de agua

** Imposible obtener muestra

Fuente: Modificado por los autores