

**RED DE MONITOREO PLUVIO – FREATIMÉTRICA EN EL ÁREA ESTABLECIDA
EN CAÑA DE AZUCAR DEL INGENIO RISARALDA**

ERIKA VIVIANA VELÁSQUEZ CASTAÑEDA
Profesional en Administración Empresas Agropecuarias



UNIVERSIDAD DE
MANIZALES

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

**RED DE MONITOREO PLUVIO – FREATIMÉTRICA EN EL ÁREA ESTABLECIDA
EN CAÑA DE AZUCAR DEL INGENIO RISARALDA**

ERIKA VIVIANA VELÁSQUEZ CASTAÑEDA
Profesional en Administración Empresas Agropecuarias

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información
Geográfica

Asesores

Ricardo Cruz Valderrama

Ing. Agrícola, Msc. Agricultural University The Netherlands
Centro De Investigación De La Caña De Azúcar De Colombia - Cenicaña

Fabio Andrés Herrera Rozo

Ing. Topográfica, Esp. Geomática
Universidad del Valle

Centro De Investigación De La Caña De Azúcar De Colombia - Cenicaña

UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES

2016

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Manizales, Febrero 2016.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a mis padres por guiar mi vida y corregir mis pasos cada día.

Al Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña) e Ingenio Risaralda S.A. por haber permitido el desarrollo de esta investigación.

A los investigadores de Cenicaña, Ing. Agrícola, MSc. José Ricardo Cruz (Investigador de Aguas) y al Ing. Topográfico, Esp. Fabio Andrés Herrera (Analista de Sistemas de Información Geográfica), por sus valiosos aportes técnicos, su gran colaboración, compromiso y orientación al logro.

A la Ingeniera Agrónoma Amanda Villegas G., Asesora del Departamento de Agronomía, una mujer inigualable y excepcional, que ha sido fundamental en mi crecimiento como profesional, por su valiosa colaboración y valoración de los resultados de esta investigación.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en por donde estén quiero darles las gracias formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
1. ÁREA PROBLEMÁTICA	12
1.2 Formulación del problema	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo General	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. JUSTIFICACIÓN	16
4. MARCO TEÓRICO	17
4.1 Hidrología	17
4.2 Agua superficial	18
4.3 Agua subterránea	19
4.4 Nivel freático	20
4.4.1 Profundidad óptima del nivel freático.....	21
4.4.2 Pozos de observación.....	22
4.4.3 Medición de la profundidad del nivel freático.....	23
4.4 Distribución de pozos de observación	23
4.5 Hidrograma de nivel freático.	23
4.6 Mapas de agua subterránea	24
4.7 Características generales.....	25

4.7.1 Geomorfología del Valle Geográfico del Río Cauca en los Departamentos de Valle del Cauca y Norte del Cauca.....	25
4.7.2 Paisaje de Piedemonte.....	27
4.7.3 Paisaje de Piedemonte sobre el flanco occidental de la cordillera Central.....	29
4.7.4 Paisaje de Piedemonte sobre el flanco oriental de la cordillera Occidental.	30
4.8 Paisaje de la planicie aluvial del río cauca.....	32
5. ANTECEDENTES	35
5.1 Producción relativa de caña de azúcar (porcentaje en tonelaje) para distintas profundidades del nivel freático (cm).....	36
6. METODOLOGÍA.....	38
6.1 Diseño de investigación	38
6.2 Alcance o delimitación de la investigación	38
6.2.1. Delimitación temática.....	38
6.2.2. Delimitación temporal	38
6.2.3. Delimitación espacial.....	38
6.3 Diseño estadístico	39
6.3.1 Definición de la población y muestra	39
6.3.2 Técnicas y procedimientos para la recolección de la información.	39
6.3.3 Desarrollo fases de la investigación.....	40
7. RESULTADOS	49
9. RECOMENDACIONES.....	58
BIBLIOGRAFIA	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sector azucarero colombiano.....	12
Figura 2. El Ciclo del Agua.....	17
Figura 3. Agua superficial.....	18
Figura 4. Acuíferos o aguas subterráneas.....	19
Figura 5. (Calicatas para evidenciar los NF a diferentes profundidades).....	20
Figura 6. Efectos de la humedad en el sistema radicular.....	21
Figura 7. Diagrama de un pozo para observación del nivel freático.....	22
Figura 8. Hidrograma de niveles freáticos en el valle geográfico del río Cauca, Colombia.....	24
Figura 9. Red Freatimétrica. Departamento de Risaralda.....	40
Figura 10. Pluviómetro, Predio Las Arditas Municipio de Obando.....	42
Figura 11. Red Pluviométrica Actual. Ingenio Risaralda.....	44
Figura 12. Registros de precipitación mensual y anual (2010-2014).....	46
Figura 13. Búsqueda de mejor modelo ajuste a semivariograma y distancia óptima entre pluviómetros.....	47
Figura 14 Polígonos de Thiessen (Voronoi)	50
Figura 15. Mapa de Distancias. (Suertes a pluviómetros).....	51
Figura 16. Microcuenca # 2.....	52
Figura 17. Microcuenca # 6.....	52
Figura 18. Microcuenca #17.....	53
Figura 19. Hidrogramas de Nivel Freático.....	53
Figura 20. Efecto Rezago 1 mes.....	54
Figura 21. Comportamiento Multianual Isobatas (2010 – 2014).....	55
Figura 22. Comportamiento Multianual Isohipsas (2010 – 2014).....	56

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Número de pozos de observación.....	23
Tabla 2. Número de pozos de observación.....	36
Tabla 3. Lecturas de nivel freático (2010 a 2014).....	43
Tabla 4. Lecturas de nivel freático (2010 a 2014).....	45
Tabla 5. Áreas por pluviómetro.....	49

GLOSARIO

ARCGIS: es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los sistemas de Información Geografía o SIG. Producido y comercializado por ESRI., bajo el nombre genérico ARCGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

GEOREFERENCIACIÓN: posicionamiento en el que se define la localización de un objeto espacial en un sistema de referencia y datum determinado. Este proceso es utilizado frecuentemente en los Sistemas de Información Geográfica.

INTERPOLACION: proceso de calcular valores numéricos desconocidos a partir de otros ya conocido aplicando algoritmos concretos.

ISOBATAS: línea curva que en los mapas hidrográficos, une los puntos de igual profundidad de las aguas lacustres y marinas.

ISOHIPSAS: línea que une puntos de igual altitud.

NIVEL FREÁTICO: lámina de agua libre que satura transitoria o permanentemente todos los poros.

RESUMEN

Con el fin de realizar un seguimiento multitemporal e identificar los predios con exceso o déficit de nivel freático en consecuencia que afectan la productividad en el cultivo de la caña de azúcar, el ingenio Risaralda desde el año 2010 adelanta un proceso de establecimiento de una red de monitoreo pluvio-freatimétrica basada en criterios técnicos, la cual, permite que la información obtenida sea utilizada para la toma de decisiones en la implementación de sistemas de drenaje, validación de grupos de humedad y parámetros del balance hídrico con el fin de mejorar las condiciones de productividad en las zonas limitadas. También, se han considerado diversos aspectos como la implementación de metodologías para el monitoreo, interpretación y análisis de la información y el uso de sistemas de información geográfica para tal fin.

Palabras clave: freaticimetría, drenaje, análisis geo estadístico, monitoreo.

ABSTRACT

In order to have a multi-temporary follow-up and to identify premises with an excess or deficit in groundwater level which affects productivity in the sugarcane cultures, the Risaralda sugar mill has been implementing a process for establishing a pluvio-freatimetric monitoring network since 2010. This network is based in technical ity criteria, which favor the use of the resulting information for the decision-making process when implementing drainage systems, validating humidity groups and water budget parameters with the aim to improve productivity conditions in limited zones. Similarly, diverse aspects have been considered, such as the implementation of methodologies for monitoring, interpreting and analyzing information as well as the use of geographical information systems.

Keywords: freaticimetry, drainage, geo-statistical analysis, monitoring

INTRODUCCIÓN

En la agricultura, el agua es un recurso primordial e indispensable en el desarrollo de los cultivos, el aprovechamiento de este elemento depende en gran medida del conocimiento de la cantidad y oportunidad para aplicarla. El manejo del riego es de alta importancia económica en el sector azucarero colombiano, tiene como finalidad suministrar una debida cantidad de agua al suelo, a una profundidad determinada para que pueda ser aprovechada por el sistema radical de la planta, lo anterior, es fundamental para establecer los niveles de profundidad en los que se encuentra el agua subterránea (Nivel freático).

Este trabajo de investigación está orientado a un estudio para la implementación de una red de monitoreo pluvio – freaticométrica, en el área establecida en caña de azúcar del Ingenio Risaralda; con la cual, se propone identificar los predios con exceso o deficit de nivel freático y en consecuencia que afectan la productividad del cultivo.

Este estudio propone la implementación de una red de monitoreo pluvio-freaticométrica en el área establecida con caña de azúcar del Ingenio Risaralda. Incluye las siguientes fases: En la primera fase se investiga el diseño metodológico a seguir, la segunda fase comprende la distribución de pozos de observación y pluviómetros. La tercera fase, conlleva al análisis espacial de información, la correlación de variables (aguas lluvias “precipitación” y aguas subterráneas nivel freático). En la cuarta fase, se obtienen los resultados de la información recolectada; la quinta fase corresponde a la elaboración del informe, revisión y ajustes y entrega del informe final.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

El sector azucarero colombiano se encuentra ubicado en el valle geográfico del río Cauca, comprende 47 municipios desde el norte del Departamento del Cauca, la franja central del Valle del Cauca, hasta el sur del Departamento de Risaralda y Caldas.



Figura 1. Sector azucarero colombiano y ubicación de los ingenios. Fuente: www.cenicaña.org

La caña para producción de azúcar (*Sacharum Spp*) es un cultivo permanente que abarca 223.905 hectáreas, distribuidas sobre el valle geográfico del río Cauca. Sus suelos presentan una topografía plana (1 – 5%) y en su mayoría estos suelos tienen una alta capacidad de retención de humedad. En la región se presentan precipitaciones promedio de 1.000 mm anuales; las lluvias son abundantes de abril a mayo y de octubre a noviembre, siendo necesario aplicar riego durante el resto del año; la mecanización es intensiva tanto para las labores de preparación y cultivo, como para el manejo y transporte de la caña cosechada. Sus condiciones incluyen un proceso de evacuación lenta del agua y de niveles freáticos altos que deben ser manejados mediante técnicas de drenaje (Cruz, J. R. 1995. p.211).

El Ingenio Risaralda, se localiza sobre la zona plana del valle geográfico del río Cauca y el río Risaralda, entre las coordenadas latitud 5°8'15.9"N longitud 75°50'41"W, y latitud 4°25'56.9"N longitud 76°6'47.5"W, que comprende los Departamentos de Caldas, Risaralda y Valle del Cauca.

El área de influencia del Ingenio en el departamento de Risaralda es considerada húmeda y semihúmeda, los suelos presentan condiciones fisicoquímicas limitadas para el buen desarrollo del cultivo por su predominancia de texturas arcillosas en un 79%, las cuales generan problemas de alta saturación, baja permeabilidad, altos contenidos de humedad, entre otras. En esta zona la precipitación representa una de las variables con mayor impacto en la productividad, y para este caso en particular su comportamiento varía según la condición o fenómeno climático que se presente. En años anteriores, el fenómeno climático del niño ha alcanzado precipitaciones en un mínimo de 1252 mm, respecto al fenómeno de la niña se ha registrado un máximo 3003 mm, en comparación con la media climatológica (1978 – 2014), de esta zona que corresponde a 1912 mm; esto genera una alta fluctuación de los niveles freáticos los cuales pueden observarse a menos de 80 cm de profundidad, afectando el desarrollo del cultivo y presentando pérdidas económicas por su implicación en las labores de adecuación, preparación, siembra (APS) y cosecha.

El ingenio cuenta actualmente, con una red de pozos de observación establecida en el área de influencia del Departamento de Risaralda en una extensión de 3.420 has. Esta red se creó con el fin de monitorear la profundidad del nivel freático e identificar los predios con una mayor afectación por esta causa. El proceso de creación de la red de pozos de observación para el Ingenio inicia en coordinación con Cenicaña en el año 2010, como consecuencia de las bajas productividades que se evidenciaron en la zona. De lo anterior, se desarrollaron acciones correctivas enfocadas a la profundización de canales principales y reestructuración en la infraestructura de drenajes.

El establecimiento de pozos de observación en varios puntos de las plantaciones, son fundamentales para conocer las oscilaciones del nivel freático durante el ciclo del cultivo y determinar las áreas de mayor afectación, con el propósito de establecer prácticas para su adecuado manejo.

Por consiguiente, es interesante ampliar el alcance de la red y los objetivos de la información recopilada a través de la misma.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo implementar una red de monitoreo pluvio-freatimétrica en el área establecida en caña de azúcar del Ingenio Risaralda?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Implementar una red de monitoreo pluvio- freatimétrica en el área establecida en caña de azúcar del Ingenio Risaralda.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar y evaluar la ubicación de los pozos existentes, con el fin de conocer su importancia y aporte de la información.
- Identificar los predios con exceso o déficit de nivel freático.
- Validar y correlacionar la información.
- Cuantificar las áreas con problemas de niveles freáticos superficiales.
- Conocer el comportamiento del flujo subterráneo mediante planos de isohipsas y curvas de fluctuación de niveles freáticos en el área de estudio.

3. JUSTIFICACIÓN

El área de influencia del ingenio Risaralda, se localiza sobre el valle geográfico del río Risaralda y río Cauca. Una red Pluvio-Freatimétrica, no solo permite determinar la variabilidad espacio temporal del agua lluvia precipitada en un área específica; también detalla el comportamiento de los flujos de agua subterránea, una importante variable climática que debe ser monitoreada y analizada con la finalidad de determinar zonas de recarga y descarga. Lo anterior, con una proyección de mejora en los drenajes subterráneos y superficiales del área de estudio.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Hidrología

La Hidrología se define como la ciencia que estudia la disponibilidad y la distribución del agua sobre la tierra. Estos recursos se distribuyen en la atmósfera, la superficie terrestre y las capas del suelo.



Figura 2. El Ciclo del Agua <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>.

El movimiento continuo de agua entre la Tierra y la atmósfera se conoce como ciclo hidrológico. Se produce vapor de agua por evaporación en la superficie terrestre y en las masas de agua, y por transpiración de los seres vivos. Este vapor circula por la atmósfera y precipita en forma de lluvia o nieve. Al llegar a la superficie terrestre, el agua sigue dos trayectorias. En cantidades determinadas por la intensidad de la lluvia, así como por la porosidad, permeabilidad, grosor y humedad previa del suelo, una parte del agua se vierte directamente en los riachuelos y arroyos, de donde pasa a los océanos y a las masas de agua continentales; el resto se filtra en el suelo. Una parte del agua puede evaporarse directamente o penetrar en las raíces de las plantas para ser transpirada por las hojas (Evapotranspiración). La porción de agua que supera

las fuerzas de cohesión y adhesión del suelo, se filtra hacia abajo y se acumula en la llamada zona de saturación para formar un depósito de agua subterránea, cuya superficie se conoce como nivel freático. En condiciones normales, el nivel freático crece de forma intermitente según se va saturando o recargando, y luego declina como consecuencia del drenaje continuo en desagües naturales o artificiales. (U.S. Geological Survey (USGS) 2004).

4.2 Agua superficial

Agua superficial. Es la proveniente de las precipitaciones, que no se infiltra ni regresa a la atmósfera por evaporación o la que proviene de manantiales o nacimientos que se originan de las aguas subterráneas. Existen dos tipos de aguas superficiales: aguas lóxicas o corrientes: Son las masas de agua que se mueven siempre en una misma dirección como ríos, manantiales, riachuelos, arroyos y aguas lénticas: se denominan aguas lénticas a la interiores quietas o estancadas tales como los lagos, lagunas, charcas, humedales y pantanos. (U.S. Geological Survey (USGS) 2004).



Figura 3. El agua superficial es aquella que se encuentra circulando o en reposo sobre la superficie de la tierra.

4.3 Agua subterránea

Las aguas subterráneas se forman a partir de la infiltración de las lluvias y por aportes de los cursos superficiales. Viajan en forma vertical por la fuerza de la gravedad, generalmente hasta encontrar un piso impermeable, y luego discurren horizontalmente hasta desaguar en los colectores mayores que la llevarán al mar para reiniciar su ciclo. En este tránsito se alojan en los espacios intersticiales de los sedimentos del subsuelo y forman los yacimientos de agua subterránea o acuíferos. (U.S. Geological Survey (USGS) 2004).

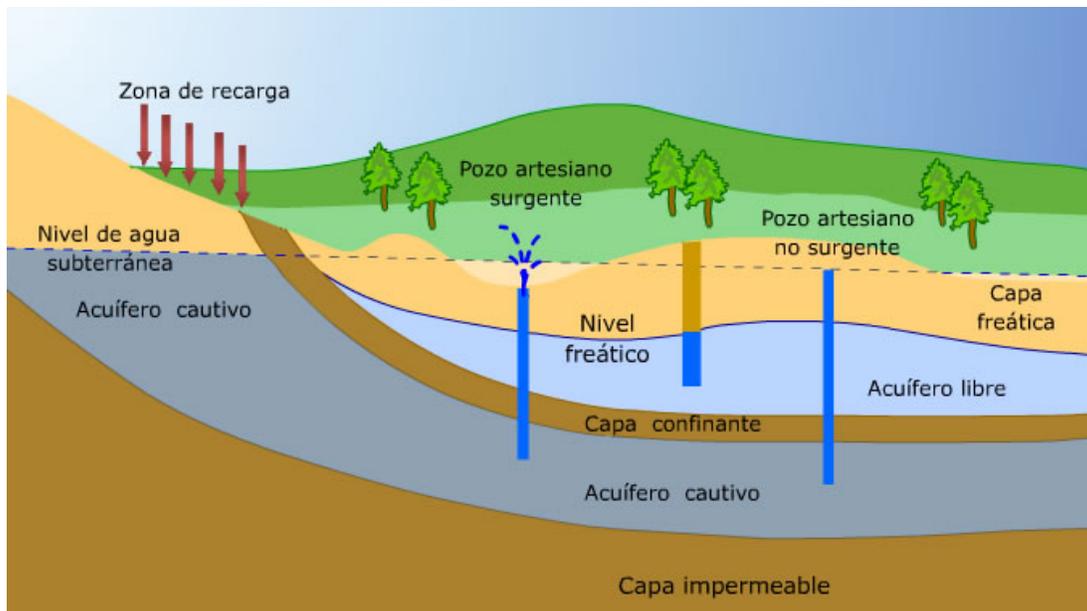


Figura 4. Acuíferos o aguas subterráneas

El agua subterránea representa una masa importante del agua total de los continentes del planeta Tierra. El agua subterránea se encuentra en acumulaciones que se forman bajo la tierra y reciben el nombre de acuíferos. Su existencia y comportamiento depende de factores como el clima, el relieve, la red de avenamiento, la naturaleza de los suelos, la estratigrafía, entre otras.

4.4 Nivel freático

El nivel superior de la zona freática a presión atmosférica se conoce como nivel freático. Este puede encontrarse a muy diferentes profundidades, dependiendo de las circunstancias geológicas y climáticas, desde sólo unos centímetros hasta decenas de metros por debajo de la superficie. En la mayoría de los casos la profundidad varía con las circunstancias meteorológicas de las que depende la recarga de los acuíferos. El nivel freático no es una superficie plana ni horizontal, trata de seguir la forma del relieve aunque en forma mucho menos pronunciada.



Figura 5. (Calicatas para evidenciar los NF a diferentes profundidades). Estudio de nivel freático Ingenio La Cabaña.

El nivel freático puede ser monitoreado mediante un pozo de observación poco profundo, el cual permite visualizar la lámina de agua a pocos centímetros de profundidad.

4.4.1 Profundidad óptima del nivel freático.

En la caña de azúcar los niveles freáticos superficiales y encharcamientos de la superficie del terreno, agudizan el riesgo de compactación del suelo, generando daños en el sistema radicular de las plántulas y en las cepas durante la cosecha y retraso o imposibilidad de realizar labores mecanizadas en la próxima soca, lo que incide en la disminución apreciable de la producción en la siguiente cosecha.



Figura 6. Efectos de la humedad en el sistema radicular. Estudio de nivel freático Ingenio La Cabaña.

Por otra parte, estudios realizados en Cenicaña, señalan que los rendimientos y sacarosa aumentaron a medida que disminuyó el nivel freático hasta 100 cm de profundidad. No obstante, que las variedades muestran rangos de tolerancia diferentes a las tablas de agua; en general se puede decir, que la profundidad mínima aceptable debe estar localizada a 60 cm. La profundidad ideal debe oscilar entre los 75 cm y los 150 cm. (Subiros, R.1995. p. 200).

4.4.2 Pozos de observación.

La medición de nivel freático mediante pozos de observación y su importancia en el sector agrícola, se realizan con el objetivo de conocer:

- Dirección del agua sub-superficial, para facilitar su optimización en la agricultura.
- Delimitar y clasificar las zonas de manejo especial, teniendo en cuenta los niveles de humedad en el suelo.
- Proponer nuevas alternativas de sistemas de drenaje y diseños de campo.

Un pozo de observación (Figura 6) puede ser un agujero de una profundidad de importancia agronómica entre 1.8 y 2.0 m. Para conocer la situación del nivel freático en una zona se requiere información de varios puntos, para lo cual se debe instalar una red de pozos de observación que cubra el área en estudio. (Cruz, J. R. 1995. p.216-217).

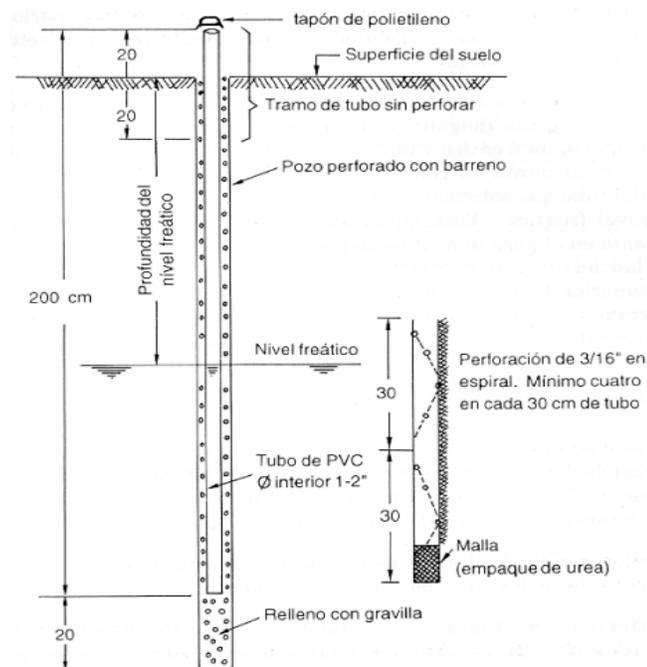


Figura 7. Diagrama de un pozo para observación del nivel freático. El cultivo de la caña “Drenajes”.

4.4.3 Medición de la profundidad del nivel freático.

El nivel freático (NF) lo constituye el nivel superior de las aguas subterráneas libres que tiene una presión igual a la presión atmosférica. Para un tratamiento adecuado de problemas de drenaje subterráneo es necesario conocer la profundidad del nivel freático en el espacio y en el tiempo. Este conocimiento se puede lograr mediante lecturas periódicas de los niveles de agua en pozos de observación o baterías piezométricas.

4.4 Distribución de pozos de observación

La distribución se puede hacer en forma sistemática en cuadrícula o rectángulo, o por concentración de puntos de acuerdo con las áreas críticas, colocándolos en sitios de fácil acceso y evitando que queden cercanos a canales, drenes, ríos, pozos de bombeo y caminos o vías de tránsito, para prevenir su destrucción u obturación.

El número de pozos de observación depende de los fines y de la precisión deseada. (Cruz, J. R. 1995. p.217-218).

Tabla 1.
Número de pozos de observación

Area (ha)	No. de pozos de observación
100	20
1,000	40
10,000	100

Nota: La periodicidad de las lecturas debe estar entre 15 a 30 días dependiendo de las recargas. También se recomienda efectuar lecturas de los niveles después de un riego.

4.5 Hidrograma de nivel freático.

Es un gráfico en el que se relaciona la profundidad del NF, el cual permite identificar las tasas de ascenso y descenso y los periodos críticos respecto a la variación en el tiempo, en

comparación con otros factores que influyen en el balance hidrológico como precipitación. (Cruz, J. R. 1995. p.218-220).

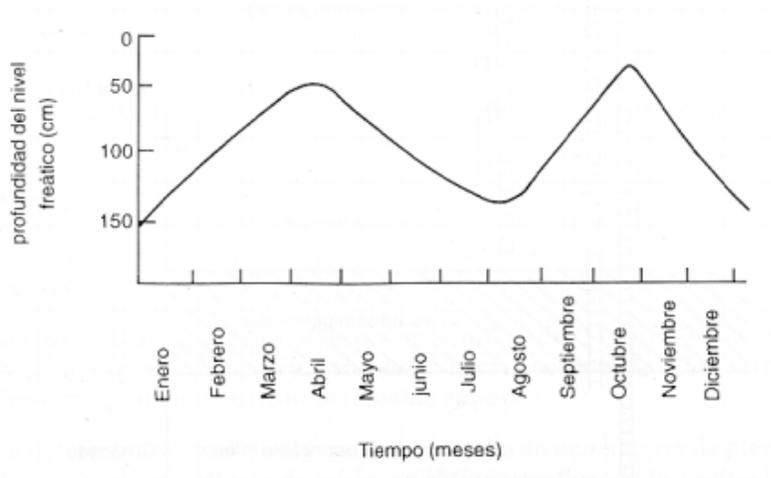


Figura 8. Hidrograma de niveles freáticos en el valle geográfico del río Cauca, Colombia. Cenicaña.

4.6 Mapas de agua subterránea

Isohipsas. Son líneas que unen puntos de igual cota de nivel freático. Los mapas de isohipsas o curvas de igual cota del nivel freático permiten conocer la dirección del flujo freático, su gradiente hidráulico, las zonas de recarga y de descarga del área. Las cotas del nivel freático se calculan para cada sitio restando de la cota de la superficie del terreno la profundidad del nivel freático respectivo. Se puede trabajar con el promedio de isohipsas para un periodo largo, siendo suficientes dos planos en el periodo lluvioso y uno en el periodo seco. (Cruz, J. R. 1995. p.220).

Isobatas. Son líneas que unen puntos de igual profundidad en el nivel freático. Los mapas de isobatas o curvas de igual profundidad del nivel freático son de gran importancia porque permiten delimitar las áreas que requieren drenaje, es decir aquellas zonas que permanecen afectadas por niveles freáticos superficiales durante periodos prolongados, también facilitan identificar las zonas con limitación por déficit de la humedad en el suelo. En caña de azúcar se

recomienda levantar las curvas isobatas a cada 25 cm hasta 2 metros de profundidad. (Cruz, J. R. 1995. p.221).

4.7 Características generales

4.7.1 Geomorfología del Valle Geográfico del Río Cauca en los Departamentos de Valle del Cauca y Norte del Cauca

La geomorfología tiene por objeto el reconocimiento y la evolución de las geoformas sobre la superficie de la Tierra, las cuales deben considerarse como el producto de los procesos endógenos y exógenos que han venido actuando a lo largo del tiempo geológico hasta la actualidad. Por lo tanto, los paisajes, los tipos de relieve y las formas del terreno, son el resultado de la integración entre los materiales (rocas y depósitos no consolidados) y los procesos (endógenos y exógenos) en función del tiempo.

Desde el punto de vista de los levantamientos edafológicos, la geomorfología cumple un papel muy importante en la delineación de las principales unidades geomorfológicas y su caracterización se hace con base en la descripción de los paisajes, tipos de relieve, formas del terreno, pendientes, materiales parentales y el clima. El valle geográfico del río Cauca y su prolongación hacia el valle del río Risaralda, está conformado sobre una estructura de tipo graben y está limitado en sus dos flancos por fallas regionales que cruzan por los piedemontes de las cordilleras Central al oriente y la Occidental al oeste. Este valle geográfico tiene una configuración amplia hacia el sur y se va estrechando gradualmente por efectos tectónicos hacia el norte. Los sedimentos que rellenaron el graben del valle geográfico del río Cauca fueron depositados inicialmente en un ambiente marino, posteriormente en un ambiente lacustre y finalmente en ambiente continental; los cuales vienen finalmente a determinar la configuración geomorfológica actual del Valle, después de fuertes perturbaciones tectónicas y sucesivos cambios climáticos. (Villota, 2005, p 184).

Durante el Terciario debido a la acción de la dinámica de los procesos tectónicos, erosión, transporte y sedimentación, se inició el modelado de lo que actualmente se llama, valle

geográfico del río Cauca, el cual se proyecta hacia el norte hasta confundirse con el valle del Risaralda. Durante el Cuaternario, se continuaron presentando eventos y procesos de erosión, transporte y acumulación de depósitos cuaternarios de diversos orígenes como el fluvial, fluvio-lacustre y coluvial, que poco a poco fueron colmatando el valle, tanto lateralmente como en forma longitudinal. La mayoría de los depósitos están representados por abanicos, terrazas y depósitos fluvio-lacustres; en algunos casos se encuentran suelos residuales, depósitos coluvio-aluviales y las acumulaciones de materiales producto de los procesos de remoción en masa que cubren las áreas de fuerte pendiente. Los depósitos aluviales están asociados a los principales ríos y quebradas que cruzan por los flancos de las dos cordilleras, Central y Occidental. Los mayores depósitos corresponden a los abanicos aluviales localizados sobre los piedemontes de los flancos occidental de la cordillera Central (entre Buga y Florida) y el flanco oriental de la cordillera Occidental en el sector sur de la ciudad de Cali. Debido a las características del relieve casi plano, en el valle geográfico del río Cauca las pendientes son suaves y la mayoría se encuentra hasta un 3% hacia los ápices y de 0 -1% sobre la planicie aluvial; en consecuencia, es difícil separar o diferenciar las formas del terreno que se encuentran inmersas en la zona plana de dicho valle geográfico; la dificultad se acentúa por la acción antrópica ejercida sobre la parte plana de este valle, donde la construcción de las obras de adecuación de las tierras, la nivelación de terrenos y la construcción y adecuación de las obras civiles han modificado la evolución de los procesos morfodinámicos y disturbado las formas del terreno que en su estado natural, eran fáciles de diferenciar, tales como los albardones o diques, napas y cubetas de acumulación y los basines de la planicie aluvial; también son difíciles de separar o identificar, los cuerpos y partes distales de los abanicos del piedemonte, porque en cualquier momento se confunden con la planicie aluvial del río Cauca. (Villota, 2005, p 184).

La descripción de las diferentes geoformas encontradas en el área de estudio, Valle geográfico del río Cauca y Valle del Risaralda, está acorde con la leyenda geomorfológica elaborada y estructurada con base en las observaciones obtenidas durante la ejecución de los trabajos de campo por parte de los edafólogos y reconocedores, y complementada con la metodología jerarquizada de acuerdo con las anteriores consideraciones se tomaron dos criterios importantes:

- La jerarquización de las formas del terreno, según su posición sobre los flancos de las cordilleras Central y Occidental, hasta la planicie aluvial del río Cauca. La mayoría de los abanicos identificados en esta zona, presentan un ápice, un cuerpo y una parte distal o pie, bien definidos. Sobre las áreas de los abanicos que conforman el piedemonte, se encuentran también formas de origen completamente fluvial, como cubetas, napas, albardones, meandros y cauces abandonados, pertenecientes a los sistemas de drenaje antiguos que circulan cerca de la planicie aluvial del río Cauca.
- El análisis de los tipos de relieve encontrados a lo largo del valle geográfico del río Cauca. Dentro del valle principal se encuentran los siguientes tipos de relieve y formas de terreno: terrazas aluviales asociadas al río Cauca y sus afluentes, diques o albardones, explayamientos, napas, cubetas vallecitos, cauces abandonados, especialmente en el área de influencia de la Llanura aluvial de desborde de los ríos tributarios del río Cauca. (Villota, 2005, p 184).

4.7.2 Paisaje de Piedemonte

Este paisaje se considera como una franja, zona o área localizada en el pie de las montañas o cordilleras, donde se produce un cambio abrupto de la pendiente entre la zona montañosa o estructural, y la zona plana o de acumulación, ocupada por la planicie aluvial del piedemonte. Este paisaje involucra algunas geoformas que han sido previamente disectadas como los abanicos antiguos, las lomas, colinas y algunas estructuras recientes, como las fallas activas las cuales se ubican entre las zonas de la cordillera y serranías; otras zonas emergen como bloques levantados y las depresiones laterales internas menos levantadas y separadas tectónicamente por fallas inversas. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 110).

En la parte occidental de la cordillera Central se presentan numerosos abanicos aluviales y depósitos fluvio-coluviales formados por descargas de flujos de escombros que se originaron durante el Cenozoico y están conformados principalmente por cantos de rocas básicas y en menor proporción por esquistos y rocas félsicas, provenientes de las principales formaciones o

grupos de rocas que afloran en este sector de la cordillera Central. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 110).

En la parte oriental de la cordillera Occidental son frecuentes los depósitos de abanicos aluviales y depósitos fluvio-coluviales de menor tamaño. Se destacan los depósitos pertenecientes a los abanicos de Pance y Jamundí, de origen fluviotorrencial y presentan evidencias de deformación tectónica reciente. Los depósitos de los abanicos más antiguos, generalmente presentan una posición más alta y/o presentan un mayor grado de erosión y disección. Los materiales están compuestos por cantos de rocas muy meteorizadas y dependiendo del grado de meteorización, así mismo es el desarrollo del drenaje. Aunque las correlaciones entre los depósitos cuaternarios no siempre son fáciles de establecer, algunos de ellos fueron formados simultáneamente, pero pueden tener características geomorfológicas muy diferentes, dependiendo de la naturaleza de la corriente que los originó (longitud, caudal, geología y topografía del área de origen) y de las modificaciones a las que son sometidos, según la zona donde se encuentran emplazados. Con anterioridad al último evento que rellenó la depresión del valle del río Cauca, numerosos abanicos asociados a los ríos procedentes de la cordillera Central, depositaron grandes cantidades de sedimentos que en forma progresiva fueron colmatando la depresión. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 111).

La actividad tectónica y reciente ocurrida sobre el frente montañoso, ocasionaron el corte de varios de estos abanicos los cuales al ser deformados presentan escarpes, que aún se pueden distinguir en el campo; en otros casos la topografía, ha sido transformada o modificada a geoformas de retroceso, con redondeamientos y declinaciones, algunos con aspecto de lomos. La primera generación de abanicos con posterioridad al primer episodio de fallamiento, fueron erosionados; y los ríos que los formaron, más tarde los entallaron y dentro de sus nuevos cauces, se emplazaron otros depósitos más jóvenes, que posteriormente fueron afectados por episodios de reactivación neotectónica. Los escarpes desarrollados por efecto de la acción del primer evento de entallamiento, coincide con los escarpes de los primeros depósitos que fueron deformados por efecto de la tectónica reciente. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 112).

Hacia la parte media de los flancos de las dos cordilleras, las evidencias neotectónicas se manifiestan de una manera diferente, debido a la ausencia de depósitos cuaternarios, allí los lineamientos son más pronunciados y los escarpes muestran mayor desgaste con evidencias notorias de retroceso muy marcados; en otros sitios la erosión geológica ha borrado los vestigios morfológicos de la ruptura reciente del terreno por efectos neotectónicos. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 112).

4.7.3 Paisaje de Piedemonte sobre el flanco occidental de la cordillera Central.

Sobre esta franja del piedemonte de la cordillera Central se han desarrollado una serie de abanicos como producto de las frecuentes y sucesivas descargas y acumulaciones de sedimentos transportados por los principales ríos como el Bolo que nace sobre la cordillera Central, y fluyen sobre el piedemonte y hacia la parte baja y plana del valle del río Cauca.

Sobre este paisaje de piedemonte asociado al flanco occidental de la cordillera Central, se han desarrollado varios sistemas de abanicos de origen fluvial y fluvio-coluvial de diferentes tamaños, sobre los cuales se distinguen tres partes: el ápice, el cuerpo y el pie o zona distal. Los abanicos se han desarrollado bajo la misma dinámica fluvio-torrencial de los grandes ríos que vienen de la cordillera Central y drenan hacia el valle. Sus descargas se han producido en forma simultánea o en diferentes épocas, debido a su relación de coalescencia entre los diferentes depósitos y su posición sobre la amplia llanura aluvial de piedemonte donde se observan evidencias de grandes descargas con desbordes de los ríos afluentes que nacen sobre el flanco occidental de la cordillera Central y confluyen hacia el río Cauca. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 112).

Entre los ríos más importantes que drenan sobre el flanco occidental de la Cordillera Central, en el área de influencia del proyecto se destacan los siguientes: Bugalagrande, Tulúa, Guadalajara, Sonso, Guabas, Zabaletas, Amaime, Desbaratado, Frayle, Guengue y Palo, entre otros. La dinámica fluviotorrencial de estos ríos tienen estrecha relación con la formación de los

abanicos del piedemonte; estos abanicos a su vez también han sido influenciados por la neotectónica y los frecuentes cambios del nivel de base del río, debido en parte a la fuerte dinámica de divagación del río Cauca a lo largo y ancho de su planicie aluvial. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 112).

Sobre el paisaje del piedemonte de la cordillera Central, también son frecuentes algunos niveles de terrazas, desarrollados sobre las márgenes de los lechos activos de los ríos, sobre todo los que se encuentran hacia la margen derecha del río Cauca, en las localidades de Tulúa, Andalucía y Zarzal; como también a lo largo de las márgenes de los ríos La Paila y Bugalagrande. Asociados a cada una de las llanuras aluviales de desborde de los ríos del piedemonte, se encuentran formas del terreno ocupando distintas posiciones dentro de la planicie, tales como: los albardones, explayamientos, napas, cubetas, cauces abandonados y vallecitos estrechos producto de la fuerte disección de las corrientes que forman escarpes. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 113).

4.7.4 Paisaje de Piedemonte sobre el flanco oriental de la cordillera Occidental.

Comparado con el paisaje descrito anteriormente sobre la Cordillera Central, el paisaje de piedemonte sobre la cordillera Occidental, presenta ciertas particularidades muy notables como su asimetría con respecto al río Cauca y su menor extensión, debido a que el río Cauca ha sido desplazado tectónicamente hacia el occidente, en parte debido al efecto de una mayor sedimentación sobre el costado oriental y como producto de movimientos neotectónicos que han incidido en los procesos de transporte y acumulación de los ríos que drenan desde la cordillera Occidental hacia el río Cauca. Los tipos de relieve y formas del terreno que se encuentran sobre el flanco este de la cordillera Occidental, son bastante diferentes debido a las variaciones en el relieve y a los cambios en la litología, donde predominan las rocas volcánicas muy fracturadas y alteradas. Solamente se encuentran algunas geoformas similares a los encontrados sobre el flanco occidental de la cordillera Central, como los abanicos aluviales, estos tienen menores dimensiones y están restringidos a los sistemas de drenajes mayores. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 114).

Abanicos. Corresponden a un tipo de relieve asociado al paisaje de piedemonte, estas geoformas presentan forma plana a ligeramente inclinada, y son producto de la descarga y acumulación de grandes volúmenes de materiales, transportados por los ríos que vienen desde la montaña y fluyen hacia las partes bajas, bajo la influencia de la fuerza de la gravedad. El perfil longitudinal de los abanicos es rectilíneo a ligeramente cóncavo y la pendiente oscila entre 1 y 5%. Los abanicos, presentan escarpes hacia los bordes activos de los ríos que vienen desde la montaña y se prolongan hacia la parte plana de los valles. Por esta razón, se pueden catalogar como abanicos con diferentes grados de disección. Entre los abanicos de mayores dimensiones localizados sobre la parte norte, en el flanco oriental de la cordillera Occidental, se encuentran los abanicos de los ríos: Ríofrío, Piedras, Mediacanoa, Yumbo, Cali, Meléndez, Pance, Jamundí, Claro, Guachinte, Robles y Timba, entre otros. Los demás depósitos de abanicos y coluviones que se encuentran entre Cali y Yotoco, son de menor tamaño y asociados a ríos y quebradas de menor dinámica por su menor tamaño. La composición litológica y granulométrica de los diferentes abanicos, tanto al norte como al sur de la ciudad de Cali, están compuestos por acumulaciones de materiales heterométricos y polimícticos, en su mayor parte compuestos por bloques, cantos y gravas embebidos en materiales finos no consolidados derivados de basaltos almohadillados y diabasas. Hacia el extremo sur del área, entre las localidades de Timba y Santander de Quilichao, se encuentran abanicos aluviales y fluvio-volcánicos ocupando las áreas del piedemonte en el sector comprendido entre las cordilleras Occidental y Central. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 115).

Terrazas. Se describe con este nombre a las geoformas desarrolladas por la acción de la dinámica fluvial de los ríos que drenan desde la cordillera Central hacia el valle geográfico que aún pertenecen al área del piedemonte de la cordillera Central. Los abanicos-terrazza han sido disectados por los ríos dentro del proceso de evolución. Generalmente presentan una superficie plana y un borde con un escarpe de altura variable dando la apariencia de un nivel de terraza. En algunos casos los ríos secundarios y afluentes del río Cauca presentan niveles de terrazas. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 115).

4.8 Paisaje de la planicie aluvial del río Cauca

Este paisaje se caracteriza por su relieve plano donde predomina la dinámica de sedimentación causada por desbordamientos del río Cauca, durante época de intensas lluvias. El proceso de acumulación de las diferentes formas del terreno se originó en el siguiente orden: albardones, napas de desborde, napas de explayamiento, cubetas de desborde y cubetas de decantación. En las partes cercanas al cauce principal, se encuentran meandros abandonados, complejos de orillares y cauces abandonados. Esta secuencia es debido a la fuerte dinámica del río Cauca que ha cambiado muchas veces su cauce, tal como lo evidencian las geoformas antes mencionadas, descritas a continuación.

Albardones. Los diques naturales generalmente se encuentran asociados sobre ambas márgenes de los ríos. La forma es alargada y estrecha, por lo general de 100 a 200 metros de ancho, según la dinámica y la energía del eje de alimentación. La topografía es convexa y se caracteriza por la presencia de altos contenidos de material clástico compuesto por arenas y limos gruesos.

Napas de desborde. Son formas del terreno que se caracterizan por ocupar un área extensa y presentan suelos bien drenados; con algunas excepciones están integrados con regímenes ácuicos. Las texturas dominantes varían desde franca o franco limoso hasta franco arcillo limosa.

Napas de explayamiento. Corresponden a formas del terreno producto de la depositación de sedimentos en diferentes eventos de la dinámica de las corrientes secundarias sobre el flanco occidental de la cordillera Central; la descarga de sedimentos se hace en forma amplia y las texturas dominantes varían desde franco arenosa a franco arcillo arenosa.

Explayamientos. Son eventos frecuentes y están asociados a la dinámica fluvial de las corrientes sobre los piedemontes. Una de las características principales de los explayamientos, es que los materiales son depositados por exceso de carga y están determinados por una divergencia del escurrimiento en diferentes canales o surcos. Los explayamientos son generalmente el

producto de la intensidad de las lluvias en tiempos cortos y repetidos con cierta frecuencia y periodicidad a través de la historia del río. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 117).

Cubetas de desborde. Corresponden a depresiones o zonas de amortiguación de las corrientes. La característica principal es su composición granulométrica, que oscila entre 40-50% de limo y 40-50% de arcilla; las texturas por lo general varían de arcillosas y arcillo limosa. Sus formas son generalmente redondeadas y en forma abierta, sin estancamientos prolongadas del agua.

Cubetas de decantación. Corresponden a formas del terreno, que varían de circular a alargada y está caracterizada por sus contenidos altos de arcilla (60%). Los Suelos en su mayor parte son pobremente drenados. Las condiciones ácuicas se presentan desde la superficie del suelo hasta una profundidad de 1.20 mts.

Meandros abandonados. Estos se han formado por estrangulamiento o ruptura del meandro. Cuando conservan agua en su interior, forman lagunas semilunares o madre viejas, y cuando están parcialmente colmatadas forman pantanos o humedales.

Planicie fluvio-lacustre. Se define como tal un área ocupada por una depresión comprendida entre la zona de transición entre el piedemonte y la llanura aluvial del río Cauca; los límites son transicionales y muy difusos. Esta zona está caracterizada por ser un área mal drenada donde se depositan sedimentos clásticos finos en condiciones de aguas tranquilas sobre el área de influencia de los lechos y cauces de los ríos provenientes de la cordillera Central y los desbordamientos frecuentes y periódicos del río Cauca. Las áreas más representativas de la planicie fluvio-lacustre se localizan al suroeste y noreste de Buga, entre Bugalagrande y Zarzal y al occidente de Obando, donde aún se encuentran pequeñas lagunas y zonas pantanosas. Los suelos evolucionados en este paisaje son de texturas muy finas, mal drenados, de colores grises a gris azulado. En la actualidad, se encuentran artificialmente drenados. Esta práctica de drenaje artificial, sumado al régimen de humedad ústico, ha propiciado la alternancia de periodos húmedos y periodos secos (a través del tiempo), produciendo de esta manera la contracción y

expansión de arcillas y autoinversión de materiales edáficos; procesos específicos en la formación de vertisoles. (Villota, 2005, p 184).

Planicie Aluvial de ríos afluentes al río Cauca. Relacionadas estrechamente con el paisaje principal de la planicie aluvial del río Cauca, se encuentran otras series de llanuras aluviales de desborde que están asociadas a los diferentes ríos afluentes del Cauca. Se encuentran formas del terreno caracterizados por la presencia de albardones, explayamientos de ruptura, napas de explayamientos, napas de desborde, cubetas de desborde, cauces abandonados y vallecitos.

De acuerdo con la dinámica de las corrientes, la erosión, transporte y la acumulación de sedimentos y su distribución granulométrica, se presenta en el siguiente orden: inicialmente aparecen los sedimentos clásticos gruesos a medios, luego los finos, y por último los sedimentos muy finos. Esta secuencia se presenta, tanto en sentido sur-norte como norte-sur y está asociada a los diferentes ríos afluentes del Cauca que atraviesan las dos cordilleras, en la Occidental de occidente a oriente, y en la cordillera Central va de oriente a occidente. Algunos de estos ríos presentan una fuerte dinámica de tipo fluvio-torrencial. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 118).

Vallecitos. Esta unidad está asociada a los vallecitos estrechos pertenecientes a drenajes secundarios y cuyos depósitos están compuestos por depósitos de materiales clásticos heterométricos y polimícticos no consolidados provenientes de las rocas expuestas sobre los flancos de las cordilleras Occidental y Central. (Carbonell, J, et al. 2011, p. 119).

5. ANTECEDENTES

La incidencia de los fenómenos climáticos externos en el valle del Rio Cauca, durante los últimos 5 años, han generado grandes impactos ambientales especialmente en el suelo, donde se observa a un mayor nivel de detalle y en menor tiempo, limitaciones en los primeros 60 cm de profundidad, como consecuencia de exceso de la humedad. La excesiva precipitación asociada al fenómeno de la niña que inició en el año 2010 y se prolongó hasta mayo de 2011, afectó de manera especial al sector Azucarero colombiano, provocando desbordamientos desde quebradas de régimen intermitente, hasta ríos de gran magnitud como el Cauca y el Magdalena. En el Valle del Cauca, la elevación de niveles del río Cauca por encima de la cota del dique, provocó la inundación de zonas cultivadas y cultivables, ocupando aproximadamente 40.000 hectáreas, dispuestas en ambos márgenes del río. Se observa una afectación de gran magnitud específicamente en el Norte del Valle y Sur de Risaralda, donde se cuantificó un aproximado de 8.000 hectáreas, entre zonas inundadas, saturadas y con altos niveles freáticos. Este estado de humedad altera las condiciones medias, fisicoquímicas y microbiológicas del suelo. (Corporación Colombiana de Investigación agropecuaria-CORPOICA. 20011).

En el año 2012, se observó una variación constante en los niveles de precipitación, con una disminución en las lluvias a partir de Junio hasta Noviembre del mismo año, generando condiciones y comportamientos específicos de un año NIÑO; caracterizado fundamentalmente por el descenso en la precipitación, menor número de días con lluvia, aumento en la evapotranspiración, radiación solar y temperatura media. Los cambios climáticos constantes en la zona, inciden de forma directa con los niveles de las aguas subterráneas y en consecuencia con el desarrollo y productividad del cultivo.

La presencia de Nivel Freático (NF) puede ser registrada mediante la implementación de redes de monitoreo, interpretación y análisis de la información; a poca profundidad puede constituir un serio problema para la producción agrícola, pero en ciertos casos la puede favorecer. Como sobre el NF se forma una franja capilar cuyo espesor lo determina la porosidad

drenable del suelo, esta franja puede contribuir con el desarrollo del cultivo cuando el mismo puede extraer agua de ella (Borin, 1990; Ayars et al., 1999 y Madramootoo et al., 2001), lo cual, es posible si una parte considerable del sistema radical del cultivo se encuentra por encima de dicha franja. De lo contrario, el efecto puede ser perjudicial al limitar su respiración, ya que el espesor de suelo localizado dentro de la franja capilar se encuentra en una condición de casi saturación.

5.1 Producción relativa de caña de azúcar (porcentaje en tonelaje) para distintas profundidades del nivel freático (cm).

La mayoría de pastos, incluyendo a la caña de azúcar, desarrollan un sistema radicular superficial, lo cual hace tolerantes a niveles freáticos elevados, teniendo una zona de ramificación densa aproximadamente a 70 cm. Sin embargo, a manera de orientación se recomiendan las siguientes profundidades freáticas: suelos textura fina entre 60 y 80 cm y suelos arenosos entre 40 y 60 cm.

Tabla 2.

Número de pozos de observación

Caña de azúcar (Sacharum spp)					
Profundidades del nivel freático (cm)	40	60	90	120	150
Rendimiento en porcentaje	58%	77%	89%	95%	100%

Nota: profundidades optimas de nivel freático.

Desde un punto de vista técnico, la profundidad óptima de la capa freática es la que no ocasiona disminución en la producción de los cultivos. En muchos de los casos esta profundidad es antieconómica para la instalación de un sistema de drenaje y se prefiere que los rendimientos de los cultivos no alcancen el máximo a cambio de lograr un menor costo de las obras de

drenaje. En este sentido, la profundidad óptima es la que origina una mayor relación beneficio costo (Ritzema HP, Kselik R y Chanduvi F. 1996).

Durante el periodo de germinación en siembras, o en zocas, con niveles de agua subterránea superiores a los 25 cm, puede inhibirse la germinación, el enraizamiento y reducir la población de los tallos, en comparación con un nivel más bajo. Esta situación se hace más evidente en suelos de texturas arcillosa en los que predominan los microporos. Cuando el nivel freático se reduce a 50 cm, ocurre una buena germinación gracias a la oxigenación; pero si el nivel del agua subterránea vuelve a subir de nuevo a 25 cm, el crecimiento avanza, pero el peso de los tallos, la altura, así como los rendimientos finales de la caña y la sacarosa, disminuyen (Subiros, R. 1995).

El exceso de humedad produce una reducción en el contenido de oxígeno en el suelo que disminuye la tasa de respiración de las raíces de la planta, la mineralización del nitrógeno, la absorción de agua y nutrientes y propicia la formación de sustancias tóxicas. Si la planta de caña crece en estas condiciones durante un tiempo prolongado, especialmente durante el periodo de rápido crecimiento, se produce un retardo en su desarrollo vegetativo y por ende, una disminución en la producción (Cruz, J. R. 1995. p.211). Experimentos realizados en CENICAÑA muestran que la producción se puede reducir hasta en 35 t/ha cuando el nivel freático se mantiene a una profundidad menor de 70 cm. (CENICAÑA 1991).

El establecimiento de pozos de observación en varios puntos de las plantaciones, son fundamentales para conocer las oscilaciones del nivel freático durante el ciclo del cultivo y realizar un seguimiento detallado en las áreas con mal drenaje. Estos estudios son útiles para determinar y establecer prácticas de manejo tendientes a reducir el nivel freático.

6. METODOLOGÍA

Esta investigación se realizó en la empresa Ingenio Risaralda. Por lo tanto, en este punto se citarán algunos criterios técnicos y metodologías necesarias para la implementación de una red de monitoreo pluvio-freatimetría en el área establecida en caña de azúcar del Ingenio.

6.1 Diseño de investigación

Para el desarrollo de este punto, el tipo de investigación elegida es la Descriptiva, puesto que con la realización de esta investigación se identificó los criterios técnicos y metodológicos requeridos para proponer la implementación de una red de monitoreo pluvio-freatimétrica en el área establecida con caña de azúcar, que permite identificar los predios con exceso o déficit de nivel freático en consecuencia que afectan la productividad en el cultivo.

6.2 Alcance o delimitación de la investigación

6.2.1. Delimitación temática

Con la presente investigación se buscó proponer la implementación de una red de monitoreo pluvio-freatimétrica en el área establecida con caña de azúcar del ingenio Risaralda.

6.2.2. Delimitación temporal

El Diseño de esta investigación se realizó en un período de aproximadamente un año entre los períodos comprendidos del 2014 y 2015.

6.2.3. Delimitación espacial

El presente proyecto de investigación se desarrolló en la empresa Ingenio Risaralda S.A. en el municipio de Balboa – Risaralda.

6.3 Diseño estadístico

El diseño estadístico de la investigación es no experimental, ya que a través de éste se determina el enfoque de la investigación, se interpretan los datos y se identifica la población objetivo.

6.3.1 Definición de la población y muestra

La población objetivo de este estudio es el área de influencia del Ingenio, se priorizó el sector que comprende el área establecida en el departamento de Risaralda, dadas las limitaciones que se presentan a consecuencia de los factores climáticos y las condiciones físicas del suelo.

6.3.2 Técnicas y procedimientos para la recolección de la información.

Este estudio propone la implementación de una red de monitoreo pluvio-freatimétrica en el área establecida con caña de azúcar del Ingenio Risaralda. Incluye las siguientes fases:

En la primera fase se investiga el diseño metodológico a seguir.

La segunda fase comprende la distribución de pozos de observación y pluviómetros.

La tercera fase, conlleva al análisis espacial de información, la correlación de variables (aguas lluvias “precipitación” y aguas subterráneas nivel freático).

En la cuarta fase, se obtienen los resultados de la información recolectada.

La quinta fase corresponde a la elaboración del informe, revisión y ajustes y entrega del informe final.

6.3.3 Desarrollo fases de la investigación.

En la primera fase: se identificó el diseño metodológico a seguir.

La segunda fase: comprende la distribución de pozos de observación y pluviómetros

1. Descripción de la elaboración de pozos de observación. 50 pozos de observación fueron instalados a una profundidad de 2m y un diámetro de 2’’; la excavación se realizó con un barreno de metal tipo holandés, seguidamente fueron georreferenciados mediante tecnologías de posicionamiento satelital (GNSS); esta información fue llevada al software para sistemas de información geográfica ArcGIS 9.2 y Quantum GIS 2.2, donde fueron calculadas las respectivas coordenadas UTM , fue asignado un código único de identificación y una serie de atributos (fecha, código, hacienda, suerte, nombre pozo (NF), latitud, longitud, cota terreno, número de Pluviómetro, lectura de referencia, boca tubo (cm), lectura mojada (cm), nivel freático (cm), isohipsa.

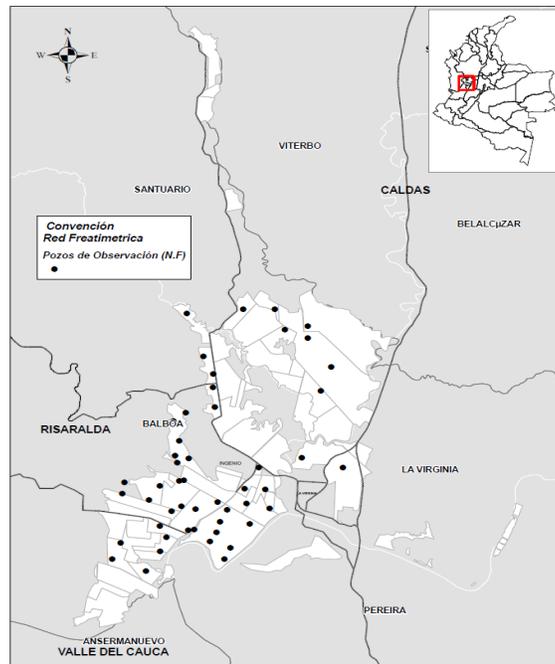


Figura 9. Red Freatimétrica. Departamento de Risaralda. Área de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A.

2. Medición de los pozos de observación. En todos los casos, la profundidad del nivel freático se toma con referencia a la superficie del suelo y no al borde superior del pozo de observación, el cual generalmente sobresale 20 centímetros por encima de la misma. Tomando en consideración que la densa ramificación de la zona radicular de la caña de azúcar se extiende hasta una profundidad aproximada de 70 cm.

Para conocer el nivel de agua subterránea en los pozos, es necesario introducir un sensor o varilla delgada de 2 metros de longitud, con el fin de medir el límite húmedo y determinar la profundidad del nivel freático. Las mediciones se realizan a intervalos de 15 días para épocas lluviosas y 30 días para las épocas secas.

3. Descripción de pluviómetros. La precipitación es uno de los factores principales del ciclo hidrológico y su conocimiento es indispensable para identificar la variación de los niveles freáticos. Debido a que la precipitación con frecuencia se comporta con una gran variabilidad en espacio y tiempo, es fundamental determinar e identificar la cantidad y su distribución a lo largo del año en una zona. Se conoce que los pluviómetros son instrumentos que miden la cantidad de agua precipitada en un determinado lugar. La unidad de medida se expresa en milímetros de altura.

Existen dos métodos para medir la lluvia recogida en el pluviómetro:

- a. Con una probeta
- b. Con una reglilla

La probeta, es un cilindro de vidrio o plástico transparente sobre el cual está indicado el tamaño del pluviómetro con que debe ser empleada. Las graduaciones, finalmente grabadas, están separadas cada 0.2 milímetros de lluvia.

La reglilla, es de madera y sus graduaciones corresponden a milímetros y décimos de precipitación.

Las observaciones de precipitación se realizan diariamente a las 7 de la mañana. La cantidad de lluvia caída en un día (total diario) se cuenta desde las 7 de la mañana de ese día hasta las 7 de la mañana del día siguiente (07 - 07). Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM (2011).



Figura 10. Pluviómetro, Predio Las Arditas Municipio de Obando. Departamento de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A.

4. Validación de los pluviómetros. Con el propósito de validar la información y localización de cada pluviómetro, se procede a georeferenciar nuevamente toda la red, debido que algunos de los pluviómetros habían sido reubicados y estos no contaban con sus respectivas coordenadas, lo cual es fundamental para realzar el análisis preliminar de distribución espacial de pluviómetros.

Tabla 3.
Lecturas de nivel freático (2010 a 2014).

Zona Geografica	Nom_Pluv	Numero	Detalle	Lat	long	Altitud (msnm)
Cartago	Cabuyas	42	Pluviometro	4.74001	-75.98480	927.0
Cartago	El Porvenir	48	Pluviometro	4.69481	-76.01654	911.2
Cartago	La Argentina	47	Estacion	4.70368	-76.00998	925.1
Cartago	Veraguas	51	Pluviometro	4.63971	-75.96825	922.5
Cartago	Guacas	63	Pluviometro	4.68792	-75.94516	931.2
Cartago	La Adriana	70	Pluviometro	4.60949	-75.95689	948.5
Cartago	La Sonora	71	Pluviometro	4.69323	-75.95591	920.6
Distrito Rut	Buenos Aires	45	Pluviometro	4.61729	-76.04405	924.2
Distrito Rut	Guajira	55	Pluviometro	4.60014	-76.04043	927.3
Distrito Rut	La Pepa	60	Pluviometro	4.60634	-76.02643	931.2
Distrito Rut	Miramar	54	Pluviometro	4.61653	-76.03788	920.8
Distrito Rut	Santa Monica	59	Pluviometro	4.59911	-76.05665	936.2
Distrito Rut	Guadalcanal	68	Pluviometro	4.64902	-76.05142	918.0
Distrito Rut	Las Arditas	67	Pluviometro	4.53798	-75.99567	948.2
Distrito Rut	La Ondina	69	Pluviometro	4.44026	-76.13948	955.4
Distrito Rut	Rut	61	Estacion	4.56506	-76.01825	912.0
Distrito Rut	La Alejandra	62	Pluviometro	4.55717	-76.06333	906.0
La Virginia	Bohios	20	Pluviometro	4.87796	-75.90312	917.7
La Virginia	Calabazas	26	Pluviometro	4.81199	-75.93216	912.2
La Virginia	Canada	27	Pluviometro	4.80319	-75.94872	920.6
La Virginia	Galias Orobi	25	Pluviometro	4.84622	-75.93556	919.4
La Virginia	Praga	30	Pluviometro	4.85901	-75.92481	928.8
La Virginia	San Francisco	1	Estacion	4.90866	-75.89731	930.9
La Virginia	San Gil	16	Pluviometro	4.87919	-75.91682	917.5
La Virginia	Soria	34	Pluviometro	4.91140	-75.87189	938.8
La Virginia	Suiza II	17	Pluviometro	4.92785	-75.86876	961.2
La Virginia	Villa Liza	32	Pluviometro	4.82636	-75.92237	924.9
La Virginia	Villa Stella	13	Pluviometro	4.94178	-75.89692	947.7
La Virginia	San Camilo I	14	Pluviometro	4.87107	-75.92065	927.6
La Virginia	Cuba	19	Pluviometro	4.90058	-75.92843	963.0
Viterbo	Amazonas	4	Pluviometro	4.97003	-75.86060	897.8
Viterbo	El Danubio II	3	Pluviometro	4.99178	-75.87417	933.3
Viterbo	La Bella	9	Pluviometro	5.06770	-75.85959	993.4
Viterbo	La Cruz	8	Pluviometro	5.00906	-75.85800	944.9
Viterbo	Playa	38	Pluviometro	5.09843	-75.84194	1001.6
Viterbo	Sajonia	7	Pluviometro	5.03263	-75.87661	972.5
Viterbo	Remolinos	66	Pluviometro	5.11194	-75.83436	1018.6
Viterbo	Teheran	50	Estacion	5.03146	-75.85461	947.0

Fuente: Departamento de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A.

5. Ubicación actual de pluviómetros y estaciones meteorológicas automatizadas. Se cuenta con una red de 34 pluviómetros y 4 estaciones meteorológicas automatizadas “RMA” (Viterbo, Virginia, Cartago y Rut) tal como se muestra en la Figura 9.

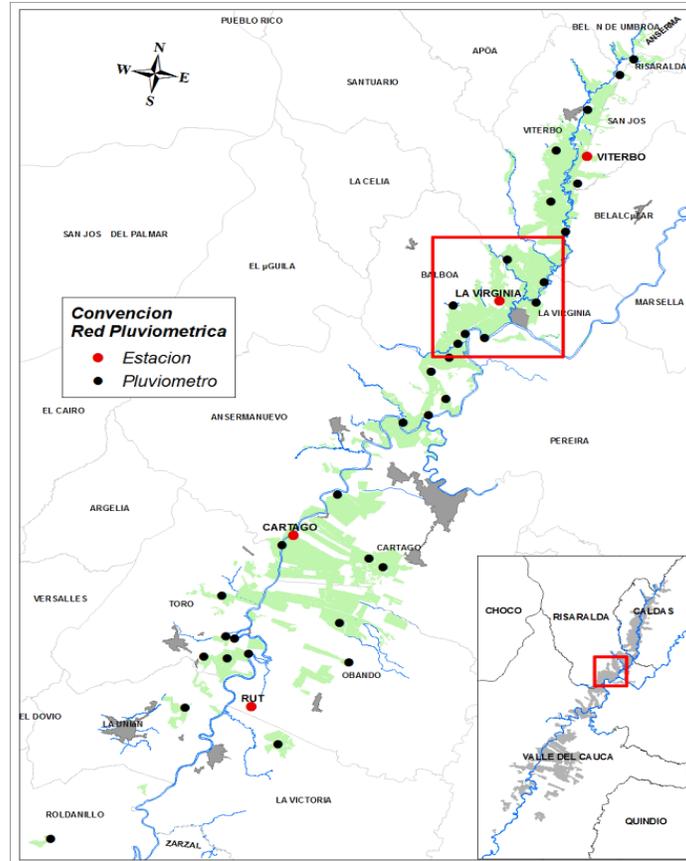


Figura 11. Red Pluviométrica Actual. Departamento de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A.

La tercera fase. Conlleva al registro y análisis espacial de información, la correlación de variables (aguas subterráneas “nivel freático” y aguas lluvias “precipitación”).

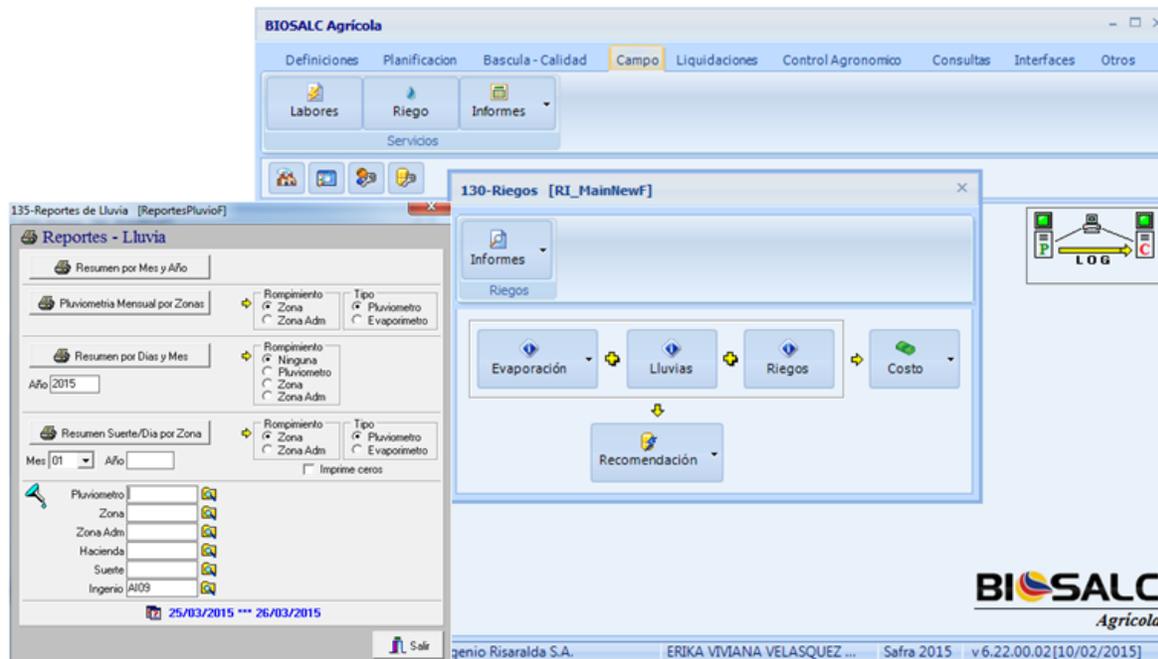
1. Registros de nivel freático mensual y anual (2010-2014). Las lecturas de nivel freático fueron registradas desde enero de 2010 hasta diciembre de 2014 y se verifican las lecturas correspondientes de cada pozo.

Tabla 4.
Lecturas de nivel freático (2010 a 2014)

Pozo	Cota	2010		2011		2012		2013		2014	
		Isohipsa	Isobata								
CAN26	941.01	940.13	87.71	940.16	84.58	939.99	101.78	939.62	138.63	939.82	118.80
CND19	914.09	913.27	82.43	913.43	65.75	913.52	57.38	913.28	81.40	913.21	88.44
CND25	922.02	921.13	89.57	921.31	71.24	920.89	113.54	920.97	105.45		
CON2	926.83	926.26	57.06	926.09	73.60	926.03	79.80	926.09	74.00	925.62	121.00
CUB31	926.00	924.85	115.18	924.76	123.58	924.35	165.50	924.60	140.10		
DAN16	953.51	953.25	25.83	952.93	57.50	952.22	128.64	952.80	71.00	952.01	149.43
DAN9	932.12	931.24	88.00	930.88	123.58	930.80	132.17				
DEL10	914.09	913.13	96.38	913.72	37.60	912.81	128.50	912.84	124.90	912.90	118.88
DEL2	917.70	917.17	52.44	917.44	25.93	917.31	39.00	916.85	84.64		
DEL4	928.51	927.82	68.87	928.19	32.53	927.67	84.46	927.36	114.71	927.57	94.00
GAR9	947.26	946.94	31.80	946.91	34.47	946.67	58.40	946.68	58.00	946.20	106.17
LAC1	951.58	950.87	71.00	950.54	104.37	950.08	149.80	949.78	180.00	949.78	180.00
LAC13	933.80	933.47	32.91	933.45	35.16	932.90	90.13	932.59	121.20	932.75	105.00
LBP11	979.94	979.32	62.14	979.03	91.60	978.69	125.00	978.73	120.75	978.15	179.50
LLE4	949.42	949.07	35.00	948.89	53.42	948.42	99.67	949.31	11.00	948.48	94.17
LOM76	931.88	931.54	34.00	931.34	53.23	930.68	119.60	930.98	90.00	930.79	108.83
LSU15	930.43	930.09	34.25	929.86	57.81	929.95	48.67			929.34	109.00
OLI4	965.28	965.01	27.25	964.78	49.88	964.63	65.20	964.35	93.43	964.35	92.86
PER32	906.16	904.94	122.14	905.20	96.44	904.53	163.50	904.82	134.00	904.83	133.00
PIN17	916.50	915.91	58.37	916.10	40.00	915.22	128.00	915.11	138.67	915.56	94.00

Nota: Registro de nivel freático (2010-2014). Departamento de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A. **1.**

2. Registros de precipitación mensual y anual (2010-2014). La red actual registra valores de precipitación en el área de influencia de forma permanente. Estos registros son llevados al sistema agrícola (SIAGRI), el cual, permite compilar información histórica de cada pluviómetro.



Resumen de Lluvia
01/01/2010 - 31/12/2014

Página: 1
Fecha: 25/03/2015
Hora: 13:56

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL	PROM
2010	5.8	27.7	40.3	155.8	153.2	124	184.2	65.4	162.2	151.5	251.1	126.5	1447.7	121
2011	94.1	133.4	103.5	229.6	110	123.3	134.7	45.1	108.9	217.7	172.2	98.4	1570.9	131
2012	86.6	34.9	106.1	253.4	53.7	64.7	78.7	56	10.9	91.4	98.4	57.5	992.3	83
2013	5.1	91.5	103.1	116.6	197.3	70.6	57.2	100.5	104.6	92.5	130.1	91.3	1160.4	97
2014	64.9	86.7	83.1	120.3	218.2	123.4	2.5	40.7	79.6	148.6	68.3	79.1	1115.4	93
PROM:	51.3	74.8	87.2	175.1	146.5	101.2	91.5	61.5	93.2	140.3	144	90.6	1257.3	105
MAXIMO:	94.1	133.4	106.1	253.4	218.2	124	184.2	100.5	162.2	217.7	251.1	126.5	1570.9	131
MINIMO:	5.1	27.7	40.3	116.6	53.7	64.7	2.5	40.7	10.9	91.4	68.3	57.5	992.3	83

Figura 12. Registros de precipitación mensual y anual (2010-2014)
Software SIAGRI. Departamento de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A

3. Análisis de diseño para localización espacial de Pluviómetros. El diseño de la red consiste en la determinación del número y ubicación de estaciones de medición sobre una región, con la finalidad de obtener un registro histórico de datos que puedan caracterizar el fenómeno de precipitación en el espacio y en el tiempo. La red de observación debe lograr la integración de la eficiencia en la recolección de los datos y la efectividad de la información. A partir de una red mínima de observación, en la cual se llega a tener una “estimación regional”, es preciso obtener un Diseño Óptimo, cuyo objetivo principal será apoyar la planificación, desarrollo y evaluación de proyectos que permitan un mejor manejo del recurso agua en el lugar de estudio. (División de Recursos Hídricos del U.S. Geological Survey, citado por Rojas 1994).

4. Análisis geostatístico multi-temporal. Para evaluar la eficiencia de cobertura y distancias óptimas entre pluviómetros, según el área de interés en función de la variabilidad de la precipitación con datos registrados por los pluviómetros mes a mes desde el año 2010, se usaron librerías espaciales del software y un algoritmo iterativo construido por el área de Geomática de Cenicaña. El cual permite evaluar diferentes distancias; y mediante múltiples cálculos de ajuste a mejores modelos de semivariogramas, se busca determinar los parámetros óptimos, necesarios para ser usados en la interpolación geostatística mediante el método de Kriging; Los resultados pueden apreciarse en la figura 14, los cuales fueron analizados en doce escenarios de distancias diferentes, encontrándose un modelo de ajuste y un nivel de confianza del 95%. (Oliver, M, 1990, 325).

El anterior análisis permitió identificar los sitios potenciales para densificar la red pluviométrica.

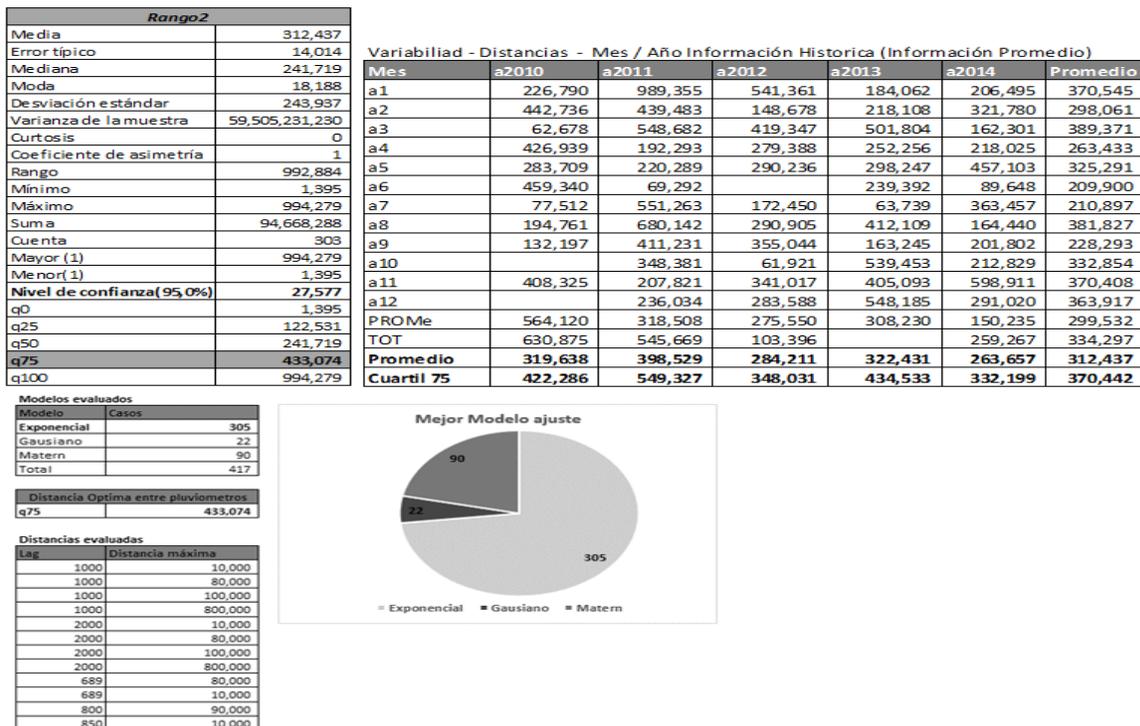


Figura 13. Búsqueda de mejor modelo ajuste a semivariograma y distancia óptima entre pluviómetros. Departamento de Geomática, Cenicaña Colombia.

5. Identificación de Microcuencas. La delimitación de microcuencas en el área de influencia establecida con caña de azúcar en el Departamento de Risaralda, se elaboró inicialmente con base en el estudio de drenajes regional de la zona centro (Cruz V. J. R, 2009). Posteriormente, se realizó una validación de acuerdo con el documento soporte de la sectorización hidrográfica para el Departamento de Risaralda, suministrada por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER, 2015).

6. Trazado de los polígonos de Thiessen o Voronoi. Son métodos de interpolación simple, basado en la distancia euclidiana, que permiten delimitar las subregiones correspondientes a cada pluviómetro: Se crean al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmento de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM, 2004).

En la cuarta fase, se obtienen los resultados del estudio.

7. RESULTADOS

Resultados de los estudios realizados.

1. Mapa de los polígonos de Thiessen. Con base en la información de los 38 pluviómetros existentes, mediante el software ArcGis se realizó una interpolación a través de la herramienta “Polígonos de Thiessen, posteriormente se determinaron las sub-regiones y áreas de cobertura correspondientes a cada pluviómetro.

Tabla 5
Áreas por pluviómetro.

Pluviómetros	Veraguas	Cabuyas	La Sonora	Canada	El Porvenir	La Argentina	El Danubio II	Guadacanal
Area (Has)	1479.26	1021.32	884.19	837.58	812.77	689.15	647.28	606.62
%	9.32%	6.44%	5.57%	5.28%	5.12%	4.34%	4.08%	3.82%
Pluviómetros	Villa Stella	Sajonia	Guacas	San Francisco	Amazonas	Suiza II	La Bella	
Area (Has)	595.26	588.32	569.93	551.78	487.91	480.16	423.40	
%	3.75%	3.71%	3.59%	3.48%	3.08%	3.03%	2.67%	

Nota: Pluviómetros de mayor influencia según cobertura.

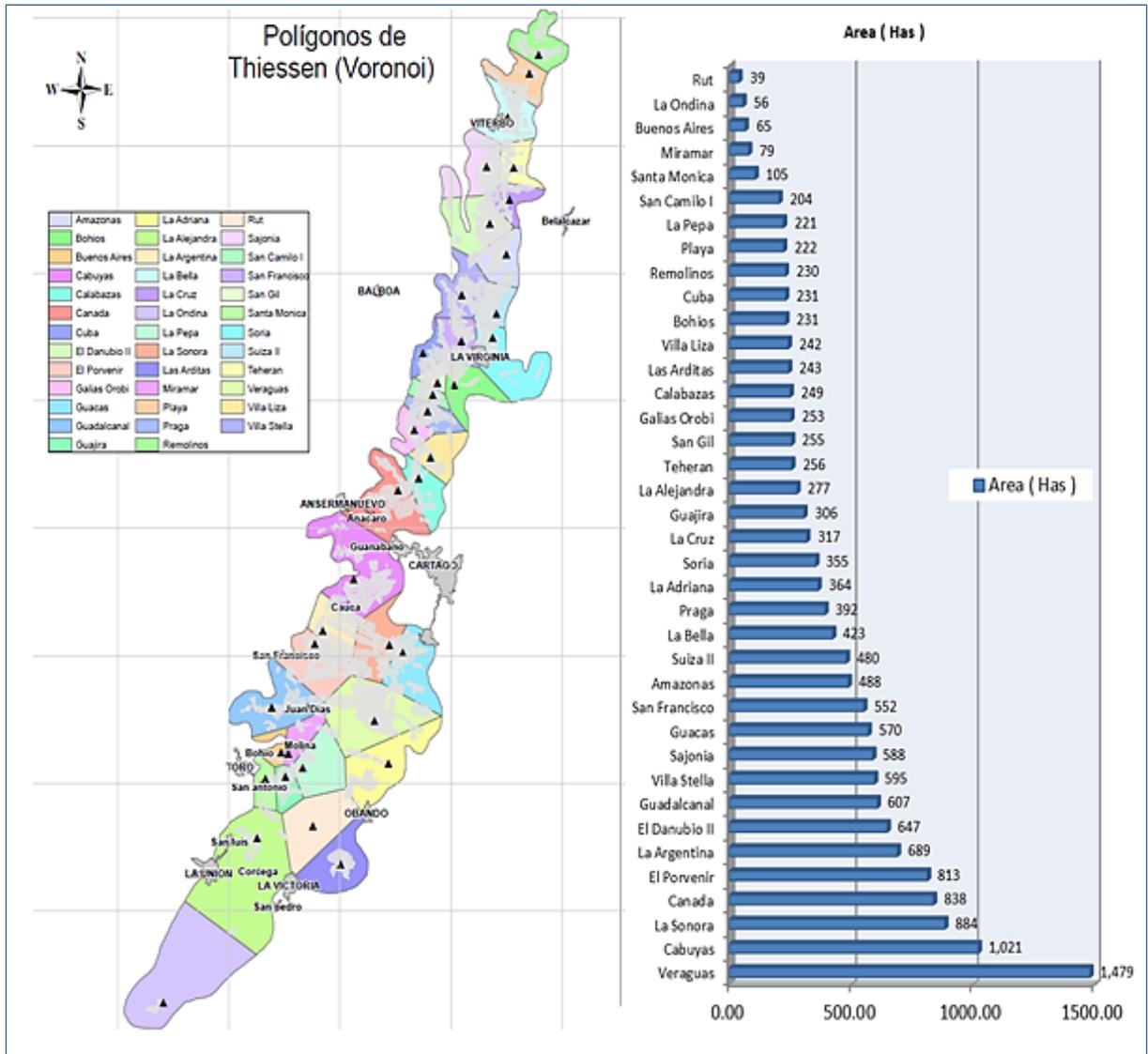


Figura 14. Polígonos de Thiessen. Departamento de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A. Cobertura por pluviómetro.

2. Mapa de los Distancias. A través de la herramienta de análisis de Quantum Gis. (Matriz de Distancia), se calcula la distancia de un conjunto de lotes con relación al pluviómetro. La distancia promedio de una suerte a un pluviómetro equivale a 1629.98 mts.

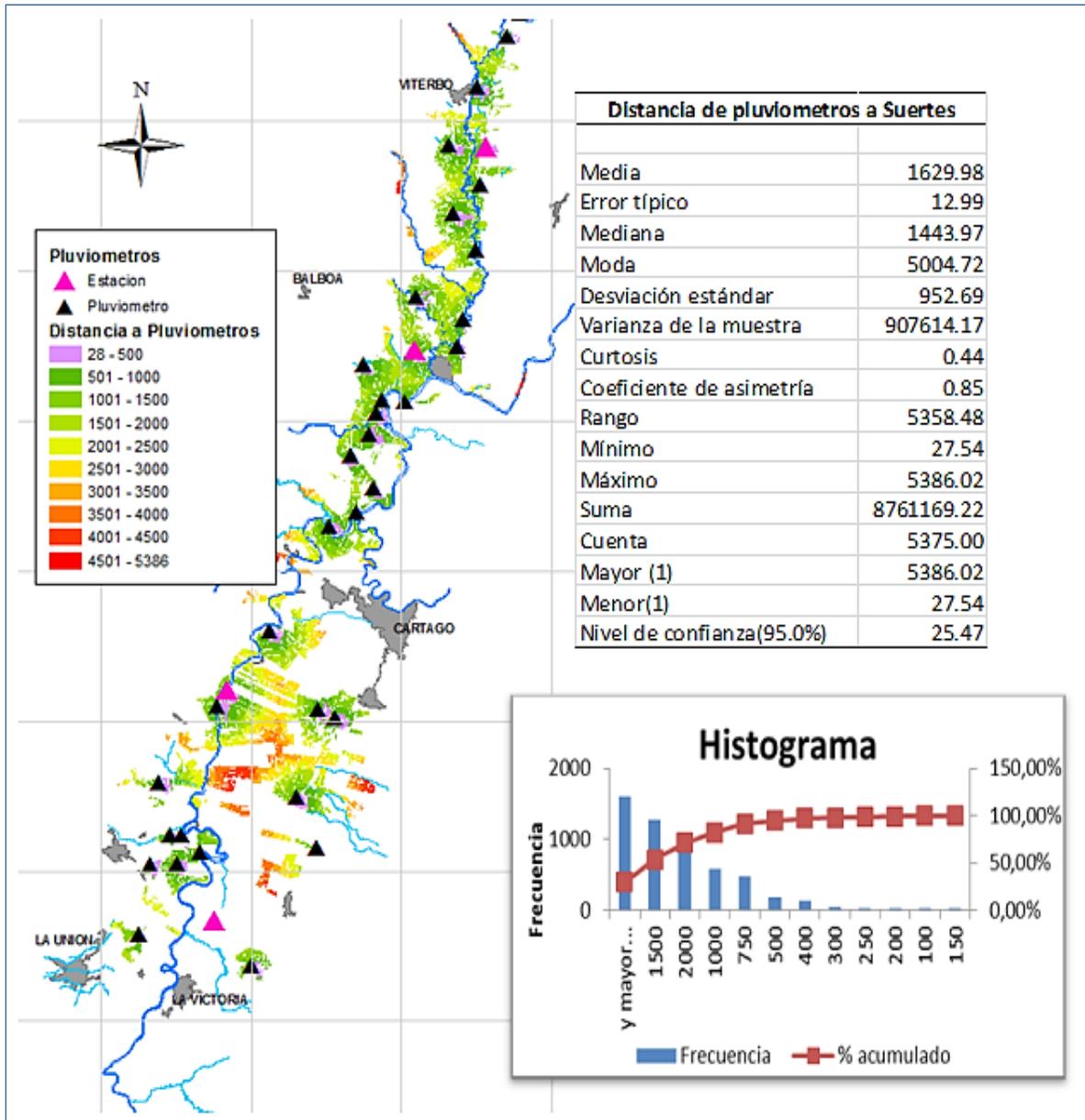


Figura 15. Mapa de Distancias. Departamento de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A.

3. Hidrogramas de Nivel freático y Precipitación. Se analizó la información existente de los pozos de observación versus la información de la red de pluviómetros del ingenio. Considerando la delimitación por microcuenca, se realizó un análisis mensual y anual se estas dos variables climáticas, se logra determinar la fluctuación del nivel freático en comparación con la variabilidad de la precipitación en el mismo periodo de tiempo 2010 a 2014.

Las microcuencas 2, 10, 13 y 17 presentaron un promedio anual de nivel freático menor a 78 cm de profundidad, las cuales corresponden al 38% del área de estudio, el 29% del área estuvo influenciada por NF mayor 80 cm de profundidad y el 33% superó los 100 cm de profundidad.

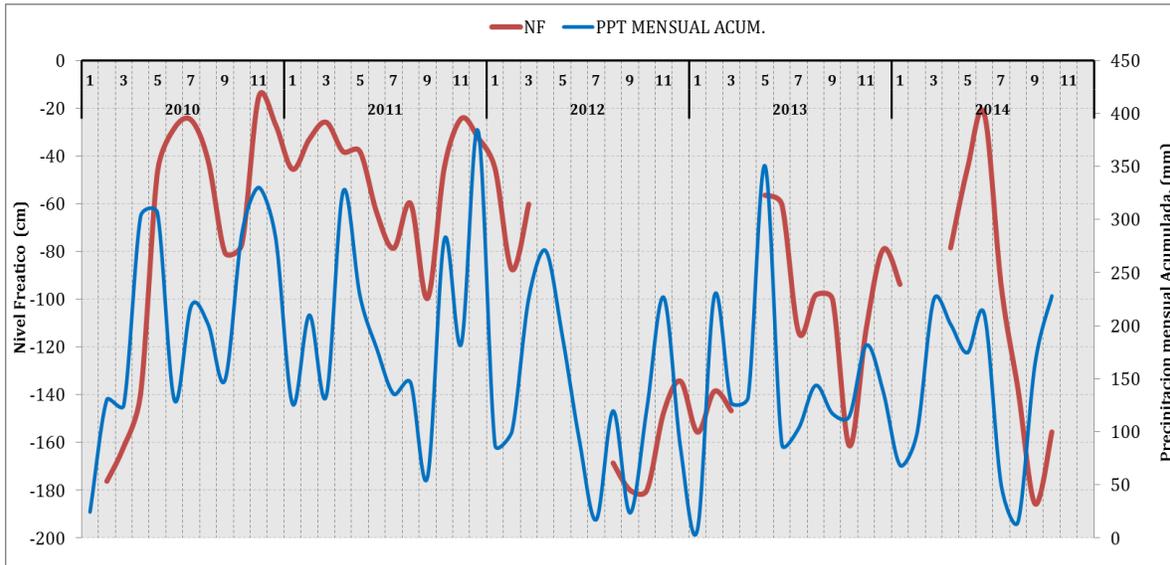


Figura 16. Microcuenca # 2

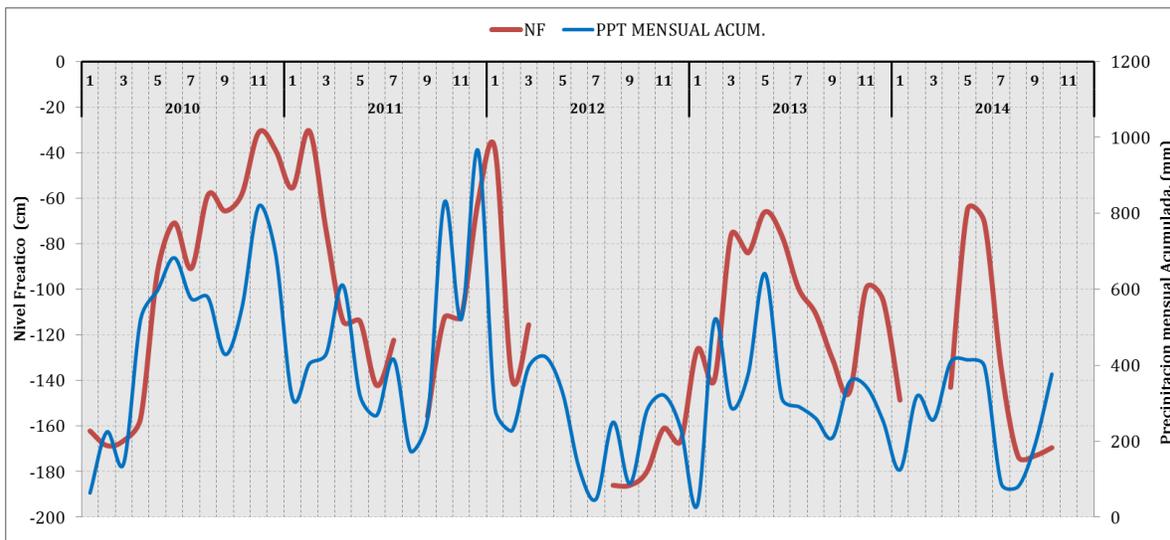


Figura 17. Microcuenca # 6

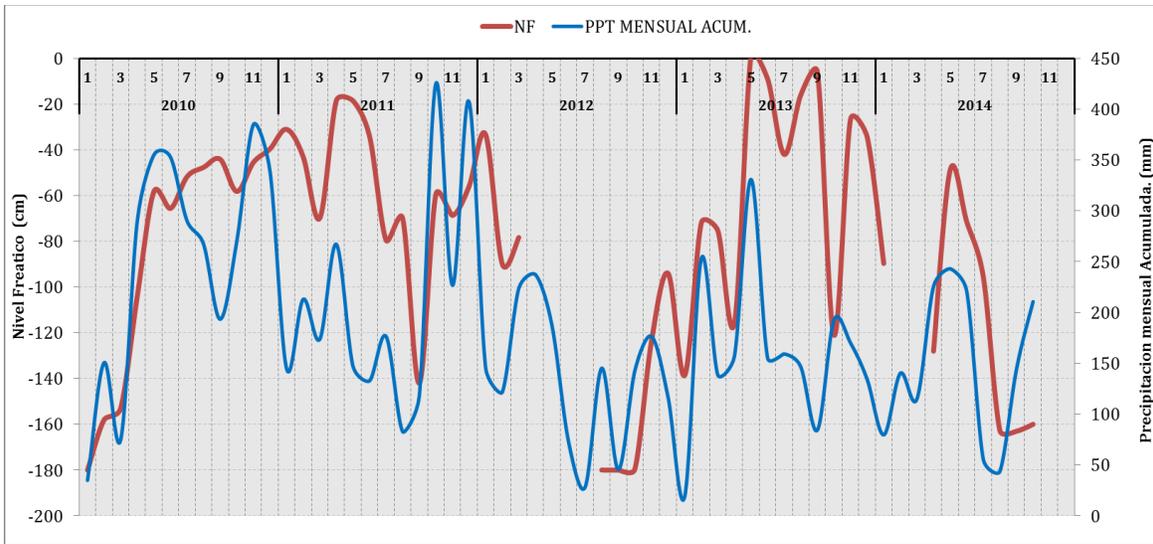


Figura 18. Microcuenca # 17

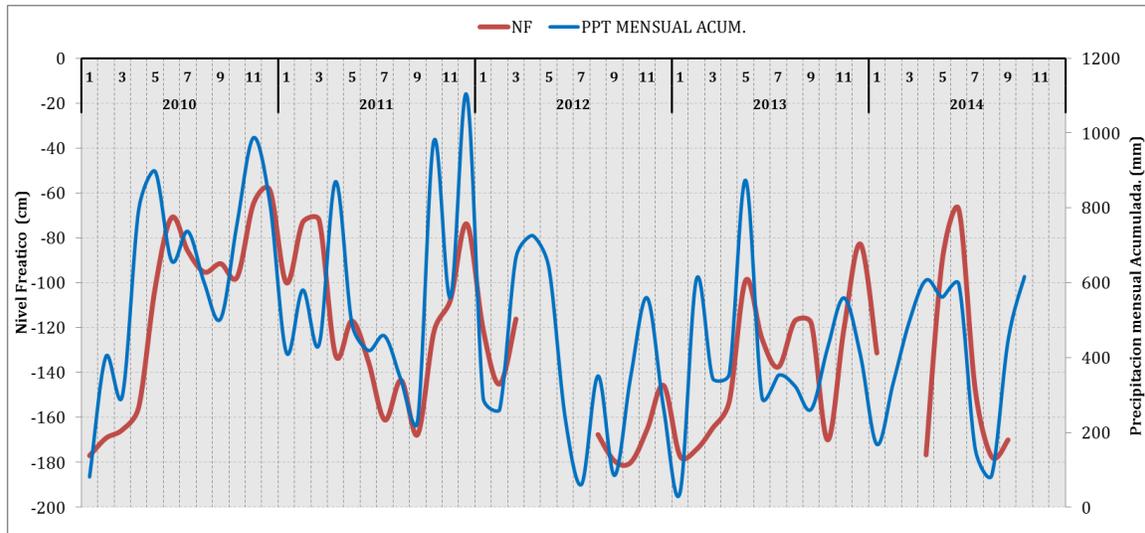


Figura 19. Hidrogramas de Nivel Freático.
Departamento de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A.

4. Modelo efecto rezago. De acuerdo con el modelo de rezago (ver figura 20), la precipitación mensual se comparó con el comportamiento de la profundidad de nivel freático, encontrándose un rezago de un mes como resultado del tiempo de respuesta del acuífero, influenciado por los eventos de precipitación y los tipos de suelo presentes en el área de estudio.

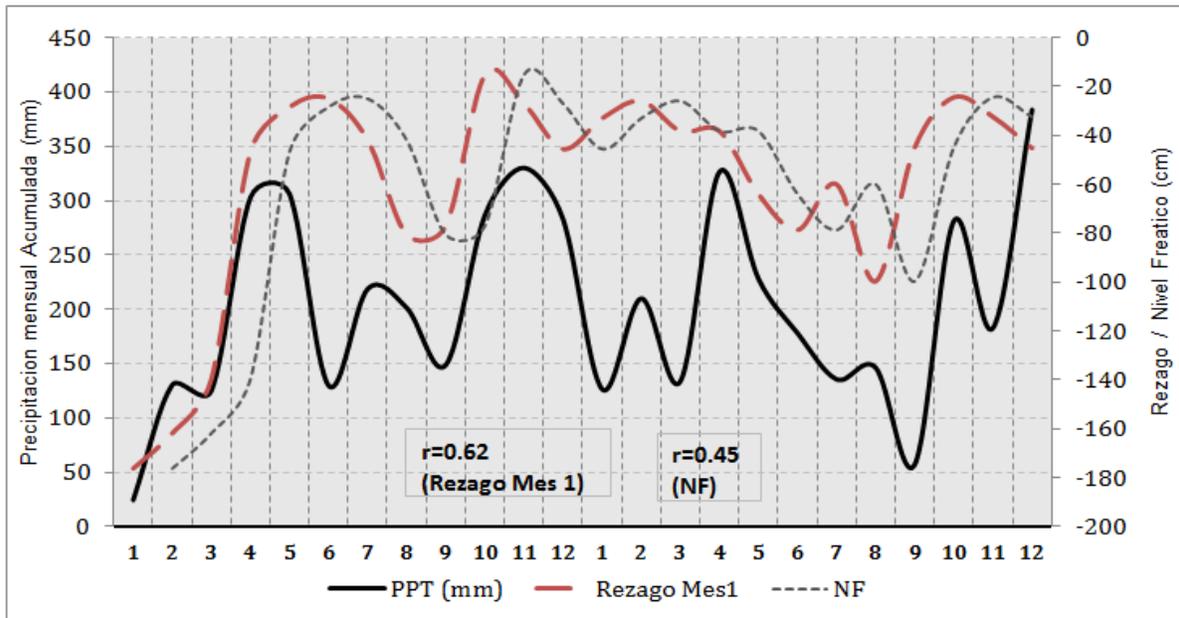


Figura 20. Efecto Rezago 1 mes. Departamento de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A.

5. Mapas de Isobatas e Isohipsas. Con la información colectada y analizada fueron construidos mapas de isobatas (curvas de igual profundidad de NF) e isohipsas (curvas de igual cota del nivel freático), los cuales permiten conocer la dirección del flujo de agua subterránea. Las cotas del nivel freático se calcularon para cada sitio, restando de la cota de la superficie del terreno la profundidad del nivel freático respectivo. Se trabajó con el promedio de isobata para cada año; de igual forma fueron elaborados mapas de Isohipsas, los cuales son de gran importancia ya que permiten delimitar las áreas que requieren ajustes en el sistema de drenaje, es decir, aquellas zonas que permanecen afectadas por niveles freáticos superficiales durante períodos prolongados, así como aquellas que tienen déficit de humedad por una mayor profundidad de este nivel.

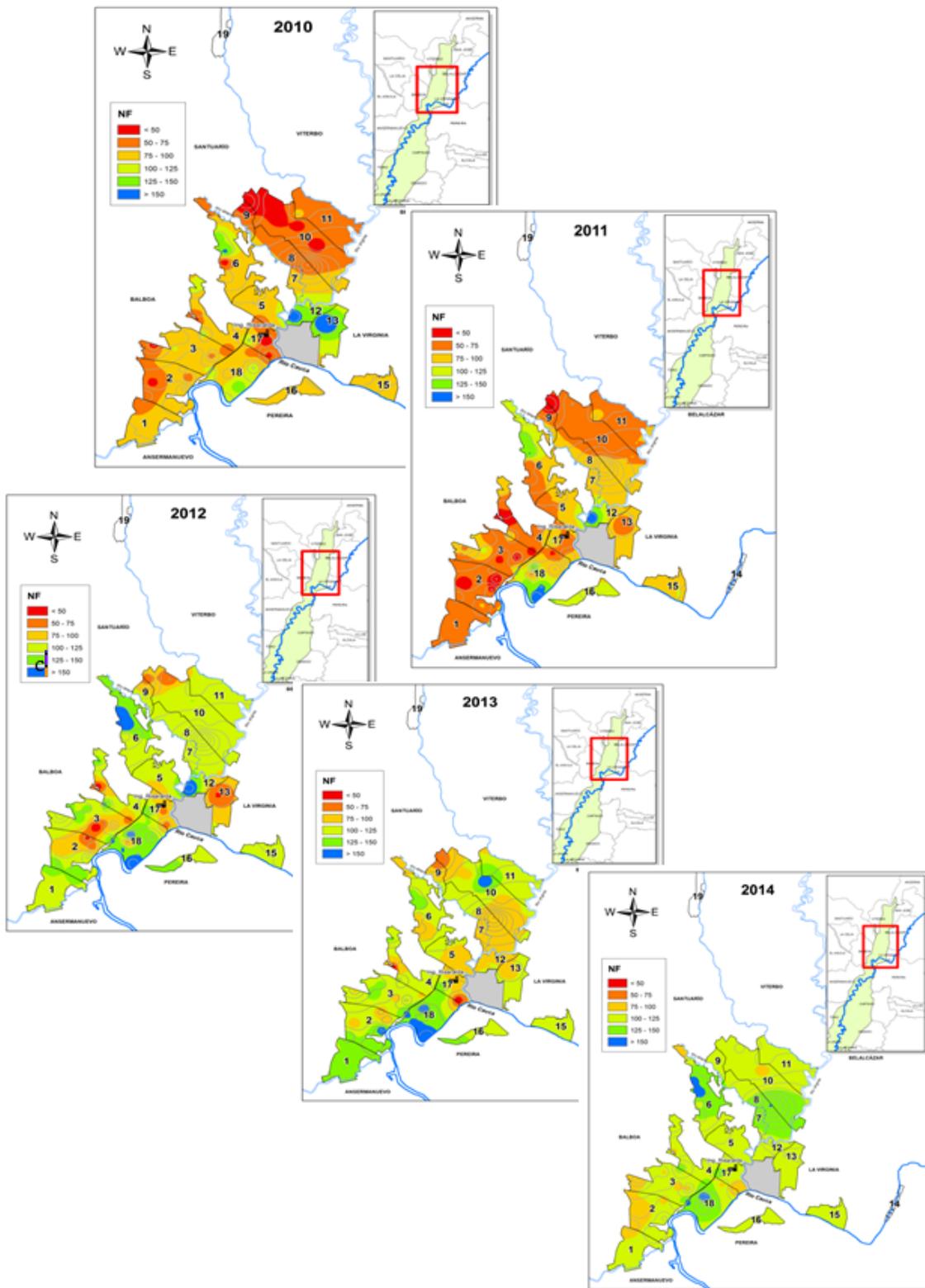


Figura 21. Comportamiento Multianual Isobatas (2010 – 2014). Departamento de Agronomía. Ingenio Risaralda S.A.

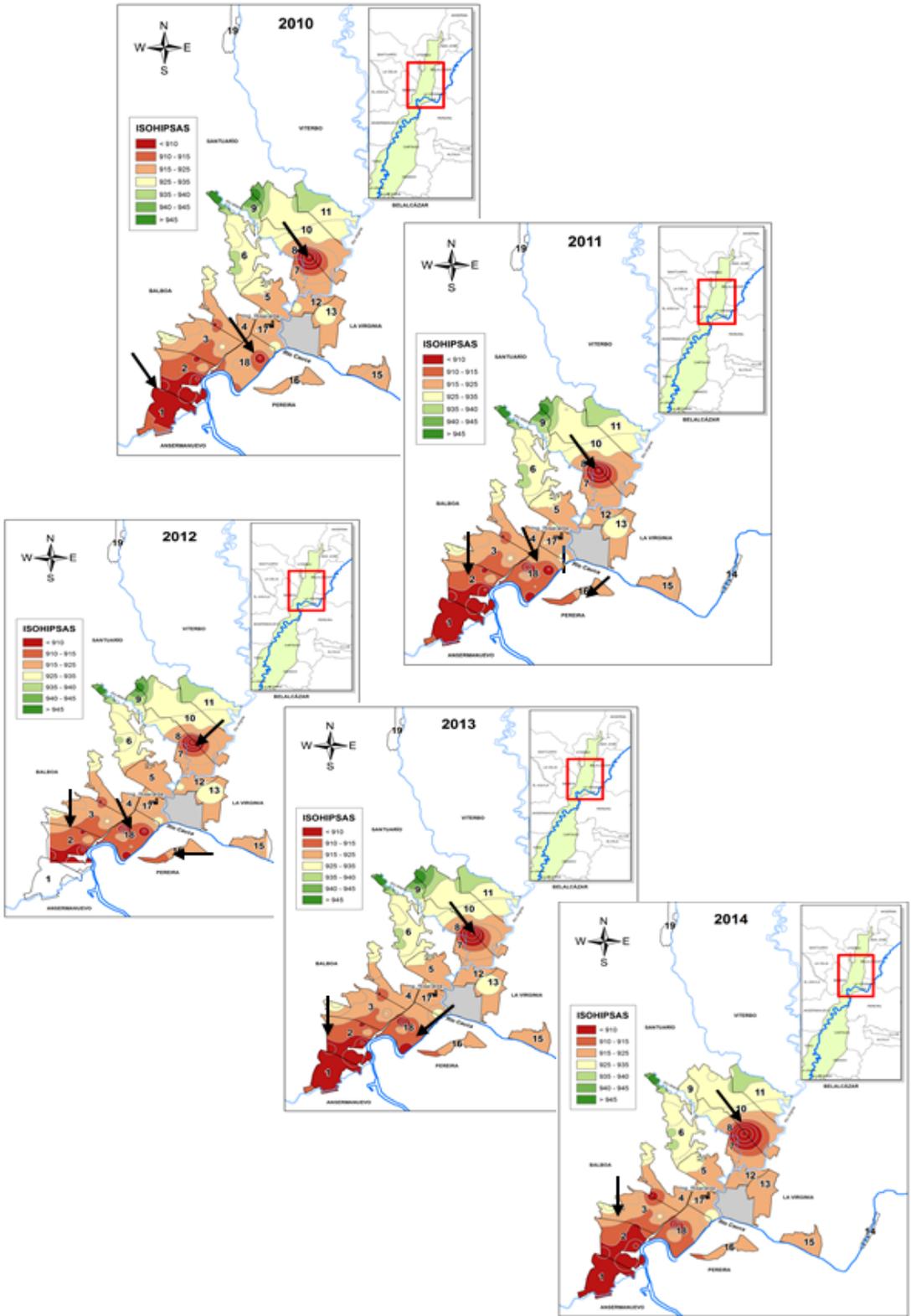


Figura 22. Comportamiento Multianual Isohipsas (2010 – 2014). Departamento de Agronomía, Ingenio Risaralda S.A

8. CONCLUSIONES

El establecimiento de una red de monitoreo continuo pluvio-freatimétrica con criterios técnicos y de variabilidad espacial presente en la zona de interés, proporciona al ingenio herramientas sólidas para la toma de decisiones en el manejo del recurso hídrico.

Se encontró que el modelo de mejor ajuste para la red Pluviométrica fue el exponencial, y la distancia encontrada como óptima entre pluviómetros fue de 433 mts según los 4 años de registros pluviométricos analizados. De acuerdo con el análisis Geoestadístico, se deduce que la actual red pluviométrica establecida en el ingenio presenta limitaciones para el análisis de la variabilidad en la precipitación. Considerando lo anterior y evaluando la operatividad respecto a instalación y mantenimiento, se identifican los sitios que requieren de manera prioritaria la instalación de nuevos pluviómetros, para lo cual se propone densificar la red mediante la instalación inicial de 23 pluviómetros adicionales, distribuidos en el área de influencia del Ingenio.

De acuerdo con este trabajo, el Ingenio actualmente realiza la instalación de nuevos pozos de observación para medición del nivel freático en los Departamentos de Caldas, y posteriormente en el Valle del Cauca, con el fin de conocer la fluctuación de las aguas subterráneas en las diferentes zonas que contribuya a la toma de decisiones.

9. RECOMENDACIONES

Socializar el proyecto con las diferentes áreas relacionadas.

Se recomienda la instalación y reubicación de pozos de observación y pluviómetros, con la finalidad de ampliar y optimizar la red existente.

Generar mapas de Isobatas e Isohipsas trimestral en épocas de verano y mensual en época lluviosa, para evaluar y analizar el comportamiento del nivel de las aguas subterráneas y plantear acciones preventivas a corto plazo.

Efectuar correlación en los diferentes sistemas que influyen en el balance hídrico, con la finalidad de optimizar el adecuado manejo de este recurso.

Capacitar a las personas encargadas de las lecturas del nivel freático, con el fin de mejorar la calidad de la información.

BIBLIOGRAFIA

Ayars, J., R. (1999). Realizing the potential of integrated irrigation and drainage water management for meeting crop water requirements in semi-arid and arid areas. *Irrigation and Drainage Systems* 13: 321-347.

Borin, M. (1990). Irrigation management of processing tomato and cucumber in environments with different water table depths. *Acta Hort. (ISHS)* 267:85-92.

Carbonell, J. (2011). "Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (cuarta aproximación). Principios metodológicos y aplicaciones." En: Colombia Serie Técnica - Cenicaña Centro De Investigación De La Caña De Azúcar De Colombia ISSN: 0120-5846 ed: Cenicaña v.N/A fasc.38 p.1 – 119.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda-CARDER. (2015). Sectorización Hidrográfica del Departamento de Risaralda. Documento base para la Estandarización de la codificación de Unidades Hidrográficas en el Marco de la Infraestructura de Datos Espaciales para el Departamento de Risaralda, Pereira, Colombia.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - CORPOICA (2011). Estrategias de respuesta de CORPOICA para mitigar el impacto de las inundaciones sobre la agricultura colombiana. Rehabilitación de la capacidad productiva de los suelos afectados por las inundaciones, en el Valle del Cauca. Recuperado de:
http://www.corpoica.org.co/sitioweb/Ola_Invernal/Documentos/Estrategias_Corpoica_Norte_del_Valle.pdf pp. 1-2.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM (2004). Metodología de cálculo del índice de escasez. Versión 30 de junio de 2004. Pag.8-9.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM (2011). Manual del observador Meteorológico. Pag.53-54. Recuperado de: www.bvsde.paho.org/bvsia/fulltext/colom.pdf.

Madramootoo, T. HELWIG and G DODDS. 200 1. Managing water tables to improve drainage water quality in Quebec, Canada. Transaction of the ASAE 44:1 511-1 519.

Oliver, M. A. Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. International Journal of Geographic Information Systems 4, 1990. pp. 313-332.

Valderrama, C. (2009) Estudio de drenajes regional de la zona centro. Sector Azucarero.

Valderrama, C. (1995) Drenajes. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Colombia: Editorial Cenicaña, Volumen V, pp. 211-233.

Villota. (2005) Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. by ... Series: Published by : IGAC , Physical details: 184p.

Subiros, R. (1995). Influencia del nivel freático o tabla de agua en el desarrollo del cultivo. El cultivo de la caña. ISBN 9977-64-811-5. P.200.

U.S. Geological Survey (USGS). EPA. 2004. La Ciencia del Agua. Recuperado de: <http://water.usgs.gov/gotita/earthswuse.html>