



Corporación Autónoma
Regional del Valle del Cauca

CONVENIO DE ASOCIACION No 172 de 2008 ENTRE LA CORPORACIÓN AUTONÓMA
REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA-CVC Y LA FUNDACIÓN PARA EL SANEAMIENTO Y
MANEJO DE LOS RECURSOS NATURALES

EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN RELACIÓN CON EL HUMEDAL LAGUNA DE SONSO



Volumen I



FUNDACION PARA EL SANEAMIENTO Y
MANEJO DE LOS RECURSOS NATURALES

Santiago de Cali, Septiembre de 2010

**CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA - CVC
SUBDIRECCIÓN DE GESTIÓN AMBIENTAL
GRUPO DE BIODIVERSIDAD**

**CONVENIO DE ASOCIACIÓN No 172 DE 2008 CELEBRADO ENTRE LA CVC Y
LA FUNDACIÓN SAMARENA**

**“EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA EXISTENTE ENTRE LOS NIVELES DEL
HUMEDAL LAGUNA DE SONSO CON EL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEAS
Y LOS APORTES DE LAS CORRIENTES SUPERFICIALES, A PARTIR DEL
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED DE BATERIAS DE PIEZÓMETROS”**

VOLUMEN I

**FUNDACION PARA EL SANEAMIENTO Y MANEJO DE LOS RECURSOS
NATURALES**

Santiago de Cali, Septiembre de 2010

La presente investigación fue realizada en el marco del convenio de asociación número 172 de 2008, celebrado entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Fundación para el Saneamiento y Manejo de los Recursos Naturales.

Este documento fue elaborado por el equipo de trabajo de Samarena:

Cesar Andrés Vivas, John Jairo Márquez, Marcela Muñoz, Ana Mercedes Hernández, Juan Geovany Bernal.

Se agradece la colaboración de:

Guillermo Medina, Robert Peck, Jairo Márquez, Carmelo Quintero, Eustaquio Barona, Orlando Márquez.

Se destaca la colaboración de los profesionales del grupo de Biodiversidad, Recursos Hídricos y de la DAR-Centro Sur, quienes estuvieron atentos y prestos a proveer colaboración logística e información para el buen desarrollo del convenio:

Pablo Emilio Flórez, Omar Azcúntar, Ledy González, Lina Zapata, María Mercedes Gutiérrez, Carlos Arturo Restrepo, Ruber Rengifo, Gloria Isabel Páez, Javier Espinoza, Ramón López, Eine Acevedo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	1
2. GENERALIDADES.....	3
2.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	3
2.2 GEOLOGÍA SUPERFICIAL.....	4
2.3 GEOLOGÍA DEL SUBSUELO:	4
2.4 HIDROLOGIA Y CLIMATOLOGIA	7
3. ESTADO DEL ARTE.....	8
3.1 LA ECO HIDROLOGÍA DE HUMEDALES	8
3.2 LA RELEVANCIA DE LOS FLUJOS LOCALES EN LA ECOHIDROLOGIA DE HUMEDALES	9
3.3 EFECTOS DE LA ALTERACIÓN DE LOS FLUJOS LOCALES	11
3.4 ENFOQUES PARA ESTABLECER UN RÉGIMEN PIEZOMÉTRICO ECOLÓGICO.....	11
4. MODELO CONCEPTUAL Y DE FLUJO	13
4.1 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA	13
4.1.1 EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA EN EL ACUÍFERO	14
4.1.2 RESULTADOS	16
4.1.3 CALIDAD DE LOS DATOS	18
4.1.4 GRADIENTES DE FLUJO	21
4.2 CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA	24
4.2.1 LOS ISÓTOPOS Y EL CICLO HIDROLÓGICO	24
4.2.2 ORIGEN DE LAS AGUAS MONITOREADAS	26
4.2.3 RESULTADOS TRITIO	28
4.3 CARACTERIZACIÓN PIEZOMETRIA	29
4.3.1 DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO	29
4.3.2 UBICACIÓN DE LAS BATERÍAS	31
4.3.3 CORRELACIONES LITOLÓGICAS	33
4.3.4 MONITOREO DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS	33
4.3.5 PIEZOMETRÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO	34
4.4 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA HIDROLÓGICO	35
4.4.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN	36
4.4.2 INTERCAMBIO RÍO CAUCA/LAGUNA DE SONSO	37
4.4.3 PRECIPITACIÓN	42

4.4.4	TRIBUTARIOS	43
4.4.5	AGUAS SUBTERRÁNEAS	45
4.5	BALANCE HÍDRICO	47
5.	DETERMINACIÓN DE IMPACTOS HIDROLOGICOS	52
6.	LINEAMIENTOS DE MANEJO	56
6.1	DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS.	58
7.	CONCLUSIONES	62
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1.	Ubicación general Laguna de Sonso.....	3
Figura No. 2.	Geología superficial alrededor de la Laguna de Sonso.....	5
Figura No. 3.	Corte transversal de la geología subsuperficial en la Laguna de Sonso.....	6
Figura No. 4.	Humedal de fondo de valle en contacto con el acuífero adyacente.	9
Figura No. 5.	Esquema de balance hídrico en un humedal.....	10
Figura No. 6.	Diagrama de sistemas de flujo. Tomado de Rodríguez 2010.	12
Figura No. 7.	Ubicación de puntos de monitoreo para análisis hidroquímico.....	14
Figura No. 8.	Evolución Geoquímica según Cheboratev.....	15
Figura No. 9.	Principales Tipos de Suelos en la Laguna de Sonso	17
Figura No. 10.	Gradiente de de flujo según Conductividad Eléctrica.....	22
Figura No. 11.	Gradiente de de flujo según concentración de Bicarbonatos.....	23
Figura No. 12.	Isotopos del hidrogeno (las esferas rojas representan los protones, las grises los neutrones)	24
Figura No. 13.	Posible conexión entre cuerpos de agua según concentración de ¹⁸ O.....	26
Figura No. 14.	Línea Meteorica Local para el Valle del Cauca y línea de Evaporación en la Laguna de Sonso.....	28
Figura No. 15.	Diseño de batería de piezómetros.....	30
Figura No. 16.	Dirección del flujo subterráneo en pares de baterías piezométricas.	30
Figura No. 17.	Variables de cálculo para determinar energía potencial.	31
Figura No. 18.	Localización de las baterías piezométricas.....	32
Figura No. 19.	Niveles freáticos y direcciones de flujo para el mes de Noviembre de 2009	35
Figura No. 20.	Perfiles batimétricos sección limnómetro en Caño Nuevo.	38
Figura No. 21.	Variación de niveles en el Río Cauca, en el Caño Nuevo y en la Laguna de Sonso, período Junio de 2009 a Marzo de 2010.....	40
Figura No. 22.	Ajuste de distribuciones de Probabilidad de los niveles horarios en la Laguna de Sonso período 2000-2007	41
Figura No. 23.	Comparación entre precipitación y ascenso de niveles en la Laguna de Sonso.	42
Figura No. 24.	Comparación entre registros de precipitación y ascenso de niveles freáticos (primera aproximación).....	43
Figura No. 25.	Principales tributarios de la Laguna de Sonso.....	44
Figura No. 26.	Relación del caudal aforado en los tributarios y la precipitación.	44
Figura No. 27.	Segmentos asignados y líneas de distancia de cada piezómetro a la Laguna.	46
Figura No. 28.	Esquema conceptual del sistema hidrológico en el humedal Laguna de Sonso.	48
Figura No. 29.	Oscilaciones de los niveles en un lago debido a las oscilaciones en los niveles Piezométricos en el acuífero.....	53

Figura No. 30. Línea de afectación por una oscilación de 50 cm del nivel freático en los niveles de la Laguna de Sonso..... 55

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1.	Tipos de suelo en relación a los puntos de muestreo.....	16
Tabla No. 2.	Resultados de análisis hidroquímicos de las cuatro campañas de muestreo.	19
Tabla No. 3.	Relación Balance Iónico y de Relación Potasio/Sodio.....	20
Tabla No. 4.	Resultados análisis isotópicos.....	25
Tabla No. 5.	Posible Origen altitudinal de algunos puntos de muestreo, mes de Octubre de 2009.	27
Tabla No. 6.	Datación de aguas subterráneas para el Valle del Cauca	28
Tabla No. 7.	Variables para cálculo de energía potencial en piezómetros	31
Tabla No. 8.	Valores estimados de velocidad de flujo subterráneo.....	33
Tabla No. 9.	Información recolectada para la caracterización del sistema hidrológico.	36
Tabla No. 10.	Diferencias entre los dos sistemas de coordenadas en los lugares de control y registro.	36
Tabla No. 11.	Evaporación y Evapotranspiración obtenida para la Laguna de Sonso por diferentes métodos.....	37
Tabla No. 12.	Valores de Rugosidad de acuerdo con los Niveles en Caño Nuevo	39
Tabla No. 13.	Caudal medio de salida en Caño Nuevo.	39
Tabla No. 14.	Precipitación Total mensual estación El Vínculo.....	42
Tabla No. 15.	Aforos realizados por CVC en los tributarios de la Laguna de Sonso.....	45
Tabla No. 16.	Caudales medios mensuales de aguas subterráneas (m ³ /seg).....	47
Tabla No. 17.	Relaciones Nivel-Área-Volumen en Laguna de Sonso.	49
Tabla No. 18.	Volúmenes de entrada y salida al sistema hidrológico.....	49
Tabla No. 19.	Balance Hídrico para el período de análisis en Laguna de Sonso.....	51
Tabla No. 20.	Comparativo de balance hídrico de diferentes autores.	51
Tabla No. 21.	Correspondencia en las etapas de manejo de aguas subterráneas y cuencas hidrográficas, Ramsar 2007.....	57

LISTA DE FOTOS

Foto No. 1.	Muestreo en acuíferos	13
Foto No. 2.	Muestreo en laguna de sonso	13
Foto No. 3.	Muestreo en río Cauca	13
Foto No. 4.	Muestreo en río Guadalajara.....	13
Foto No. 5.	Registro de niveles piezométricos.....	34

1. INTRODUCCION

La Laguna de Sonso es uno de los ecosistemas más importantes del Sur Occidente Colombiano no solo por la riqueza natural que envuelve, sino por haber resistido la avanzada de la agroindustria azucarera y representar un paisaje diferente en medio del gigantesco desierto verde que representa el monocultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca.

Desde hace ya algún tiempo diversos estudiosos de la hidrología e hidrogeología en el Valle del Cauca, venían planteando la posibilidad de una conexión importante entre el acuífero y el humedal y en particular por la evidencia que se mostraba en los balances hídricos realizados para la Laguna en distintos períodos hidrológicos.

De tal forma surge el convenio de asociación entre la corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC y Samarena para evaluar la dinámica de las aguas subterráneas en el humedal Laguna de Sonso, el cual se empezó a ejecutar en Enero 30 de 2009 y finalizó el 30 de Septiembre de 2010.

Luego de 20 meses de actividades, se presenta este informe final con los resultados obtenidos de cada uno de los análisis y procedimientos que llevaron a constatar la conexión entre las aguas subterráneas y el humedal Laguna de Sonso.

En el primer capítulo se expone el resultado de los análisis hidroquímicos que plantean a través de las líneas de meteorización iónica, el posible gradiente de flujo en los distintos cuerpos de agua del sistema humedal.

Posteriormente el capítulo de isotopía, permite establecer la conexión entre los diferentes cuerpos de agua, la procedencia del flujo y las direcciones de recarga preferencial.

La caracterización piezométrica establece de acuerdo a las isopiezas los gradientes de flujo según la carga hidráulica de cada punto.

En el capítulo dedicado a la caracterización hidrológica y balance hídrico se plantea por primera vez dentro de las variables de cálculo, las entradas y salidas debidas a la interacción de la Laguna con el acuífero adyacente y de igual forma se presenta el ajuste de la ecuación de balance hídrico con los estimativos de almacenamiento de las curvas de nivel-área-volumen.

Una vez obtenida la magnitud del aporte de las aguas subterráneas al humedal se procedió a establecer una primera aproximación de los impactos hidrológicos posibles debido a la oscilación de niveles freáticos en la zona de recarga de la Laguna. Este primer estimativo arroja un interesante resultado que debe ser tenido en cuenta para los futuros planes de gestión integral del recurso hídrico en la zona.

Finalmente se describe una serie de conceptos y procedimientos que se deben seguir en el proceso de gestión conjunta del recurso hídrico subterráneo y superficial para la conservación de humedales en el mundo. Estas directrices fueron planteadas por la convención Ramsar, 2007.

2. GENERALIDADES

2.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Laguna de Sonso está ubicada sobre la margen derecha del río Cauca a 5 km al sur de la ciudad de Buga. Comprende la zona plana delimitada por los Ríos Sonso y Guadalajara y desde la divisoria de aguas de estos dos ríos hasta el río Cauca, incluyendo el área de drenaje de la propia Laguna, ver Figura No. 1.

El área total de la reserva es de 2045 Has, de las cuales 745 corresponden al espejo de agua, constituyéndose las 1300 Has restantes en el anillo de zona amortiguadora. La cota de la laguna para su capacidad de llenado óptimo se ha estimado en 937 msnm.

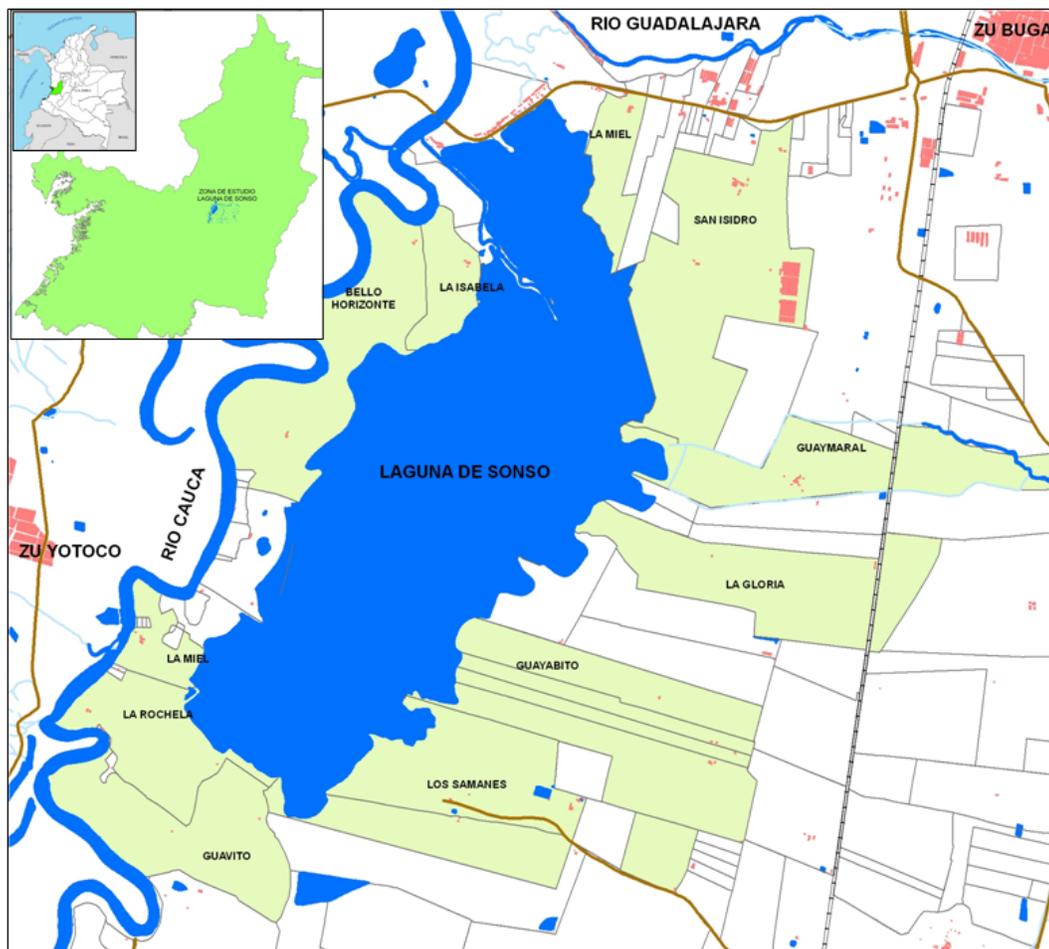


Figura No. 1. Ubicación general Laguna de Sonso

2.2 GEOLOGÍA SUPERFICIAL

El valle del Río Cauca se constituye en una gran unidad morfológica regional de planicie aluvial desarrollada por la dinámica del Río Cauca durante el período cuaternario, delimitado por las cordilleras Occidental y Central¹.

Los diferentes tributarios que drenan al río en la margen derecha (en sentido sur-norte), depositaron gran cantidad de sedimentos constituidos principalmente por rocas metamórficas, volcánicas e intrusivas. A su vez que los ríos de la margen izquierda al salir de la región montañosa y encontrar una disminución en la pendiente depositaron grandes cantidades de sedimentos de rocas volcánicas y diabasas. De esta manera se originaron los conos de deyección o abanicos aluviales que provienen de la erosión de ambas cordilleras y se ubican principalmente hacia las estribaciones de las mismas, ya en las proximidades a la llanura aluvial del río Cauca se encuentran sedimentos constituidos por depósitos del mismo río.

A lo largo del valle se encuentran afloramientos de diversos macizos rocosos conformados por diferentes tipos de rocas que constituyen controles litológicos y restringen la movilidad horizontal del cauce del río Cauca. A lo largo del río también se encuentra un estrato aparentemente resistente a la erosión, denominado usualmente caliche. Esta capa podría constituirse como un posible aislamiento de intercambio río-acuífero en algunos sectores del área de estudio. La Figura No. 2 muestra la distribución de la geología superficial en la Laguna de Sonso.

2.3 GEOLOGÍA DEL SUBSUELO:

Los sedimentos del subsuelo en la zona plana del departamento del Valle del Cauca están constituidos por un importante relleno aluvial en un área de 3400 km², este depósito se encuentra dentro de la gran fosa del Cauca formada por movimientos tectónicos hace millones de años.

Con base en las perforaciones realizadas en la zona, y a los registros geoelectricos, se han podido definir tres tipos de sistemas acuíferos bien definidos sobre la llanura aluvial del río Cauca, estas unidades se aprecian bien diferenciadas hacia el sur de la planicie; a 1 Km en la margen izquierda tomada desde el eje del Río Cauca y a 7 Km. en la margen derecha del mismo.

Esta diferenciación de unidades acuíferas se pierde hacia el pie de monte de las cordilleras, es decir en los conos aluviales en donde se observa una sola unidad, conformada por depósitos permeables con algunas intercalaciones de arcilla que no presentan gran variación respecto a la profundidad.

¹ Idem.

A continuación se describe el comportamiento de tres unidades hidrogeológicas que según estudios realizados por la CVC, se presentan de forma característica en un buen tramo del Valle geográfico del Río Cauca.

- Unidad A: está constituida por una alternancia de sedimentos permeables e impermeables con acuíferos libres y semiconfinados principalmente, tiene un espesor promedio de 120 m y un 30 a 40% de sedimentos permeables. Los pozos que aprovechan esta unidad captan unos 35 a 45 m de acuífero con caudales que pueden alcanzar hasta 100 litros por segundo en los pozos ubicados sobre la llanura en la margen derecha del Río Cauca.

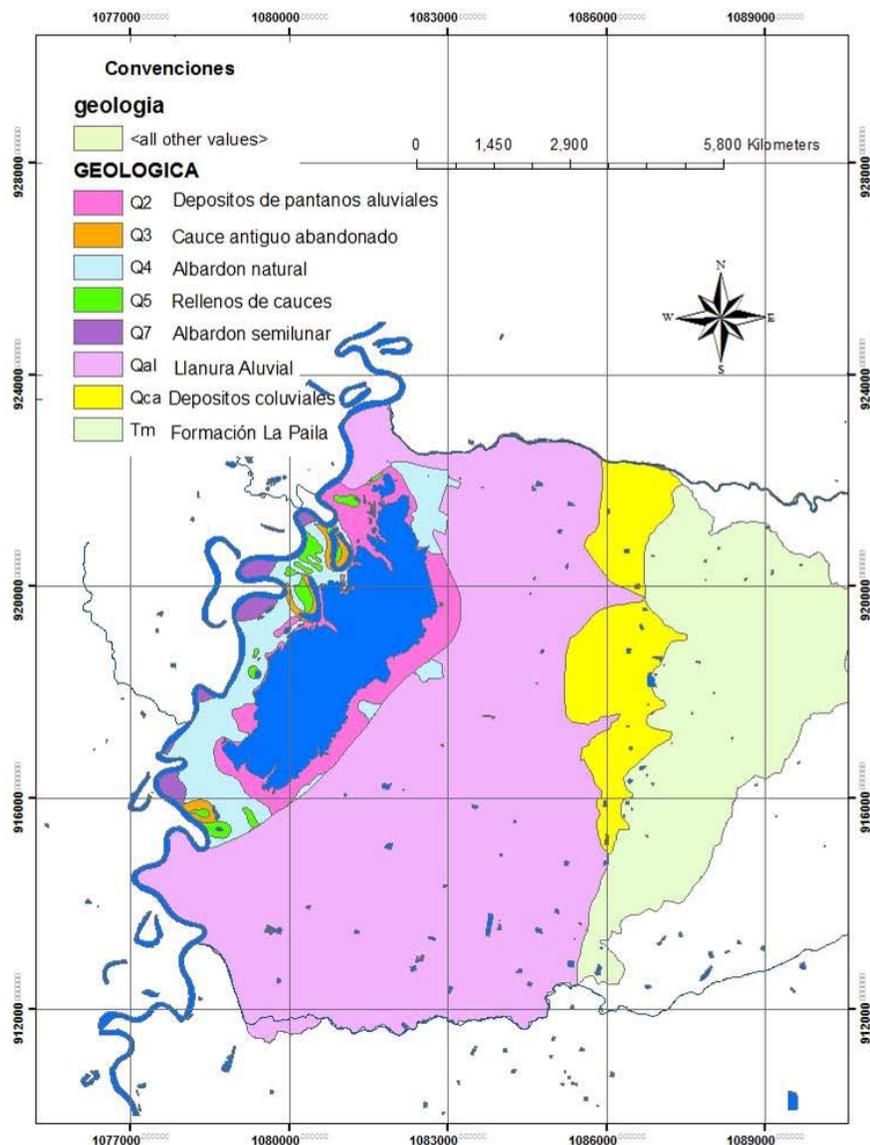


Figura No. 2. Geología superficial alrededor de la Laguna de Sonso.

- Unidad B: Es una formación constituida principalmente por Arcilla y Limos con algunos lentes muy delgados de gravas y arenas, no se considera como unidad

productora de agua, tiene un espesor de unos 80 a 100 m y es el techo de los acuíferos confinados de la unidad C.

- Unidad C: Localizada generalmente por debajo de los 180 m de profundidad, sin embargo su geometría y localización no están bien definidos tiene acuíferos confinados eventualmente con flujo saltante, de buena capacidad específica y excelente calidad de agua. Básicamente esta unidad está constituida por capas de arenas, gravas y algunas veces cantos rodados, intercaladas entre capas de arcillas orgánicas e inorgánicas²

Las perforaciones realizadas alrededor de la Laguna de Sonso han permitido establecer que en los primeros diez metros del perfil litológico el acuífero se encuentra intercalado con lentes arcillosos los cuales generan caminos preferenciales para el afloramiento y confinamiento de las capas de almacenamiento de agua. La Figura No. 3 permite observar una aproximación del modelo litológico de la Laguna de Sonso.

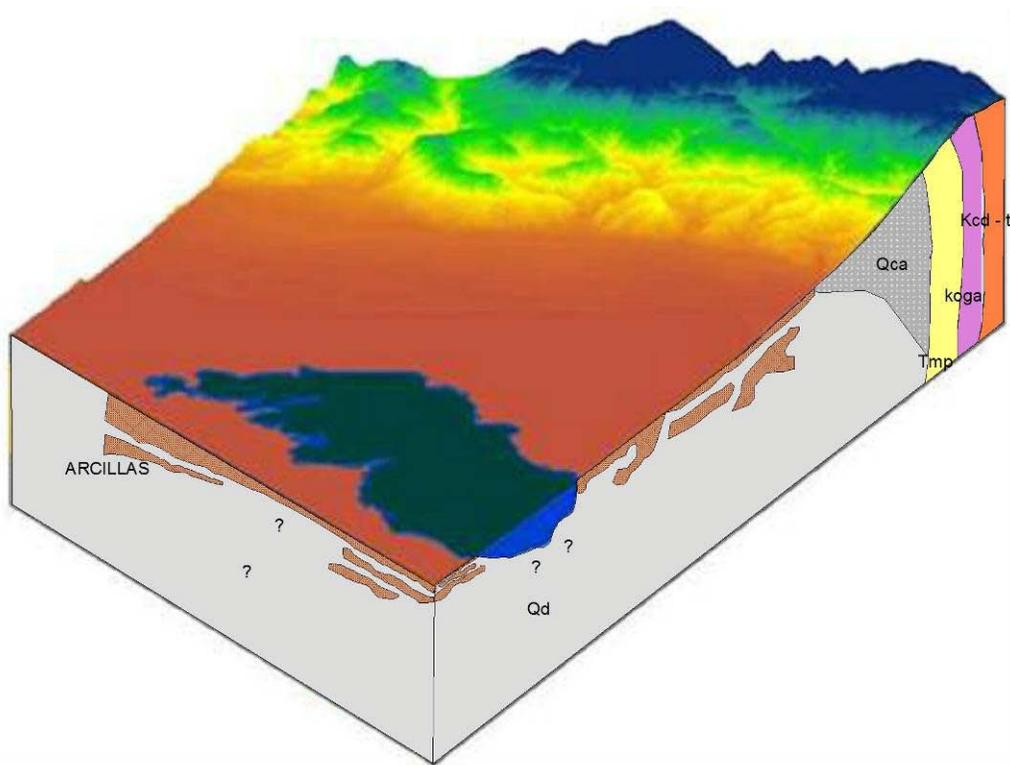


Figura No. 3. Corte transversal de la geología subsuperficial en la Laguna de Sonso.

²Aprovechamiento y Variación de las Reservas de Aguas Subterráneas en el Valle del Cauca: Medina, 1994.

2.4 HIDROLOGIA Y CLIMATOLOGIA

El clima de la cuenca del río Cauca en la zona del Valle del Cauca, y en general el de Colombia, está determinado por la posición en la zona de convergencia intertropical o de bajas latitudes, la altura y orientación de su relieve, la extensión de su territorio y los vientos locales y los vientos alisios³.

Por su posición en la zona de mayor insolación presenta un clima tropical que se caracteriza por presentar temperaturas relativamente altas y uniformes durante todo el año; por esta razón no se pueden identificar, como en otras latitudes, estaciones térmicas.

Las tendencias de variación que presentan en promedio las temperaturas máximas, medias y mínimas a nivel mensual multianual pueden considerarse uniformes durante todo el año. Las temperaturas mínimas oscilan entre 18 y 19°C, las medias entre 23 y 24°C y las temperaturas máximas se encuentran entre 29 y 31°C. La humedad relativa varía en función de la altitud: a mayor altitud mayores valores de humedad. Los valores promedios registrados en la zona varían entre 74 % y 80%.

La precipitación y la evaporación en la zona en estudio, muestra dos períodos en el año de bajas precipitaciones (Diciembre - Febrero y Junio - Agosto) y dos de altas precipitaciones (Marzo - Mayo y Septiembre - Noviembre). Así mismo, la evaporación presenta una tendencia de variación anual, mayor en los períodos o meses secos y menor en los períodos o meses húmedos.

³M. F. Hernández. Estudio de la calidad del agua en la Laguna de Sonso. Universidad del Valle, 2005.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 LA ECO HIDROLOGÍA DE HUMEDALES

La hidrología de un humedal crea las únicas condiciones fisicoquímicas que hace diferentes los ecosistemas terrestres bien drenados y los sistemas acuáticos profundos. Formas hidrológicas como la precipitación, la escorrentía, las aguas subterráneas, las inundaciones, el transporte de energía y nutrientes por flujo de ríos son el resultado de todas las entradas y salidas hidrológicas que influyen la bioquímica de los suelos y son grandes factores en la selección última de la biota de los humedales. La hidrología es probablemente el determinante más simple del establecimiento y mantenimiento de los tipos específicos de procesos en humedales. El entendimiento de la hidrología es el repertorio básico de la ciencia de los humedales.

La mayoría de humedales se forman en suelos con baja permeabilidad, de tal forma que la mayor cantidad de agua almacenada en el mismo se debe a la escorrentía superficial de la cuenca de drenaje, con pérdidas que ocurren solo a través de la evapotranspiración y algunas salidas superficiales.

Cuando la tasa de precipitación en una región determinada es mayor que la tasa de evaporación también se presentan condiciones propicias para la formación de humedales. No obstante y como sucede en el humedal Laguna de Sonso, la tasa de precipitación anual es menor que la tasa de evaporación, lo cual indica que este cuerpo hídrico tiene otra dinámica de formación hidrológica.

La recarga de aguas subterráneas resulta cuando el nivel del humedal es mucho más bajo hidrológicamente que el nivel freático que lo rodea (a esto se le llama manantial). El monitoreo de niveles Piezométricos alrededor de la Laguna de Sonso ha permitido evidenciar que un gran porcentaje de los pozos de observación registran niveles freáticos superiores a los niveles de la Laguna, ratificando la hipótesis de la descarga desde el acuífero hacia la Laguna.

De acuerdo a la clasificación de Mitsch y Gosselink (1993) el humedal Laguna de Sonso se puede catalogar como un "Ground Water Slope Wetland", que se caracteriza por encontrarse entre un área de topografía inclinada y una zona de drenaje natural.

El hidropereodo en este tipo de humedales está influenciado en gran medida por la precipitación y escorrentía proveniente de las cotas topográficas más altas y por los patrones estacionales del cuerpo de agua adyacente.

De igual forma, el humedal Laguna de Sonso se clasifica según la convención Ramsar como: “un humedal de fondo de valle en contacto directo con el acuífero subyacente. Entradas con dominio de aguas de desbordamiento y descarga de aguas subterráneas cuando el nivel de éstas es alto, complementadas con escorrentía y precipitación. Salidas por recarga de aguas subterráneas (cuando el nivel está bajo, drenaje, desagüe de superficie y evaporación⁴” ver Figura No. 4.

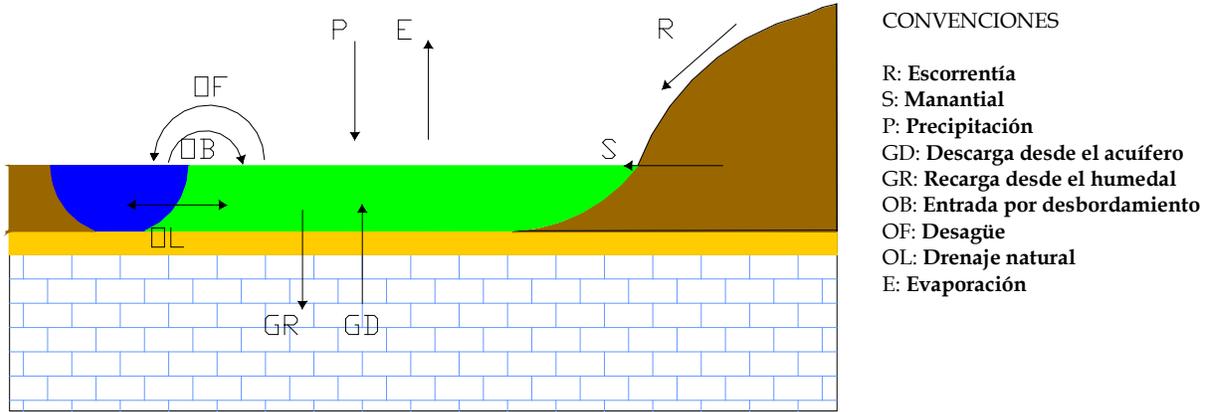


Figura No. 4. Humedal de fondo de valle en contacto con el acuífero adyacente. Modificado de lineamientos para el manejo de las aguas subterráneas. Ramsar, 2007.

3.2 LA RELEVANCIA DE LOS FLUJOS LOCALES EN LA ECOHIDROLOGIA DE HUMEDALES

La hidrología es el factor más importante para el mantenimiento, estructura y funcionamiento de los humedales (Mitsch y Gosselink citado por Hernández 2005). El hidropériodo o la hidrología propia del humedal, es el resultado del balance entre las entradas y las salidas de agua (ver Figura No. 5), el contorno del suelo en el humedal y las condiciones subsuperficiales.

La precipitación, las entradas y las salidas de agua superficial, el intercambio subterráneo y la evapotranspiración son los factores que mayor influencia tienen en la hidrología de los humedales (Hernández 2005).

⁴ Secretaría de la convención Ramsar, 2007. El manejo de las aguas subterráneas: Lineamientos para el manejo de las aguas subterráneas a fin de mantener las características ecológicas de los humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 3ª edición, vol. 9. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).

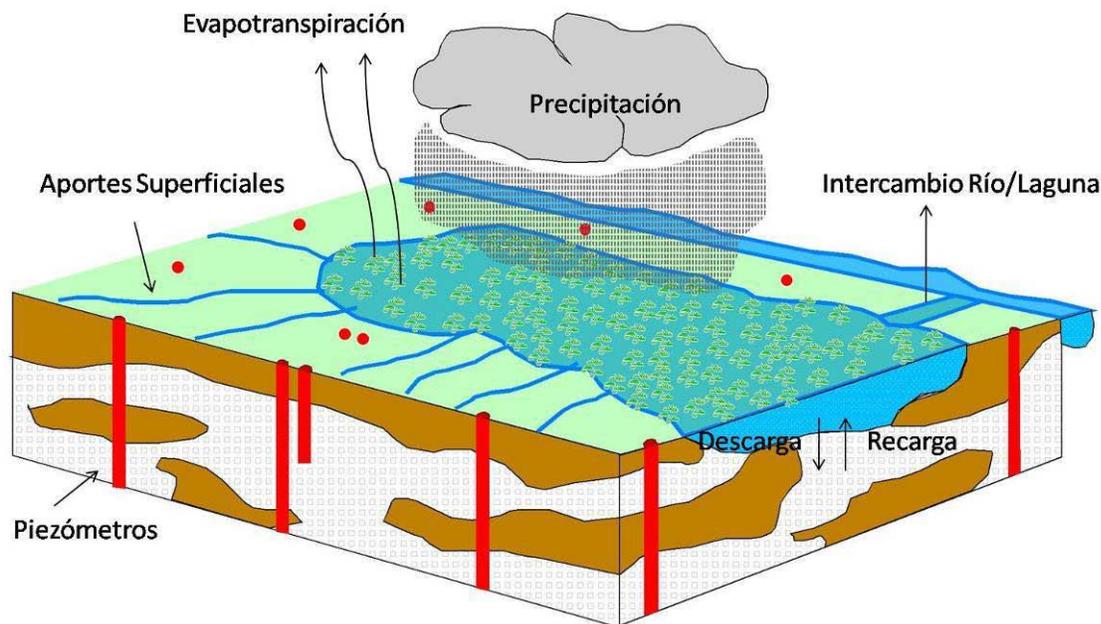


Figura No. 5. Esquema de balance hídrico en un humedal

El balance de las entradas y las salidas de agua a través de un humedal define la cantidad de agua almacenada en el humedal. Las fluctuaciones en los niveles de agua están asociadas a la morfología del humedal y al régimen hidrológico de la cuenca, así como a las condiciones estacionales, frecuencia y duración de las inundaciones del suelo (hidroperíodos del humedal).

Las aguas subterráneas y las aguas superficiales no son componentes aislados en los sistemas hidrológicos, por el contrario interactúan en una gran variedad de fisiografías, paisajes y climas. De igual forma los impactos o contaminación en uno de ellos afecta también al otro. De tal forma, es necesario el buen entendimiento de los principios básicos de la interacción entre aguas subterráneas y superficiales para un manejo efectivo de los recursos hídricos (Sophocleus 2000).

Muchos humedales de todo el mundo están estrechamente asociados con las aguas subterráneas. Por ejemplo, un humedal puede depender del caudal procedente de un acuífero que le sirva de fuente de alimentación de agua, o bien la filtración hacia abajo del agua del humedal puede recargar un acuífero. En tales casos, la hidrología del acuífero y la salud del ecosistema de humedal están íntimamente conectados. Es importante tener en cuenta que esta relación puede verse alterada por cambios en el acuífero, como la extracción de aguas freáticas, o en el humedal, por ejemplo por disminución de la inundación natural de los humedales que cubren los acuíferos (Ramsar, 2007).

3.3 EFECTOS DE LA ALTERACIÓN DE LOS FLUJOS LOCALES

La declinación de los niveles de las aguas subterráneas alrededor de pozos de bombeo cerca a cuerpos de agua superficiales crea gradientes que capturan parte del ambiente de flujo de las aguas subterráneas que, sin bombeo, descargaría como flujo base a las aguas superficiales. A una tasa de bombeo lo suficientemente grande, esas declinaciones inducen a una recarga desde el cuerpo de agua superficial hasta el acuífero; en un proceso conocido como infiltración inducida o recarga inducida. La suma de estos dos efectos conduce a un agotamiento de las corrientes (Sophocleus 2000).

La cuantificación de la cantidad de infiltración inducida, la cual es función de muchos factores es una importante consideración en el uso conjuntivo del agua en tanto que la demanda se incrementa y la seguridad del suministro es amenazada por la declinación de las corrientes superficiales.

Las aguas subterráneas ascendentes constituyen una importante fuente de alimentación de algunos humedales. Es decir el acuífero descarga en el humedal. El bombeo de agua del acuífero para abastecimiento público o uso agrícola puede reducir los niveles freáticos o flujos locales. Lo que produce una reducción en la descarga de agua en el humedal y ello puede ocasionar cambios en las características ecológicas del humedal.

Muchos acuíferos de todo el mundo están siendo actualmente objeto de intensa explotación o sobreexplotación para la obtención de agua (Custodio, 2002), especialmente en México, China, Oriente Medio y España (Morris et al., 2003). Algunas formas de explotación son claramente insostenibles y han provocado la alteración del régimen hidrológico de humedales asociados con los acuíferos, así como una notable degradación de sus características ecológicas (valgan como ejemplo los humedales de Azraq, Jordania (Fariz & Hatough-Bouran, 1998) y Las Tablas de Daimiel, España (Fornés & Llamas, 2001)).

En muchos humedales, el nivel del agua depende de una combinación de precipitaciones directas, escorrentía y descarga/recarga de aguas subterráneas. A menudo las aguas subterráneas adquieren mayor importancia en la estación seca y pueden llegar a ser la única fuente de suministro de agua para el humedal. De modo que incluso pequeñas aportaciones de aguas subterráneas pueden resultar vitales para el mantenimiento de las características ecológicas del humedal (Ramsar, 2007).

3.4 ENFOQUES PARA ESTABLECER UN RÉGIMEN PIEZOMÉTRICO ECOLÓGICO

Para entender la interacción aguas subterráneas-aguas superficiales, es necesario entender el efecto que Toth (1970) denominó el “*desarrollo hidrogeológico*” en el flujo de sistemas subterráneos, que son los efectos de la topografía, geología y el clima. Las diferencias en la topografía superficial son a menudo reflejadas por las diferencias de potencial. Tal como Hubbert (1940) mostró, dada una tasa de precipitación e infiltración distribuida uniformemente sobre una superficie ondulada, el sistema de flujo subterráneo se desarrollara conducido por la superficie freática que es una réplica de la superficie del terreno.

Las aguas subterráneas se mueven a lo largo de líneas de movimiento que están organizadas en el espacio y forman un sistema de flujo. En la naturaleza, el flujo dominante de una región con topografía irregular contiene sistemas de flujo múltiple o de diferentes órdenes de magnitud. Basado en su posición relativa Toth (1963) reconoce tres tipos distintos de sistemas de flujo -local, intermedio y regional (ver Figura No. 6), los cuales se pueden superponer uno sobre otro como base de flujo subterráneo. El agua en un flujo local se encuentra cercano a una zona de descarga como en un humedal o en una corriente. El agua en los flujos regionales recorre grandes distancias y a menudo descarga en grandes ríos o lagos o al océano.

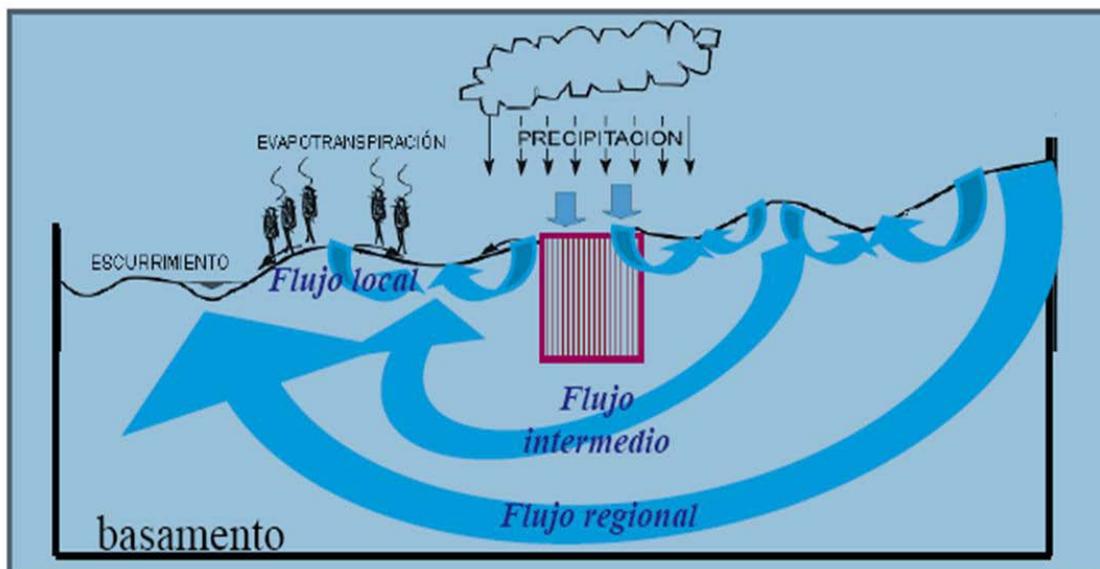


Figura No. 6. Diagrama de sistemas de flujo. Tomado de Rodríguez 2010.

Entre los aportes de agua a los humedales figuran a menudo las aguas de escorrentía y la afluencia de aguas subterráneas, especialmente de flujos locales. Por consiguiente, para asegurar la aportación efectiva del agua asignada a un humedal será necesario el manejo integrado de los recursos asociados de aguas superficiales y aguas subterráneas. Esto exigirá a su vez un correcto conocimiento cuantitativo de los orígenes (superficiales y/o subterráneos), las trayectorias y la variabilidad de las corrientes de agua que entran y salen del humedal, a fin de elaborar estrategias para la extracción de agua que reduzcan al mínimo o impidan niveles inaceptables de cambio en las características ecológicas del humedal.

En otras palabras, se debe garantizar que las extracciones de aguas subterráneas no excedan la tasa de recuperación de los niveles ecológicos del acuífero y en particular los niveles de los flujos locales, pues son estos los que están en estrecha relación con los niveles base de los ríos y humedales.

4. MODELO CONCEPTUAL Y DE FLUJO

La ubicación, construcción y nivelación topográfica de los piezómetros se presentan en el Anexo A del Volumen II.

4.1 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

La caracterización hidroquímica para el sistema hidrológico humedal Laguna de Sonso, fue realizada con datos de cuatro campañas mensuales realizadas de Agosto a Noviembre del año 2009. Este periodo hidrológico no mostró variaciones significativas en el régimen de precipitaciones, no obstante para la comprensión del comportamiento del sistema hidrológico en periodo de estiaje, los datos obtenidos son suficientes. El muestreo se realizó en tres puntos del acuífero adyacente (ver Foto No. 1), tres puntos de la Laguna de Sonso (ver Foto No. 2), dos puntos sobre el Río Cauca (ver Foto No. 3) y en los Ríos Sonso y Guadalajara (ver Foto No. 4), la ubicación de los puntos mencionados se presenta en la Figura No. 7. La clasificación se realizó utilizando los diagramas de Piper y de Schkoeller (Easy Quim, Vásquez, 1999), los cuales permiten visualizar su composición (aniones y cationes) e identificar las diferencias existes entre ellas.



Foto No. 1. Muestreo en acuíferos



Foto No. 2. Muestreo en laguna de sonso



Foto No. 3. Muestreo en río Cauca



Foto No. 4. Muestreo en río Guadalajara

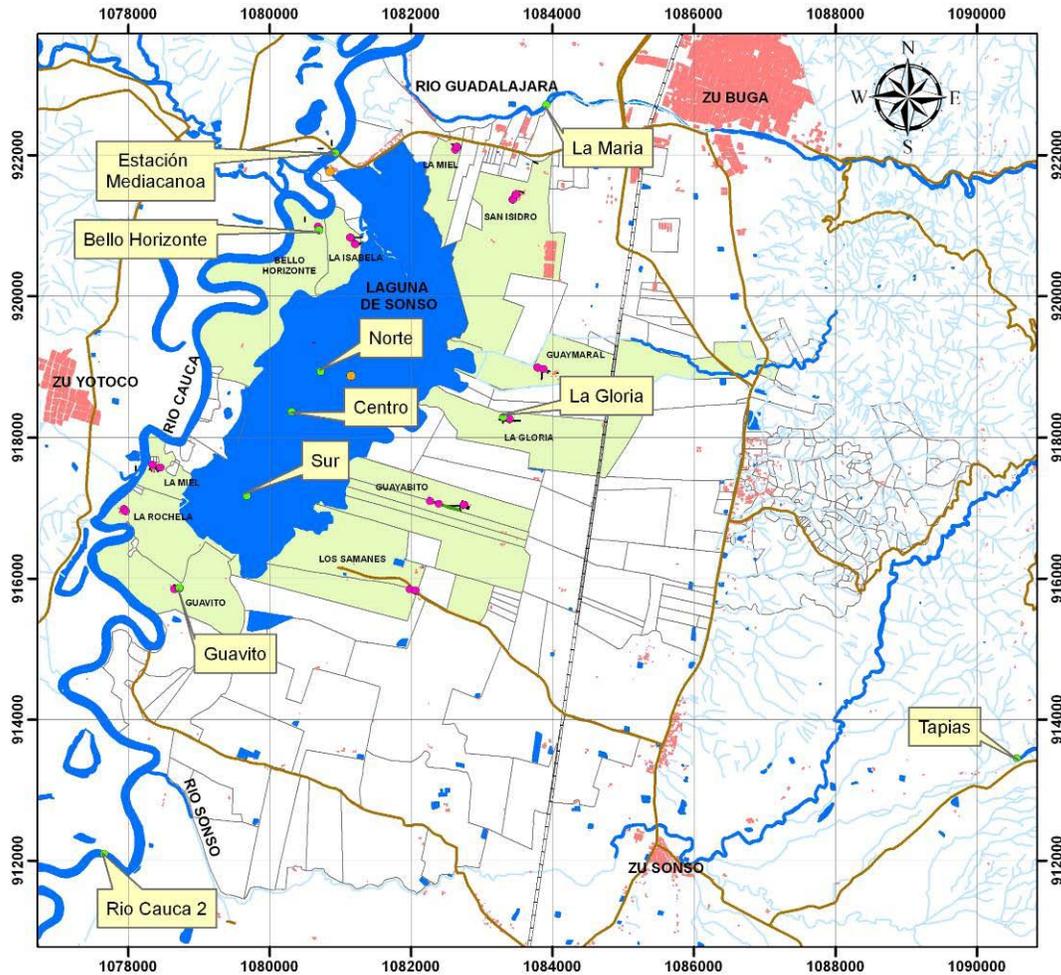


Figura No. 7. Ubicación de puntos de monitoreo para análisis hidroquímico.

4.1.1 Evolución Geoquímica en el Acuífero

Para lograr validar un modelo de flujo de aguas subterráneas con base a los resultados hidroquímicos, se requiere conocer los posibles efectos de los aportes de sales del medio que las contiene. De igual forma y cuando la información se encuentra disponible, se debe evaluar la composición química de las aguas de riego y de las lluvias locales. En este trabajo sólo se analiza los cuerpos de agua superficial y subterráneo del hidrosistema.

En la zona de estudio se tienen medias anuales de evaporación (1300 mm/año) que son superiores a las medias anuales de precipitación (947 mm/año), adicionalmente; suelen presentarse intensidades de lluvia mayores a la velocidad de infiltración de los suelos; esto favorece la recarga del acuífero en ciertos sectores y por tanto no se producirá lavado de sales desde los horizontes superiores⁵.

También Sucede que el nivel freático en inmediaciones de la Laguna de Sonso se encuentra muy cercano a la superficie y el agua de la zona saturada puede ser evapotranspirada por

⁵ E. Custodio & M.R. Llamas, Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona España 2001.

algunas especies vegetales de raíz profunda en ciertas épocas del año ocasionando una succión de las sales contenidas en el agua subterránea.

De acuerdo al análisis hidroquímico se puede observar dos zonas con altos contenidos de sales a saber; la Hacienda La Gloria y la Hacienda El Guabito siendo la primera de ellas la de mayor concentración.

En primera instancia el alto contenido de sales puede indicar la cabeza de un gradiente de flujo, esto es; por ley de flujo de concentraciones y por la tendencia en la evolución geoquímica de las aguas (Cheboratev 1955), ver Figura No. 8.

No obstante es importante conocer el contexto del medio de flujo para lograr inferir que los resultados son coherentes con la condición natural del terreno y que no están necesariamente influenciados por los aportes externos.



Figura No. 8. Evolución Geoquímica según Cheboratev.

Según Custodio y Llamas (2001) la alta presencia de ciertos iones se observa en medios donde el agua se encuentra en contacto con materia orgánica y tiene la posibilidad de disolver anhídrido carbónico y ácidos húmicos que le dan al agua cierto grado de acidez capaz de atacar los componentes del suelo tomando de ellos productos solubles y dejando un producto insoluble que se acumula en el suelo.

La Tabla No. 1 permite observar los tipos de suelos en la zona de estudio en donde se realizaron los muestreos con el objeto de verificar el comportamiento de la hidroquímica en relación con la matriz de suelo contenedora.

Obsérvese que el tipo de suelo presente en la Hacienda La Gloria es un Vertisol de la consociación Burrogá el cuál se caracteriza por altas presencia de Sodio. La Hacienda El Guabito también se encuentra en la misma posición geomorfológica, pero es de orden Inceptisol, no presenta afectación por sodio. La Hacienda Bello Horizonte se localiza en una llanura aluvial del Río Cauca, es de orden Mollisol y se diferencia de los otros puntos en que presenta una mejor permeabilidad.

Lo anterior indica que debido al mismo orden de suelo presente en las Haciendas La Gloria y El Guabito es factible que esos dos puntos muestren un comportamiento similar. La alta presencia de sodio en la Hacienda La Gloria puede arrojar resultados de conductividad Eléctrica elevados

Tabla No. 1. Tipos de suelo en relación a los puntos de muestreo.

Posición Geomorfológica	Ubicación	Conjuntos	Orden	Asociaciones*	Punto de Muestreo
Llanura Aluvial del Río Cauca	Dique del Río Cauca	RC	Mollisol	RCa	Hacienda Bello Horizonte
Planicie Lacustre	Cubetas Lacustres	BU	Vertisol	BUaNa	Hacienda La Gloria
		BU-PU	Inceptisol	(BU-PO) _a	Hacienda El Guabito

Modificado de Hernández 2005.

Nota: *Los conjuntos y asociaciones -unidades donde aparecen dos suelos- se identifican por letras mayúsculas, acompañadas por letras minúsculas y/o mayúsculas que determinan las fases: "a" = pendiente de terreno entre 0 y 3%; "Na" = suelo afectado por Sodio.

En la Figura No. 9 se puede observar la distribución espacial de los principales tipos de suelos alrededor de la Laguna de Sonso, así como la ubicación de los piezómetros y los puntos de muestreo.

4.1.2 Resultados

En general los resultados obtenidos para cada una de las cuatro campañas, muestra que en el hidrosistema Humedal Laguna de Sonso se presenta agua tipo Bicarbonatada Cálculo-Magnésica, con excepción del agua analizada de los Ríos Guadalajara y Sonso que se clasifica como agua tipo Bicarbonatada Cálculo y el agua analizada del acuífero al Sur de la Laguna en la Hacienda El Guabito que se clasifica como agua tipo Bicarbonatada Magnésica.

Los pozos de monitoreo localizados en las Haciendas La Gloria (Oriente) y El Guabito (Sur), mostraron las concentraciones más altas de cada uno de los iones analizados, encontrándose el mayor contenido de Sodio en el pozo de monitoreo de la Hacienda La Gloria. El análisis hidroquímico para cada campaña en este punto clasifica esta agua como Bicarbonatada Sódica.



Figura No. 9. Principales Tipos de Suelos en la Laguna de Sonso

En el pozo de monitoreo de la Hda. Bello Horizonte, ubicado al noroeste de la Laguna entre el Río Cauca y la Laguna de Sonso, se encontró concentraciones iónicas similares a las concentraciones de la Laguna en sus tres puntos de muestreo.

La diferencia en la composición del agua entre los distintos puntos de muestreo se observa principalmente en los Bicarbonatos y Sulfatos, en donde claramente se evidencia que las muestras de agua se distribuyen en tres grupos, siendo estos las aguas superficiales (Ríos Cauca, Sonso y Guadalajara) registrando las concentraciones más bajas; los pozos de monitoreo en el acuífero con los contenidos más altos y el agua de la Laguna, con concentraciones promedio.

En el anexo B del Volumen II se puede verificar los análisis de Scholler y Piper para cada una de las campañas de muestreo.

4.1.3 Calidad de los Datos

Los datos obtenidos fueron analizados por DBO Ingeniería (campaña de Agosto) y el Laboratorio de aguas de la CVC (campañas de Septiembre, Octubre y Noviembre de 2009) quienes realizan procedimientos certificados por el Ideam. De igual manera el protocolo de muestreo fue claramente definido por cada laboratorio según estándares del Ideam (2005) para la toma de las muestras, correcto almacenamiento y cadena de custodia.

En la Tabla No. 2 se presentan los resultados de los análisis hidroquímicos de las cuatro campañas. La primera campaña no cuenta con datos de cationes y a las muestras de la campaña cuatro no fue posible realizarle análisis de Carbono Orgánico Total.

El anexo C contienen los estadísticos básicos de cada parámetro diferenciados por tipo de cuerpo de agua. Estos permiten observar que las medias de conductividad eléctrica y la mayoría de cationes es siempre mayor en las aguas subterráneas, seguida por las medias de las aguas de la Laguna y con los valores más bajos del grupo las aguas correspondientes a los Ríos Cauca, Guadalajara y Sonso. Los valores más ácidos de pH se presentan en las aguas subterráneas y los más básicos son los de la Laguna. Los Ríos manejan un término medio entre los dos anteriores.

Tabla No. 2. Resultados de análisis hidroquímicos de las cuatro campañas de muestreo.

ESTACIÓN	PARAMETROS (mg/l)													
	pH	CE(μS/cm)	CaCO3	HCO3	COT	SO4	CL-	NO3	Ca	Mg	Fe	Na	K	
RIO CAUCA - AGUAS ARRIBA	7.9	202.7	0	60.4	<3	22.7	10.6	1.2						
RIO CAUCA - MEDIACANOA	7.7	180.1	0	50.3	5.56	21.7	10.1	1.2						
RIO SONSO	8.5	181.7	7.06	75	6.86	<5	3.33	0.62						
RIO GUADALAJARA														
LAGUNA DE SONSO -SUR	8.4	39.8	39.8	247.6	6.85	<5	6.66	0.91						
LAGUNA DE SONSO - CENTRO	8.5	46.8	46.8	15.4	15.4	<5	8.93	0.62						
LAGUNA DE SONSO -NORTE	8.5	32.6	32.6	235.1	16.38	<5	6.81	1.88						
ACUIFERO - BELLO HORIZONTE	8.4	439.7	0	214.4	10.4	<5	13.9	0.74						
ACUIFERO - LA GLORIA	8.3	1120	34.4	508.2	<3	47.5	38.3	0.85						
ACUIFERO - EL GUABITO	8.7	920.3	27.4	449.2	<3	89.9	8.48	0.74						
	pH	CE(μS/cm)	CaCO3	HCO3	COT	SO4	CL-	NO3	Ca	Mg	Fe	Na	K	
RIO CAUCA - AGUAS ARRIBA	7.5	197	0	66.9	<3	22.8	11.6	0.219	14.4	1.78	1.8	15.3	2.32	
RIO CAUCA - MEDIACANOA	7.36	192	0	66.8	<3	22.5	9.94	1.141	14.4	8.75	1.59	14.6	2.38	
RIO SONSO	8.24	175	0	106	10.8	5.93	<2.23	1.137	20	10.2	<0.477	8.1	0.894	
RIO GUADALAJARA	8.97	149	18	63.6	<3	5.21	<2.33	0.499	11.2	10.2	0.935	7.95	0.908	
LAGUNA DE SONSO -SUR	8.44	560	11.9	284	63.3	25.2	7.02	1.838	52.1	33.6	8.57	29.5	2.13	
LAGUNA DE SONSO - CENTRO	8.63	568	24.1	275	4.17	24.9	6.31	1.078	52.1	38.9	5.79	28.9	1.87	
LAGUNA DE SONSO -NORTE	8.47	569	12.5	280	5.61	23.9	6.25	1.602	44.9	40.4	4.53	29.3	1.55	
ACUIFERO - BELLO HORIZONTE	7.21	495	0	295	<3	9.81	11.3	interferencia por color	43.3	24.3	24.8	29	5.97	
ACUIFERO - LA GLORIA	7.59	1454	0	830	75.9	144	23.9	4.461	46.5	105	65.8	193.7	2.47	
ACUIFERO - EL GUABITO	7.48	1081	0	596	<3	86.2	30.5	1.411	98.6	91.9	4.46	19.5	1.75	
	pH	CE(μS/cm)	CaCO3	HCO3	COT	SO4	CL-	NO3	Ca	Mg	Fe	Na	K	
RIO CAUCA - AGUAS ARRIBA	7.71	199	0	68	<3	25	12.2	0.224	15.2	6.32	1.28	11.8	2.76	
RIO CAUCA - MEDIACANOA	7.82	215	0	71	<3	27.6	2.6	0.513	18.4	5.83	1.38	13.1	2.75	
RIO SONSO	8.46	195	3.4	76.6	<3	5.62	2.43	<0.114	18.4	6.81	1.21	5.16	0.979	
RIO GUADALAJARA	8.8	139	7.98	64.2	<3	5.74	2.8	0.348	18.4	4.86	1.01	6.57	1.05	
LAGUNA DE SONSO -SUR	8.32	570	0	328	4.22	18.9	11	<0.114	48.1	36.5	2.53	24.7	2	
LAGUNA DE SONSO - CENTRO	8.47	560	13.7	258	6.43	20.7	10.4	0.874	48.9	34.5	2.88	23.5	2.08	
LAGUNA DE SONSO -NORTE	8.38	555	0	335	5.84	20.3	10.4	0.564	50.5	33.1	2.69	23.6	1.68	
ACUIFERO - BELLO HORIZONTE	7.4	505	0	314	<3	<5	12	2.906	46.5	25.8	21.5	23.3	4.93	
ACUIFERO - LA GLORIA	7.72	1107	0	670	<3	65.6	11.6	1.328	30.5	56.4	2.7	130	0.65	
ACUIFERO - EL GUABITO	7.63	1069	0	577	<3	81.8	30.3	<0.114	94.6	81.2	9.62	16.2	2.04	
	pH	CE(μS/cm)	CaCO3	HCO3	COT	SO4	CL-	NO3	Ca	Mg	Fe	Na	K	
RIO CAUCA - AGUAS ARRIBA	7.67	167	0	56.3		23.6	10.2	1.261	15.2	7.29	5.55	8.56	2.45	
RIO CAUCA - MEDIACANOA	7.64	183	0	61.1		24.8	10.4	0.651	18.4	6.81	4.3	9.26	2.51	
RIO SONSO	8.5	141	21	76.1		<5	3.39	0.351	16.8	7.78	0.987	4.13	1.00	
RIO GUADALAJARA	8.62	159	31.5	39.3		5.98	4.19	0.549	17.6	8.75	<0.477	6.28	1.02	
LAGUNA DE SONSO -SUR	8.55	588	21	289		20.4	11.8	0.783	52.1	37.9	1.81	23.4	1.87	
LAGUNA DE SONSO - CENTRO	8.57	580	12	274		20.5	13.9	1.097	34.5	48.6	2.27	23.4	1.83	
LAGUNA DE SONSO -NORTE	8.47	574	0	359		18.7	14	0.735	44.9	38.9	3.97	24.2	1.83	
ACUIFERO - BELLO HORIZONTE	7.51	495	0	303		<5	12.3	1.035	47.3	20.9	17.9	19.8	4.44	
ACUIFERO - LA GLORIA	7.95	1089	0	704		46.4	14.6	<0.114	34.5	61.3	10.6	119	0.858	
ACUIFERO - EL GUABITO	7.81	1049	0	604		83.6	28.2	5.16	74.6	108	5.95	14.9	1.7	

Como una medida de la calidad de los análisis de laboratorio se recomienda realizar el balance iónico para iones mayores, de aquí se establece que la suma de mili equivalentes debe ser igual, con un margen de error permitido, a la suma de mili equivalentes de cationes⁶. Como indicador de calidad para el balance iónico se acepta un rango menor a 0.05 (5%). La expresión que permite hacer este análisis es:

$$B.I. = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}}$$

De igual forma, existen otras metodologías para determinar si los datos analizados presentan inconsistencias; entre ellos se puede resaltar la relación sodio/potasio, como rango de aceptación se acepta un valor menor a 0.2 (20%), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Relación} = \frac{K^+}{Na^+ + K^+}$$

En la Tabla No. 3 se relaciona los índices de balance Iónico y de sodio/potasio para cada una de las campañas de muestreo. En ellas se puede apreciar que la única excepción al rango permitido se presenta en el Río Cauca para la campaña de Noviembre la cuál excede el rango permisivo de sodio/potasio.

Tabla No. 3. Relación Balance Iónico y de Relación Potasio/Sodio.

ESTACION	Sep 29 de 2009		Oct 29 de 2009		Nov 26 de 2009	
	Balance Ionico	Relación Na/K	Balance Ionico	Relación Na/K	Balance Ionico	Relación Na/K
RIO CAUCA - AGUAS ARRIBA	-0.5	13.2	-0.5	19.0	-0.4	22.3
RIO CAUCA - MEDIACANOA	-0.4	14.0	-0.5	17.4	-0.4	21.3
RIO SONSO	-0.6	9.9	-0.5	15.9	-0.6	19.5
RIO GUADALAJARA	-0.1	10.3	-0.1	13.8	-0.1	14.0
LAGUNA DE SONSO -SUR	-0.4	6.7	-0.6	7.5	-0.5	7.4
LAGUNA DE SONSO - CENTRO	-0.5	6.1	-0.4	8.1	-0.4	7.3
LAGUNA DE SONSO -NORTE	-0.5	5.0	-0.6	6.6	-0.7	7.0
ACUIFERO - BELLO HORIZONTE	-0.1	17.1	-0.2	17.5	-0.2	18.3
ACUIFERO - LA GLORIA	-0.6	1.3	-0.6	0.5	-0.6	0.7
ACUIFERO - EL GUABITO	-0.5	8.2	-0.5	11.2	-0.6	10.2

Es importante resaltar que las aguas del Río Cauca describen un comportamiento no estacionario y que la concentración iónica es variable en el tiempo y en el espacio debido a las descargas de contaminantes a lo largo de su recorrido.

De igual forma no se debe desestimar los aportes de concentraciones de sales adicionales al acuífero en lugares donde se aplican fertilizantes y madurantes; esto puede hacer que ciertos iones como los fosfatos, nitratos entre otros alteren la composición natural de los suelos.

⁶ D. Santa. Identificación de interacciones hidrológicas entre el humedal Ciénaga Colombia y el acuífero libre del bajo Cauca Antioqueño. Universidad de Antioquia, Medellín 2009.

4.1.4 Gradientes de flujo

Según los resultados obtenidos de los análisis hidroquímicos y de acuerdo al gradiente de evolución hidrogeoquímica planteado por Cheboratev, se puede estimar un gradiente de flujo proveniente desde el sector Oriental y desde el sector Sur de la Laguna, para el caso específico de la conductividad eléctrica y de la concentración de bicarbonatos en los puntos de muestreo, se tiene una coherencia con la conformación litológica en lo que respecta a las aguas subterráneas.

Para cada período de muestreo no se presentó una variación significativa en la concentración de los iones mencionados, para el caso de la Hacienda La Gloria las concentraciones de la mayoría de los iones analizados siempre fue muy superior que en el resto de puntos muestreados.

En general las aguas de circulación regional tienden a ir aumentando su mineralización hasta irse saturando en los diferentes iones. En primera aproximación, entre los aniones primero satura al ion HCO_3^- , incluso ya desde la infiltración y más tarde SO_4 , el ion cloruro no llega a saturar naturalmente. Entre los cationes primero satura el ion calcio, más difícilmente el magnesio y el ion sodio no llega a saturar normalmente. Por estos procesos el agua puede adquirir una composición muy diferente de la roca por la que circula, tanto más cuanto más se aleja del lugar de infiltración.

Contenidos muy bajos en ion cloruro y ricas en otras sales solubles pueden dar origen a aguas predominantemente cloruradas si ha transcurrido el tiempo suficiente como para ir tomando a lo largo del recorrido esas pequeñas cantidades mientras los otros aniones permanecen casi constantes por estar saturados.

Se supone que en el agua infiltrada dominan los iones HCO_3^- y Ca^{++} , lo cual puede no ser cierto y entonces puede empezarse la secuencia en un lugar más avanzado o sufrir un retroceso para luego tomar la evolución normal.

Con frecuencia las aguas de circulación local apenas interaccionan con el terreno y mantienen la configuración adquirida durante la infiltración, salvo que se produzca concentración por evaporación en zonas muy próximas a la superficie, a menos que se encuentren terrenos que pueden aportar sales con gran facilidad, o se mezclen con aguas más profundas⁷.

En las figuras No. 10 y 11 se puede observar los gradientes de flujo en términos del análisis de conductividades eléctricas y concentraciones de bicarbonatos para la zona de estudio.

⁷ Ídem 2.

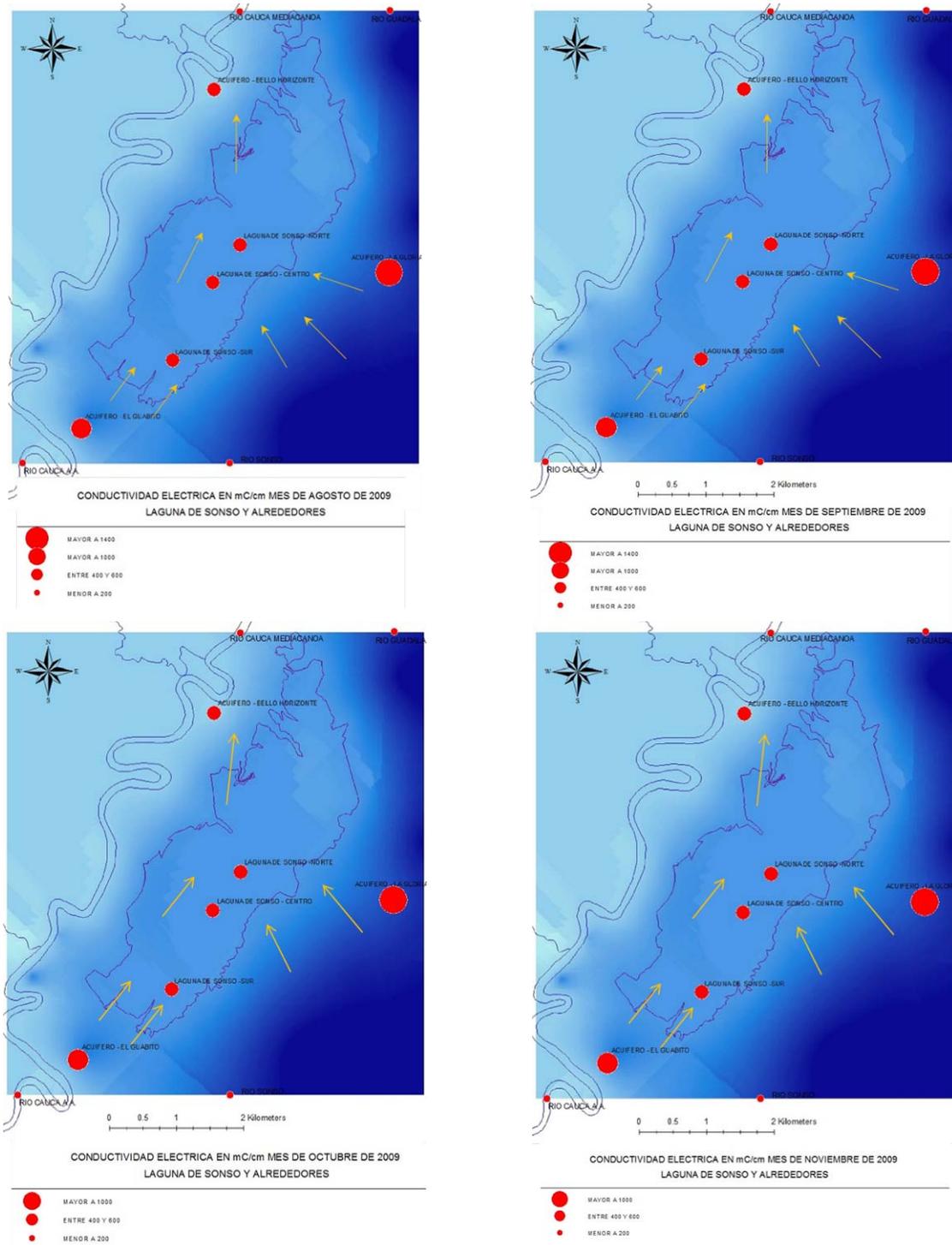


Figura No. 10. Gradiente de de flujo según Conductividad Eléctrica.

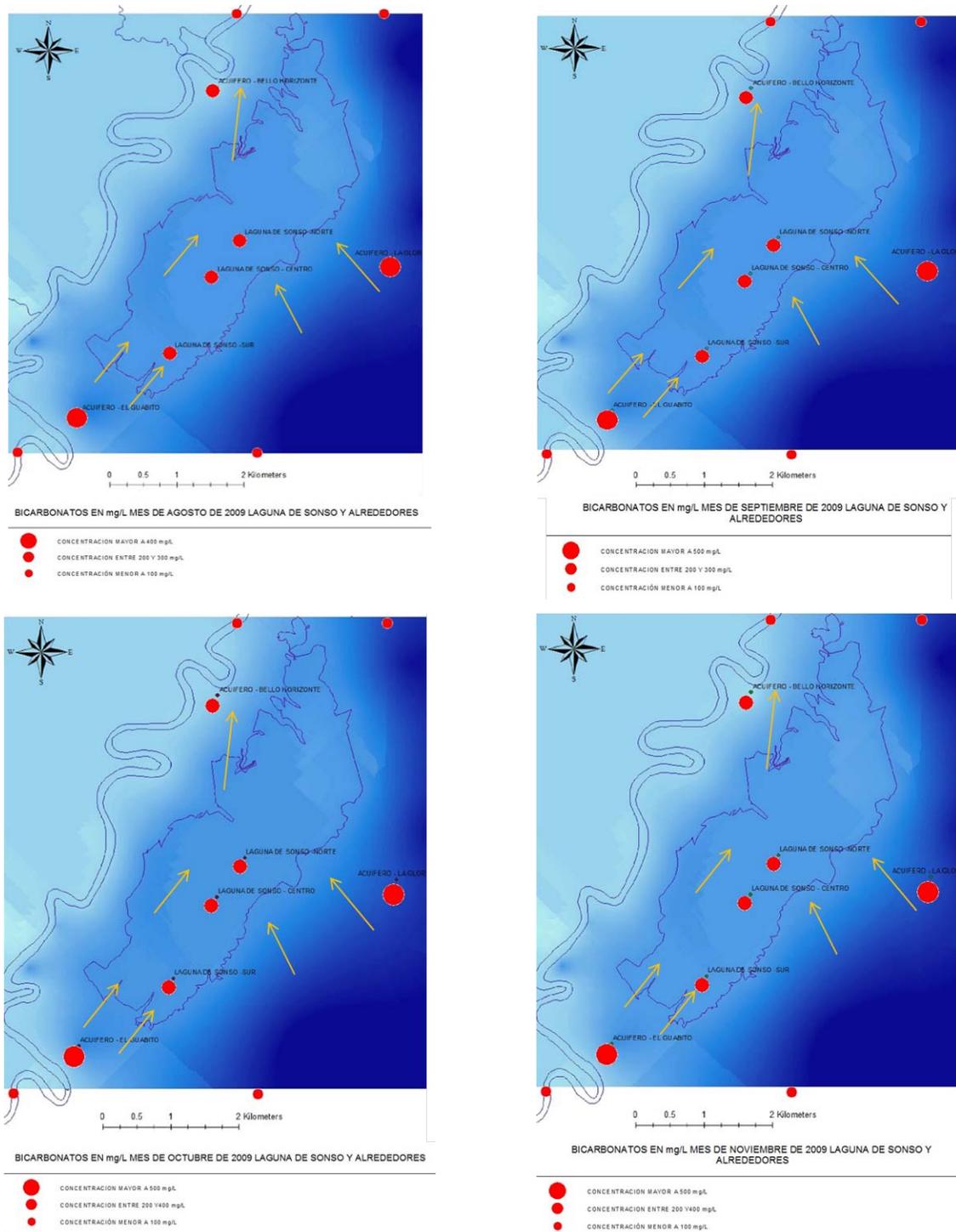


Figura No. 11. Gradiente de de flujo según concentración de Bicarbonatos.

4.2 CARACTERIZACIÓN ISOTOPICA

Aunque todos los elementos que se presentan en los sistemas hidrogeológicos tienen varios isótopos, sólo algunos de ellos son de importancia práctica para la hidrogeología. El término ambiental hace referencia a los isótopos presentes en la naturaleza como resultado de procesos naturales o por actividades antrópicas y que se presentan en gran abundancia, entre ellos encontramos: H, C, N, O y S. Éstos son elementos principales de nuestros sistemas hidrológicos y biológicos. Los isótopos estables de estos elementos sirven como trazadores del agua, los nutrientes y los diversos solutos⁸.

El hidrogeno tiene tres isótopos estables (ver Figura No. 12): Hidrógeno o Protio (^1H), Deuterio (D, ^2H) y Tritio (T, ^3H). El Protio y el Deuterio son los isótopos estables y presentan una abundancia natural del 99.985% y el 0.015% respectivamente⁹.



Figura No. 12. Isótopos del hidrogeno (las esferas rojas representan los protones, las grises los neutrones)

El tritio es el isótopo radioactivo del hidrógeno, su periodo de semidesintegración es de 12.32 años. Después de su formación natural (en la atmósfera) o artificial (ensayos termonucleares o industriales) el tritio se oxida (HTO) y entra a formar parte del ciclo del agua. Su distribución en la precipitación está condicionada por la altitud, proximidad al mar y distancia a fuentes naturales o artificiales. Estos factores, junto a su desintegración radioactiva, permiten utilizar los contenidos de tritio como indicadores de la presencia de aguas recientes en los acuíferos y determinar, bajo ciertas condiciones, zonas de recarga preferente.

4.2.1 Los Isótopos y el Ciclo Hidrológico

Cuando se evapora agua de mar, gran parte del vapor marino se mueve hacia mayores latitudes y altitudes, a partir de los principales nucleídos del hidrogeno y del oxígeno se forman diferentes moléculas de agua, que luego se enfría, desciende y se condensa, para posteriormente precipitar parte en los océanos y parte en los continentes en donde forma diferentes formas de agua superficial y subterránea¹⁰.

Cada vez que se presenta un cambio de fase (Vapor-líquido, líquido-sólido, líquido-vapor), se produce un cambio (fraccionamiento) en la concentración relativa de los diferentes isótopos

⁸ R. Rhenals. Validación del modelo hidrogeológico del Occidente Antioqueño mediante técnicas isotópicas e hidroquímicas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2009.

⁹ Idem.

¹⁰ Ibid.

que integran la molécula del agua. También hay un fraccionamiento en el contenido isotópico cuando el agua entra en contacto con materiales de contenido isotópico diferente (intercambio). Estos procesos dependen básicamente de las condiciones ambientales (temperatura y presión) a la cual se presentan.

La Tabla No. 4 permite observar los resultados de los análisis obtenidos de los isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$, δD y $\delta^3\text{H}$, estos análisis fueron realizados por el laboratorio Ingeis de la Universidad de Buenos Aires Argentina.

Tabla No. 4. Resultados análisis isotópicos

ESTACION	Agosto 2009		Septiembre 2009		Octubre 2009		Concentración Unid. Tritio
	$\Delta^{18}\text{O}\%$	$\delta^2\text{H}\%$	$\Delta^{18}\text{O}\%$	$\delta^2\text{H}\%$	$\Delta^{18}\text{O}\%$	$\delta^2\text{H}\%$	
	(VSMOW)+-0,3	(VSMOW)+-0,1	(VSMOW)+-0,3	(VSMOW)+-0,1	(VSMOW)+-0,3	(VSMOW)+-0,1	
RIO CAUCA - AGUAS ARRIBA	-10.2	-70	-9.8	-67	-9.6	-67	1.7 ± 0.3
RIO CAUCA - MEDIACANOA	-10	-70	-9.7	-67	-9.6	-66	1.5 ± 0.3
RIO SONSO	-10	-67	-9.7	-67	-9.9	-67	1.8 ± 0.3
RIO GUADALAJARA			-10	-70	-10.3	-70	0.9 ± 0.2
LAGUNA DE SONSO - SUR	-6.4	-53	-3.6	-39	-4.1	-41	1.6 ± 0.3
LAGUNA DE SONSO - CENTRO	-5.9	-51	-3.7	-40	-4	-40	1.5 ± 0.3
LAGUNA DE SONSO - NORTE	-5.7	-50	-3.9	-41	-3.9	-40	1.5 ± 0.3
ACUIFERO - BELLO HORIZONTE	-10.1	-70	-10	-71	-10.3	-72	0.4 ± 0.2
ACUIFERO - LA GLORIA	-9.9	-70	-8.8	-65	-8.5	-63	0.9 ± 0.2
ACUIFERO - EL GUABITO	-9.7	-71	-9.4	-70	-9.8	-71	0.9 ± 0.2

En el anexo D se presenta los resultados de los análisis de isótopos realizados por el instituto Ingeis.

Pese a que no se tienen registros de precipitación, los datos obtenidos brindan una primera mirada a propósito del posible origen de las aguas de cada cuerpo hídrico.

Se conoce que entre más negativos sean los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , estos provienen de zonas más alejadas altitudinalmente, por tanto se puede generalizar que el agua de los Ríos Cauca, Sonso y Guadalajara, así como el agua en cada punto del acuífero provienen de precipitaciones en zonas altitudinalmente más distantes que las aguas almacenadas en la Laguna de Sonso, que muy seguramente están más estrechamente relacionadas con las precipitaciones locales.

El agua del acuífero adyacente presenta concentraciones parecidas a las concentraciones de los afluentes delimitantes de la cuenca de captación de la Laguna, esto indica que la recarga del acuífero se produce posiblemente con la precipitación en algún punto de la cuenca de los Ríos Sonso y Guadalajara.

Los muestreos realizados al Norte de la Laguna en los meses de Septiembre y Octubre muestran una similitud de las aguas del Río Guadalajara y las de la Hacienda Bello Horizonte, indicando la posibilidad que en ambos cuerpos las aguas provengan de las mismas lluvias locales, ver Figura No. 13b.

Contrario a lo que de entrada se creía acerca de los aportes de aguas subterráneas desde el Río Sonso a la Laguna, en esta fase preliminar de caracterización isotópica no se logró

establecer una conexión clara entre estos dos cuerpos de agua, ver Figura No. 13a. No obstante no se descarta que las aguas del acuífero provengan de alguna zona cercana a su cuenca de captación.

La relación del agua del Río Cauca aguas arriba (AA) y Río Cauca Mediacanoa (MED), presenta una estacionalidad interesante como se puede apreciar en las Figura No. 13c y d. en primera instancia nótese que el Río Cauca en sus dos estaciones de muestreo presento la misma concentración de ^{18}O sólo en el mes de Octubre y que en el punto de muestreo de Mediacanoa se presenta una reducción del contenido de ^{18}O en los meses de Agosto y Septiembre. Esto es particularmente interesante ya que en esos meses el punto de muestreo Mediacanoa coincide con los registros de concentración de ^{18}O del Río Sonso, ver Figura No. 13d.

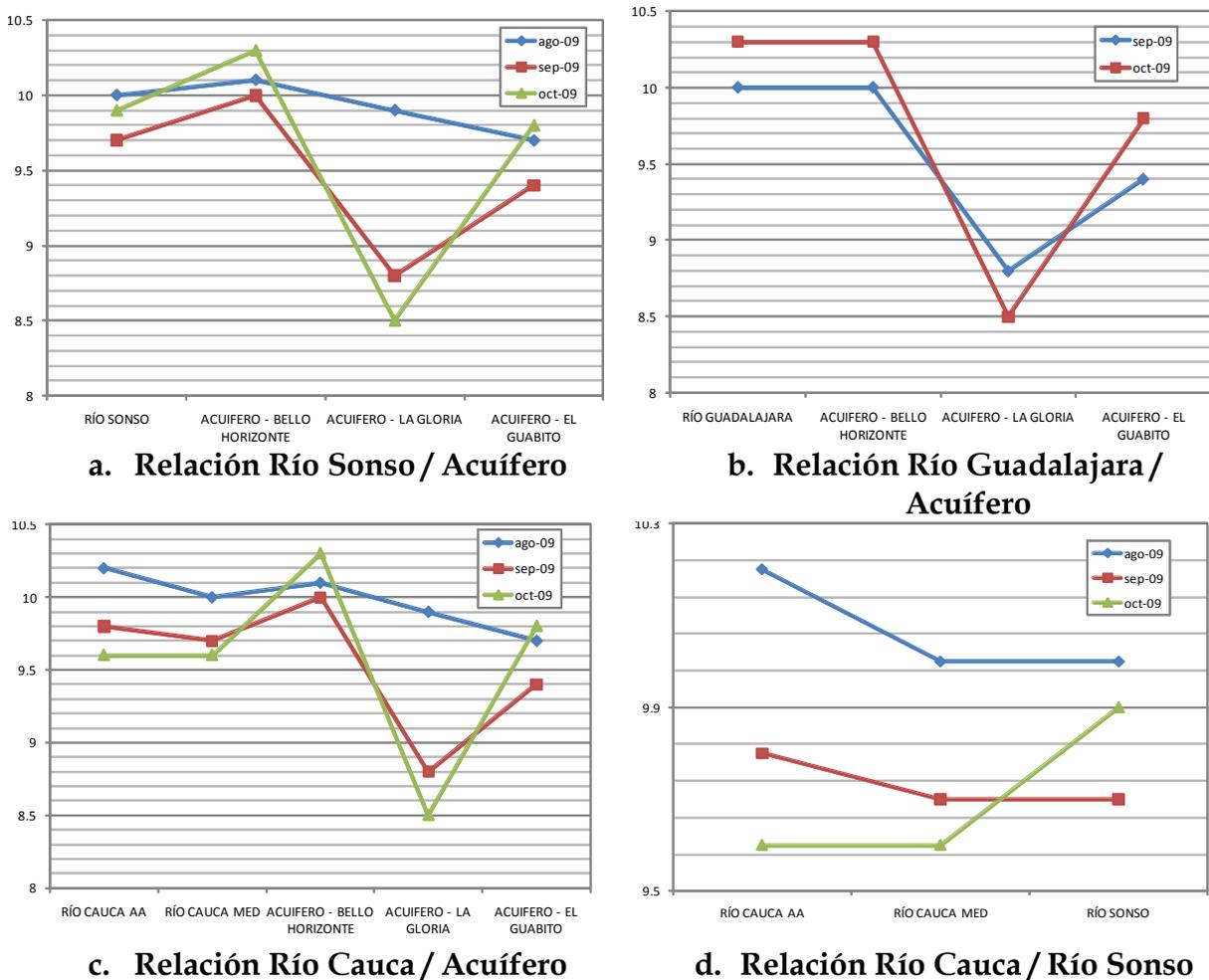


Figura No. 13. Posible conexión entre cuerpos de agua según concentración de ^{18}O .

4.2.2 Origen de las aguas monitoreadas

Los trabajos hechos en Colombia han encontrado expresiones regionales y locales para la variación del contenido isotópico con la altitud. A nivel regional se presentan tasas de

variación para $\delta^{18}\text{O}$ del orden de 0.5 unidades de δ por cada 200 m y para ^2H de 4 unidades de δ por cada 200 m (Rodríguez, 2004 citado por Renhals 2009). Localmente se han encontrado tasas de 0.3 - 0.5 unidades de δ por cada 100 m para ^{18}O y para ^2H de 2-2.5 unidades de δ por cada 100 m en Bucaramanga (Gómez y Anaya 2004, citado por Renhals). En el valle de Aburra se presentan variaciones de 0.5 unidades de δ para ^{18}O , y de 3.6 unidades de δ para ^2H por cada 100 m (Salazar 1996 citado por Renhals)¹¹. Salazar (1996) propuso las siguientes expresiones que relacionan la altitud con las concentraciones de Deuterio y Oxígeno 18:

$$\delta D = 0.016h - 36.98 \quad r^2 = 0.539$$

$$\delta^{18}\text{O} = 0.002h - 5.2 \quad r^2 = 0.591$$

Haciendo el ejercicio con los datos obtenidos para el acuífero en la hacienda La Gloria y El Guabito y para los Ríos Sonso y Guadalajara se tiene que las posibles altitudes del agua de lluvia serían:

Tabla No. 5. Posible Origen altitudinal de algunos puntos de muestreo, mes de Octubre de 2009.

Estación	Deuterio	h (msnm)	Oxígeno 18	h (msnm)
Río Sonso	-67	1876.25	-9.7	2250
Río Guadalajara	-70	2063.75	-10	2400
Acuífero Had. La Gloria	-65	1751.25	-8.8	1800
Acuífero Had. El Guabito	-70	2063.75	-9.4	2100

La Figura No. 14 muestra la línea meteórica local para el Valle del Cauca obtenida por la CVC (2005) que relaciona las desviaciones isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ y δD en la zona sur del departamento. De igual forma se presenta la línea de evaporación con los datos de cada uno de los cuerpos de agua muestreados en la campaña isotópica realizada en inmediaciones del humedal en el mes de Septiembre del 2009, el cual fue el mes más seco del periodo de muestreos. Según Santa (2009) La intersección entre las dos líneas indica que el agua superficial evaporada desde la Laguna proviene de las precipitaciones locales.

¹¹ Ibid 3.

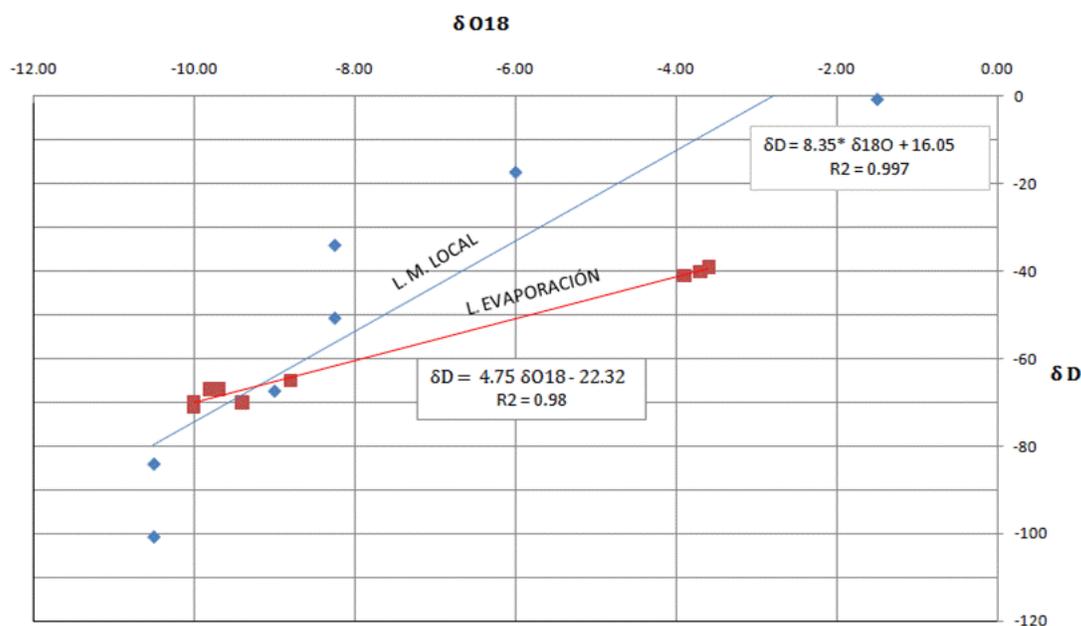


Figura No. 14. Línea Meteorica Local para el Valle del Cauca y línea de Evaporación en la Laguna de Sonso.

El grupo de muestras correspondiente al agua del acuífero y al grupo de Ríos presenta valores ponderados de $\delta D = -9.6 \text{ ‰}$ y $\delta^{18}H = -68.3 \text{ ‰}$. El grupo de muestras que corresponde a la Laguna de Sonso sector Norte, Centro y Sur presenta valores ponderados de $\delta D = -3.7 \text{ ‰}$ y $\delta^{18}H = -40 \text{ ‰}$. Ambos para el mes de Septiembre.

4.2.3 Resultados Tritio

La desintegración radioactiva ofrece la posibilidad de determinar las edades, siempre que se cumplan ciertas condiciones. Digna de mención a este respecto es la frecuente aplicación de la datación del agua subterránea, es decir, la determinación del lapso de tiempo desde que se produce la infiltración del agua, mediante la comparación de actividades de ^{14}C y 3H en una muestra de agua subterránea con aquella que proviene de la recarga¹².

De acuerdo a la caracterización isotópica realizada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC en el año 2005; se encontró la datación de las aguas subterráneas en función de la profundidad del acuífero, la Tabla No. 6 permite observar la relación de diferentes concentraciones isotópicas y su relación con la edad del agua.

Tabla No. 6. Datación de aguas subterráneas para el Valle del Cauca

Rango de 3H	Datación	Unidad Acuífera
0.9 a 2.2	< 50 años	A
0.5 a 0.8	50 - 1000 años	A
0 a 0.2	>1000 años	C

¹² Isotopos ambientales en el ciclo hidrológico. IGME. Temas: Guías y manuales. ISBN: 84-7840-465-1.

En ese orden de ideas se tiene que las aguas del acuífero en inmediaciones del Humedal Laguna de Sonso se encuentran en el rango correspondiente a la datación menor a 50 años y que corresponden a la unidad acuífera A, a excepción de los resultados obtenidos para el acuífero en la hacienda Bello Horizonte, el cual maneja una marcación isotópica de 0.4, esto ratifica el origen reciente del agua en esa zona, probablemente está relacionado con las aguas lluvias.

Para efectos de manejo integrado del recurso hídrico en esta reserva natural se debe discriminar el límite hidráulico de los flujos locales así como la proveniencia de su recarga, pues solo de esta manera se logra establecer una reglamentación en el uso de las aguas subterráneas en los pozos profundos adyacentes para evitar posibles declinaciones en el nivel freático y consecuentemente la disminución de los niveles eco hidrológicos en la Laguna.

4.3 CARACTERIZACIÓN PIEZOMETRIA

Continuando con el proceso de comprobación del modelo conceptual y de flujo, corresponde ahora hablar del funcionamiento de la piezometría alrededor del humedal Laguna de Sonso.

4.3.1 Diseño de la red de monitoreo

Para establecer cómo se comportan los niveles superiores del acuífero en inmediaciones del humedal, se procedió a localizar conjuntos de baterías de piezómetros en el perímetro de la Laguna. En total se ubicaron 40 elementos en 10 predios distintos. El criterio que se tuvo en cuenta para la construcción de estos elementos fue el establecido por la guía de monitoreo de recursos hídricos del Ideam en 2002. El diseño se presenta en la Figura No. 15.

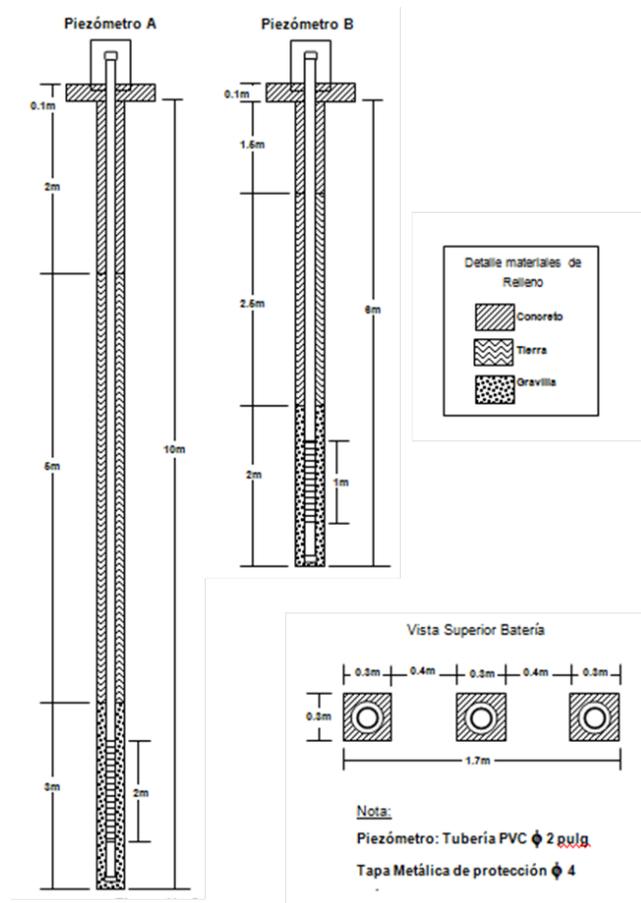


Figura No. 15. Diseño de batería de piezómetros.

La idea de construir pares de piezómetros de diferente profundidad es constatar cómo se comporta el flujo a nivel vertical, para conocer zonas de descarga y recarga.

En la Figura No. 16 se aprecia el comportamiento del flujo subterráneo bajo tres escenarios. Note como la energía potencial en cada uno de los piezómetros define la dirección del flujo.

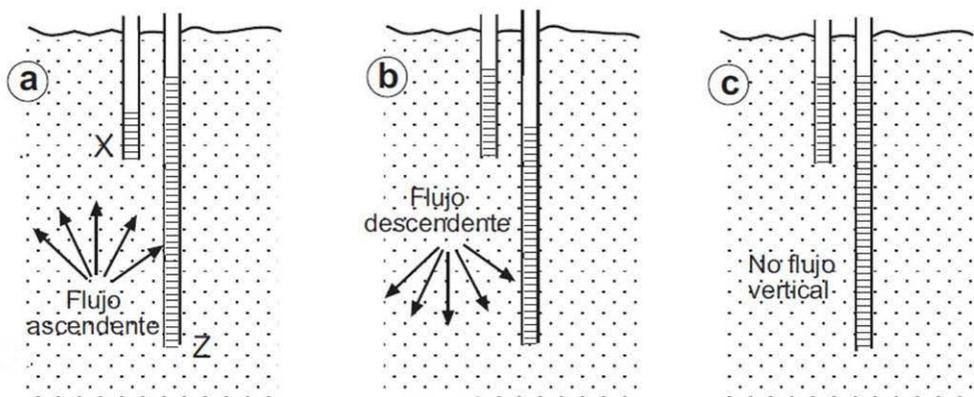


Figura No. 16. Dirección del flujo subterráneo en pares de baterías piezométricas.

En la Figura No. 17 se ilustra mediante un ejemplo con datos de los piezómetros Vb-Pz-31 y Vb-Pz-32 del mes de Diciembre de 2009 ubicados en el predio La Isabela, como se obtiene la magnitud de la energía potencial para determinar como se mueve el gradiente energético en ese punto.

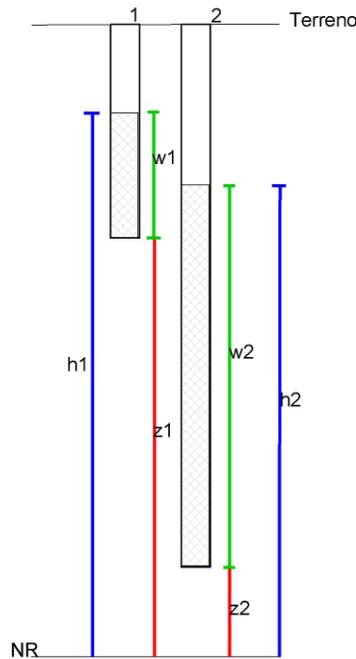


Figura No. 17. Variables de cálculo para determinar energía potencial.

$$h_1 = Z_1 + W_1$$

$$h_2 = Z_2 + W_2$$

$$NR = 920$$

Tabla No. 7. Variables para cálculo de energía potencial en piezómetros

Piezómetro	Profundidad (m)	Cota_terreno (msnm)	Fondo	Z	W (Diciembre / 09)	h (m)
1 : Vb_Pz_31	5	933	928	8	2.75	10.75
2 : Vb_Pz_32	8.1		924.9	4.9	3.38	8.28

El ejemplo anterior permite evidenciar que el piezómetro Vb-Pz-31 tiene mayor cabeza hidráulica que el Vb-Pz-32 por tanto el gradiente de flujo va del punto de mayor energía al de menor energía, es decir en esa zona se produce descarga hacia el acuífero.

4.3.2 Ubicación de las baterías

Las baterías piezométricas se localizaron de manera concéntrica al borde del espejo Lagunar procurando cubrir el perímetro de manera equidistante, lógicamente las variables climáticas

influyen en la posibilidad o dificultad de acceder a lugares preseleccionados, cada batería consta de dos piezómetros espaciados entre si cada dos metros.

De igual forma se procuró establecer un segundo anillo concéntrico alrededor del humedal en donde se localizo otro par de baterías a unos 200 metros de los iniciales y que se encuentran en una línea perpendicular al borde de la Laguna. Ver Figura No. 18.

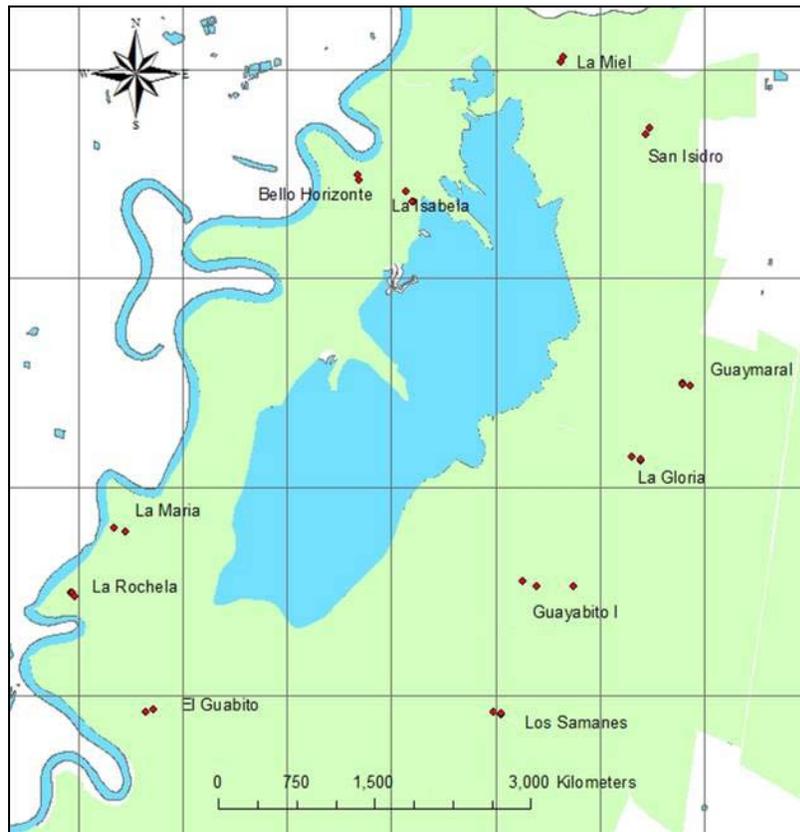


Figura No. 18. Localización de las baterías piezométricas.

Con ello se busca poder aplicar la expresión de Darcy para determinar por ejemplo velocidades de flujo. Ver Tabla No. 8 (La distancia que ahí se observa corresponde a la distancia entre piezómetros).

Tabla No. 8. Valores estimados de velocidad de flujo subterráneo.

Zona	Distancia (m)	v (m/día)
La Rochela	43	0.06
El Guabito	68	0.04
Los Samanes	76.5	0.18
Guabito	358	0.13
La Gloria	89	0.15
Guaymaral	82	0.17
San Isidro	80	0.17
La Miel	50	0.10
Bello Horizonte	51	0.12
La María	113	0.007

Una vez diseñada la red de monitoreo se realizó una campaña de topografía para nivelar los piezómetros al sistema de coordenadas Igac. Este procedimiento arrojó 5.42 m de diferencia entre el sistema de coordenadas CVC y el sistema de coordenadas Igac. Ese resultado contrasta con los 5.95 m de diferencia obtenida por el PMC para los dos sistemas mencionados.

4.3.3 Correlaciones litológicas

El Humedal Laguna de Sonso se encuentra localizado sobre formaciones geológicas superficiales generadas por depósitos de pantanos aluviales, cauces antiguos, depósitos coluviales y antiguas llanuras de inundación.

Esta conformación ha ocasionado que en las capas superiores del suelo de la zona, se encuentren abundantes lentes de arcillas y limos fundamentalmente de hasta 6 metros de profundidad y que se intercalen con el material acuífero generando caminos preferenciales de flujo y zonas de confinamiento y semiconfinamiento locales.

Samarena contrato 40 perforaciones alrededor de la Laguna con el objeto de construir igual número de piezómetros. De estas perforaciones se obtuvieron sus respectivos perfiles litológicos los cuales fueron usados para construir correlaciones estratigráficas alrededor de la Laguna de Sonso.

Pese a que existen zonas en donde no se cuenta con información de perforaciones (ej, fincas Villa Lobín - Bello Horizonte y el lecho de la Laguna), se presenta en el anexo E las correlaciones litológicas obtenidas con la información disponible.

4.3.4 Monitoreo de Niveles Piezométricos

Para conocer la variación de nivel en la superficie piezométrica alrededor de la Laguna se diseñó un plan de monitoreo que consistió en capacitar personal de la zona para que realizara mediciones a nivel mensual en cada uno de los piezómetros construidos. Este monitoreo se lleva a cabo con una sonda de sonido activada por un sensor higrométrico que se activa al

contacto con la superficie de agua. En el anexo F se presenta la base de datos de los niveles mensuales registrados hasta la fecha de la red de baterías piezométricas.

Según Vélez (2004) los registros realizados con este método puede estar dentro de margen de error de ± 2 cm debido a imprecisiones en la cinta métrica, a la lectura de la escala entre otros. En la Foto No. 5 se observa el procedimiento para el registro de niveles.



Foto No. 5. Registro de niveles piezométricos.

4.3.5 Piezometría de la zona de estudio

Para conocer las líneas equipotenciales o de igual potencial piezométrico, los registros de niveles se clasificaron según su profundidad y fueron analizados en el software Arc Gis 3.2 a través de dos métodos de interpolación a saber; Krigging Universal y por el método de la distancia inversa al cuadrado. En particular este último método tiende a generar los denominados “aros de cebolla” al momento de la interpolación por tanto se estableció como el método más óptimo el Krigging universal.

En el anexo G se muestra las líneas isopiezas correspondientes a los meses de junio de 2009 a marzo de 2010. Ahí se puede observar el sentido de las direcciones de flujo desde el acuífero hacia la Laguna. En general se puede resaltar dos comportamientos a saber: el primero corresponde con una zona de descarga proveniente desde el Sur de la Laguna y que privilegia el flujo a través de las haciendas El Guabito, La Maria y La Rochela, este comportamiento es bastante significativo en tanto que se desmitifica la idea de un solo sentido de descarga del acuífero hacia el Río Cauca y que por el contrario se pueden presentar zonas en donde el flujo preferencial de las aguas subterráneas se desvían del cauce longitudinal del Río.

El segundo comportamiento a resaltar tiene que ver con la recarga proveniente de la zona Oriental de la Laguna proveniente de la cordillera Central, esta zona incluye las haciendas del Oriente y del Nor Oriente de la cuenca de drenaje, estas son: Los Samanes, Guayabito, La Gloria, Guayamaral, San Isidro y La Miel. Obsérvese que las líneas en la zona Norte muestran una tendencia de drenaje que apunta hacia el Sur y que en principio estaría en discordancia con el sentido de flujo del acuífero regional. No obstante se debe tener en cuenta que estas

Tabla No. 9. Información recolectada para la caracterización del sistema hidrológico.

Estación	Tipo	Resolución	Período
Río Cauca Mediacanoa	Limnigráfica	Subhoraria	Junio 2009-Mayo2010
El Vinculo	Hidroclimatológica	Subhoraria	Julio, Septiembre, Diciembre de 2009 y Enero, Febrero, Marzo de 2010
Laguna de Sonso	Limnigráfica	Subhoraria	Junio-Diciembre de 2009 y Febrero - Marzo de 2010
Caño Carlina (Caño Nuevo)	Limnómetro	Diaria	Junio de 2009 a Junio de 2010
10 Fincas Laguna	Piezométrica	Mensual	Junio de 2009 a Septiembre de 2010

El presente análisis procuró utilizar el sistema de coordenadas Igac para cada uno de los lugares de registro. Para el caso del Trincho a la salida de la Laguna y del limnómetro en Caño Nuevo, se uso la diferencia establecida por PMC de 5.95 m entre el sistema de coordenadas CVC y el sistema de coordenadas IGAC para esta zona en particular del Valle del Cauca. El levantamiento topográfico realizado por Samarena encontró una diferencia en la zona de la Laguna entre sistema CVC e IGAC de 5.42 m, la cual fue usada específicamente para el limnógrafo en la Laguna.

Tabla No. 10. Diferencias entre los dos sistemas de coordenadas en los lugares de control y registro.

Lugar	CVC	IGAC
Limnómetro Caño Nuevo	933.8	927.85
Limnógrafo Laguna		929.856
Trincho	936.5	930.55
Río Cauca / Est. Mediacanoa		927.291

Se presenta a continuación la descripción de cada uno de los subsistemas involucrados en el sistema hidrológico del humedal Laguna de Sonso, así como el enfoque asumido para determinar su influencia en el balance hídrico.

4.4.1 Evapotranspiración

Existen diversos métodos para el cálculo de la evapotranspiración; Penman, García López, Thornthwaite, Turc entre muchos otros. No obstante según Mitsch y Gosselink (2007) ninguno de todos estos métodos empíricos es enteramente satisfactorio.

En la literatura existente aun no hay una respuesta uniforme acerca del efecto que tiene la presencia de vegetación en el humedal respecto a la extracción de volumen de agua desde la superficie. Muchos autores afirman que la influencia de la vegetación es insignificante; otros indican que la extracción se incrementa; algunos más dicen que se reduce y que varía con el estado de desarrollo de la vegetación y la estacionalidad climática. En la Tabla No. 11 se muestra los valores obtenidos por diferentes procedimientos para encontrar la evapotranspiración en la Laguna de Sonso. Como se puede observar los métodos de Penman, CVC y García López (sin buchón) generan valores muy parecidos, no obstante tiende a subestimar la variable.

Tabla No. 11. Evaporación y Evapotranspiración obtenida para la Laguna de Sonso por diferentes métodos.

Evt	Penman-Monthy	Estimado_CVC	Cenicafé	García López	
				Con Buchón	Sin Buchón
mm/día	3.35	3.8	5.6	8.7	2.71
mm/mes	100.5	116	168.31	260.4	81.3
mm/año	1206	1400	2019.7	3124.8	975.6

El método de Cenicafé fue validado por el Centro Nacional de estudios del Café (Colombia), mediante regresión a los valores logrados del análisis de información de estaciones climáticas de todo el país. (Barco- Cuartas, 1998): La expresión es la siguiente:

$$EVP_r = 4.658 \exp(0.0002h)$$

Donde:

EVPr: Evapotranspiración real en mm/día

h : Cota sobre el nivel del mar, en m

Los parámetros de esta sencilla expresión están ajustados al contexto climatológico colombiano y solo depende de la altitud de la zona de estudio, numerosos informes de hidrología en el país afirman que el método ajusta mejor que otros métodos empíricos extranjeros.

4.4.2 Intercambio Río Cauca / Laguna de Sonso

Para determinar el caudal de intercambio Río Cauca - Laguna de Sonso se elaboró una base de datos diaria desde Junio de 2009, con los niveles medidos en el limnómetro ubicado en Caño nuevo. A este limnómetro se le han realizado dos batimetrías hasta el momento una en 1986 y la otra en 1996, ver Figura No. 20. El proyecto de modelación del Río Cauca PMC, realizó una batimetría en el Caño Nuevo en el año 2003. No obstante entre las secciones levantadas no se tuvo en cuenta la sección del limnómetro. De igual forma el Ingenio Pichichí en el año 2007, realizó un levantamiento batimétrico de la Laguna de Sonso en sistema de coordenadas CVC; registró algunas cotas cercanas al trincho a la salida de la Laguna y no levanto batimétricamente el Caño Nuevo.

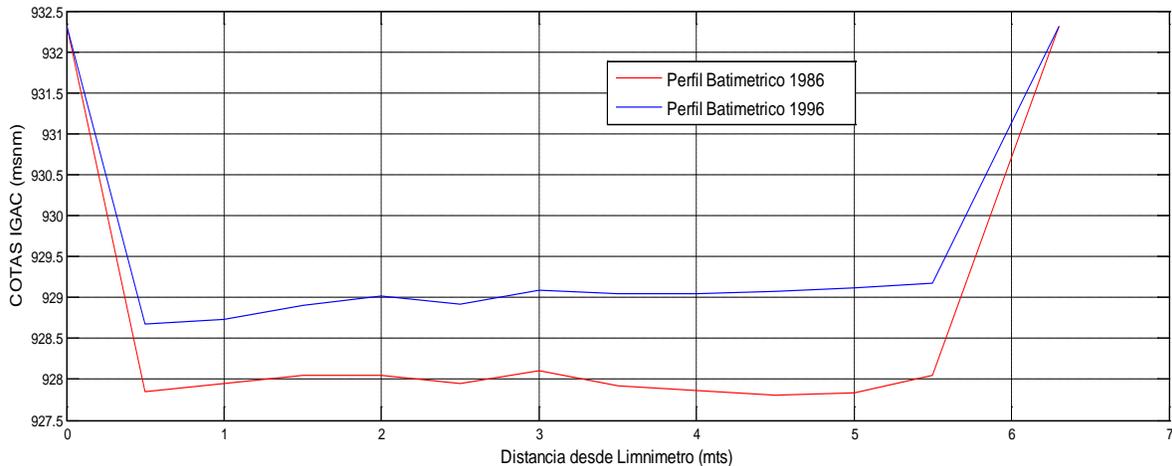


Figura No. 20. Perfiles batimétricos sección limnómetro en Caño Nuevo.

En ese orden de ideas, se asumieron las relaciones hidráulicas establecidas en el trabajo de grado de Jefferson Martínez y Alexander Posso en el año 2004, quienes a partir de registros históricos de niveles observados y la geometría de la sección llegaron a las siguientes expresiones que relacionan el Perímetro mojado y el Área en la sección.

$$A = 0.2615 (N_{caño} + 0.1 n)^2 - 484.47 (N_{caño} + 0.1 n) + 224370$$

$$P = 0.0124 (N_{caño} + 0.1 n)^2 - 21.008 (N_{caño} + 0.1 n) + 8807.3$$

En ese mismo trabajo, se considero que la variación del lecho en ese tramo del caño debido a la acumulación de sedimentos era de 10 cm/año. En particular y para esta investigación esa consideración no fue tomada en cuenta, pues la variación en los niveles registrados en el limnómetro no mostraron ese incremento (1.4 metros desde 1996). Además esa suposición se basó solo en dos registros históricos y a la fecha no se tiene un dato reciente que permita corroborar si esa tasa de sedimentación es lineal.

Para determinar el caudal en el Caño Nuevo se utilizo la expresión de Manning. En el anexo h se encuentran tabulados los valores de caudal obtenidos para la expresión. Se uso como pendiente del canal 0.0002 m/m, que es el valor obtenido por el sondeo batimétrico de PMC en el año 2003.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} \sqrt{S}$$

Donde:

Q = caudal (m³/s)

S = pendiente (m/m)

n = coeficiente de rugosidad de Manning

R = radio hidráulico (m²/3) = A/P

A = área (m²)

P = perímetro mojado (m)

Los valores de rugosidad de Manning (ver Tabla No. 12) fueron sugeridos por Martínez y Posso (2004):

Tabla No. 12. Valores de Rugosidad de acuerdo con los Niveles en Caño Nuevo

SISTEMA CVC	SISTEMA IGAC	Manning (n)
$N \leq 936.99$	$N \leq 931.04$	0.055
$936.99 < N \leq 938.04$	$931.04 < N \leq 932.09$	0.046
$N > 938.04$	$N > 932.09$	0.027

Tomado de Martínez y Posso 2004

La dirección de flujo en el canal se estableció comparando los niveles registrados en el limnómetro y los niveles registrados en la Laguna para la misma fecha.

El período comprendido entre Junio de 2009 y Marzo de 2010, permite observar un ciclo hidrológico en el que los aportes del Río Cauca a la Laguna fueron mínimos, solo el 28 de Diciembre de 2009 y el 03 de Enero de 2010 se registró entradas de caudal a la Laguna. En la Tabla No. 13 se observa el caudal medio de salida de la Laguna hacia el Río Cauca.

Tabla No. 13. Caudal medio de salida en Caño Nuevo.

Caudal medio mensual de salida (m ³ /seg)	
jun-09	1.69
jul-09	1.69
ago-09	1.69
sep-09	1.71
oct-09	1.72
nov-09	1.74
dic-09	1.73
ene-10	1.70
feb-10	1.66
mar-10	1.61

Los registros de los niveles en el Río Cauca, en el Caño Nuevo y en la Laguna de Sonso se pueden observar en la Figura No. 21. Nótese la altura del trincho respecto a los niveles de cada uno de los cuerpos de agua. Para el período de estudio se puede observar que los niveles de la Laguna se mantienen por encima de la cota del trincho (930.55 en sistema Igac) que es la altura establecida por el decreto 16 de 979 para mantener el nivel ecológico en la Laguna. Niveles inferiores a la cota del trincho pueden indicar que la estructura no cumple su función.

En la Figura No. 22 se presenta el ajuste de diversas distribuciones de probabilidad a la serie de niveles de la Laguna registrados para el período 2000 a 2009. Este análisis arrojó como resultado que la función de mejor ajuste fue la distribución de probabilidad Gamma.

Figura No. 21. Variación de niveles en el Río Cauca, en el Caño Nuevo y en la Laguna de Sonso, período Junio de 2009 a Marzo de 2010.

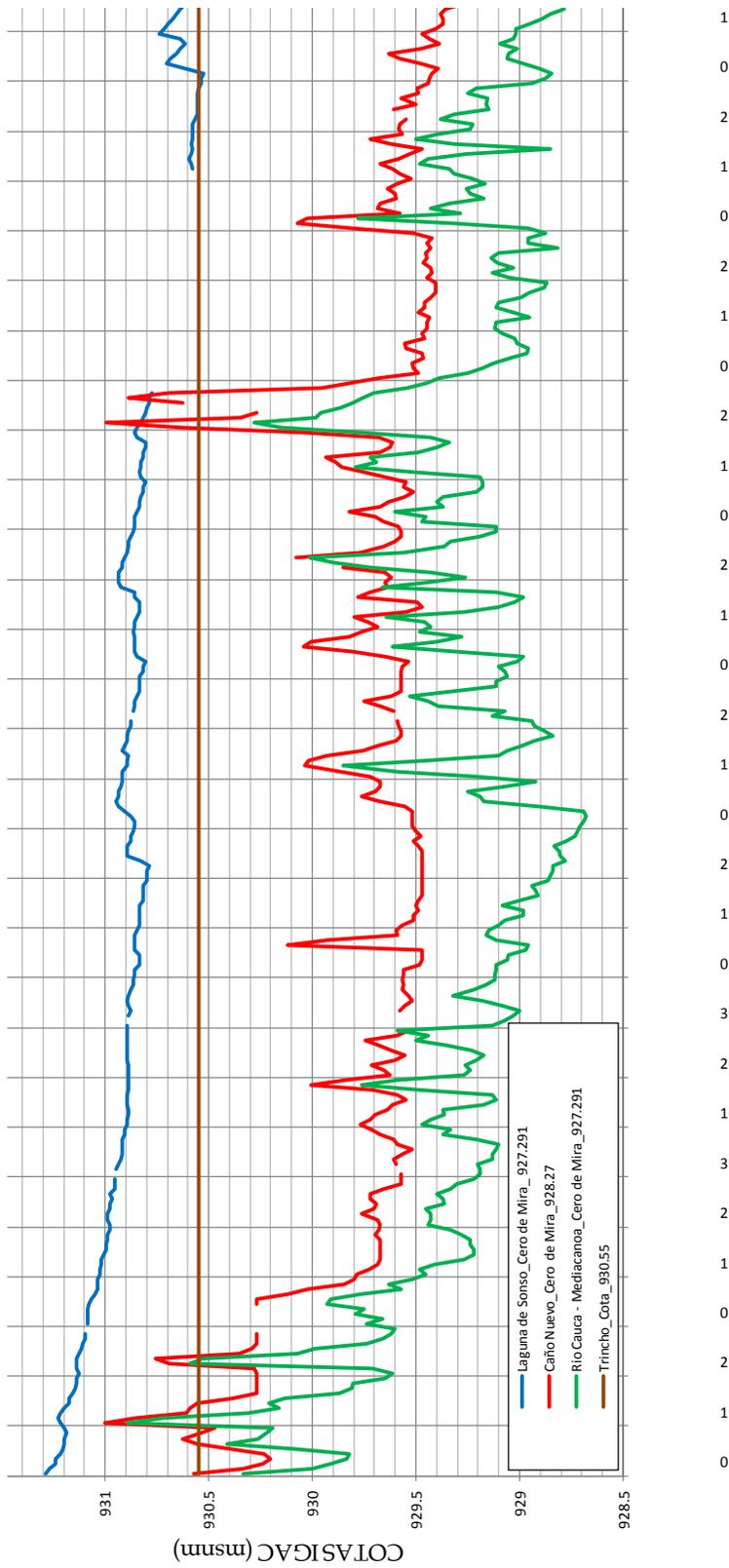
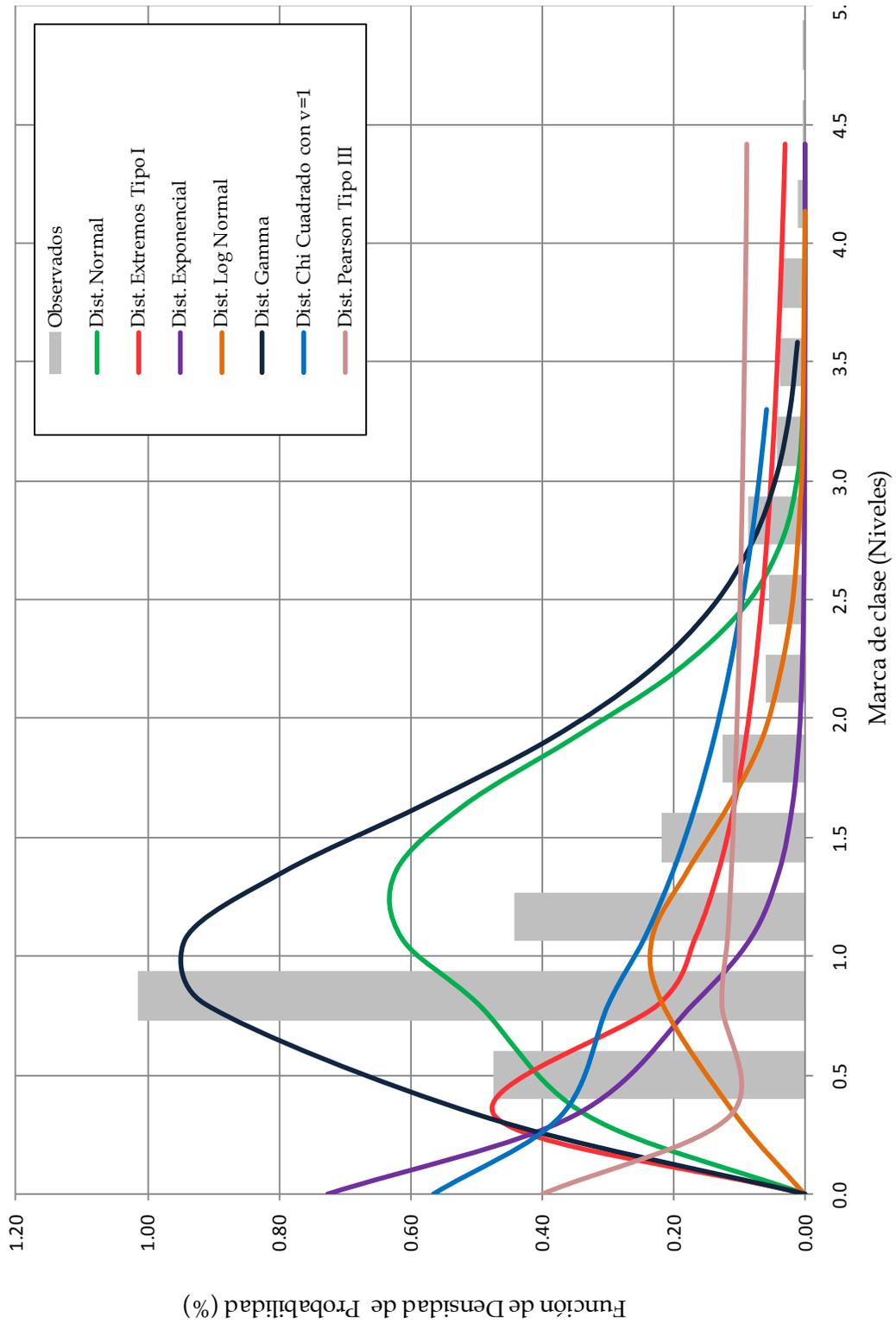


Figura No. 22. Ajuste de distribuciones de Probabilidad de los niveles horarios en la Laguna de Sonso período 2000-2007



4.4.3 Precipitación

Para estimar los aportes por precipitación neta al sistema hidrológico humedal Laguna de Sonso, se considero la influencia de la estación hidroclimatológica más cercana al sistema con el objetivo de revisar la relación entre los ascensos en los niveles freáticos de la zona Oriental de la Laguna y el ascenso en el almacenamiento en la Laguna. La Figura No. 23 permite observar como los picos o incrementos de nivel en la Laguna coinciden con los eventos de precipitación registrados en la estación pluviográfica de El Vinculo (IDEAM).

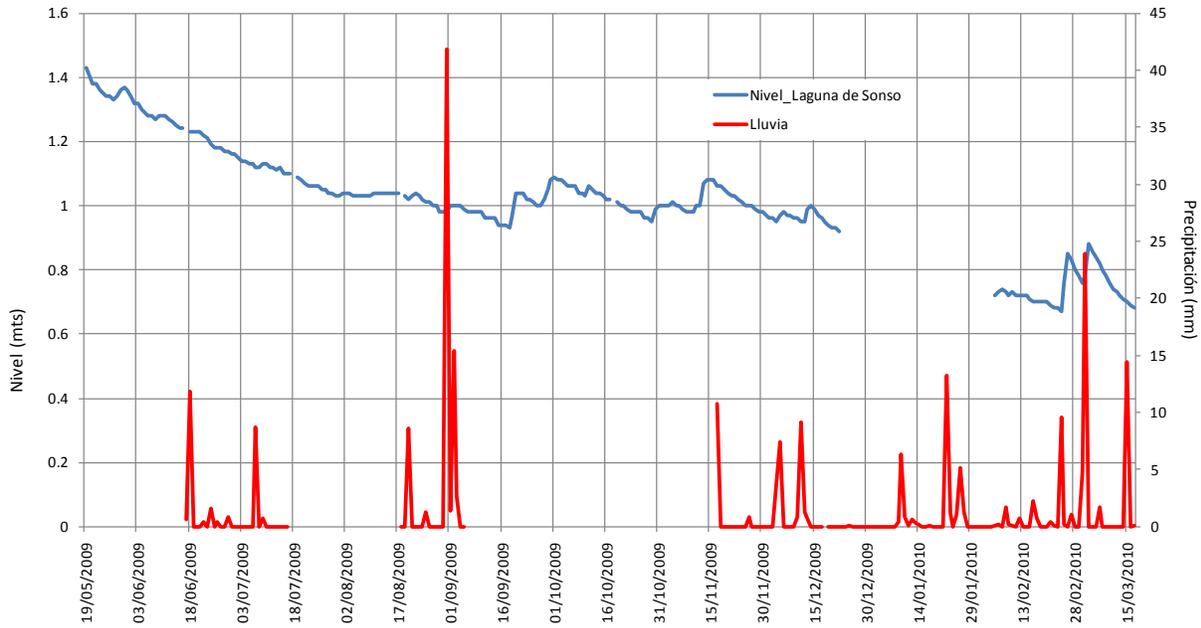


Figura No. 23. Comparación entre precipitación y ascenso de niveles en la Laguna de Sonso.

Si se observa con detenimiento, se puede constatar que el nivel en la laguna estuvo relativamente estable en el periodo comprendido entre Agosto y Diciembre de 2009, mostrando algunos ascensos súbitos debido a la precipitación local. Esto contrasta con el inicio del periodo en donde se observa un nivel cercano a los dos metros y con los niveles al final del periodo que se encuentran por debajo de un metro. En síntesis se puede observar que la laguna venia de un periodo de incremento en el almacenamiento mostrando en este periodo una tendencia de vaciado.

La Tabla No. 14 contiene los valores totales mensuales de precipitación registrados por la estación El Vinculo.

Tabla No. 14. Precipitación Total mensual estación El Vinculo.

Tiempo	jun-09	jul-09	ago-09	sep-09	oct-09	nov-09	dic-09	ene-10	feb-10	mar-10
Prec. (mm)	-	25	-	71.2	-	-	34.9	8.9	25.1	59.3

La precipitación es una de las variables que influye en el ascenso de los niveles freáticos en una zona determinada. La recarga por precipitación al acuífero depende de la humedad inicial en el suelo, de la intensidad de la lluvia y de su duración. Durante el período de monitoreo (Junio de 2009 a Septiembre de 2010) el nivel freático registrado en cada batería de piezómetros mostró oscilaciones significativas a nivel mensual lo cual infiere la posibilidad de una estacionalidad que puede estar relacionada con las precipitaciones a nivel local. No obstante, no se debe descartar la influencia de otro tipo de variables como los bombeos de pozos profundos en la zona, la presión barométrica y la recarga por riego y drenaje.

En la Figura No. 24 se puede observar la relación de cuatro piezómetros ubicados en el costado Oriental de la Laguna en cuatro fincas diferentes y los eventos de precipitación registrados por la estación El Vinculo. Se debe aclarar que la resolución del monitoreo en los piezómetros es a nivel mensual y que los datos de la estación El Vinculo están a nivel diario; por tanto la comparación entre señales no es muy conveniente. Sin embargo es un primer referente para establecer una posible conexión entre los ascensos de los niveles freáticos y la precipitación antecedente.

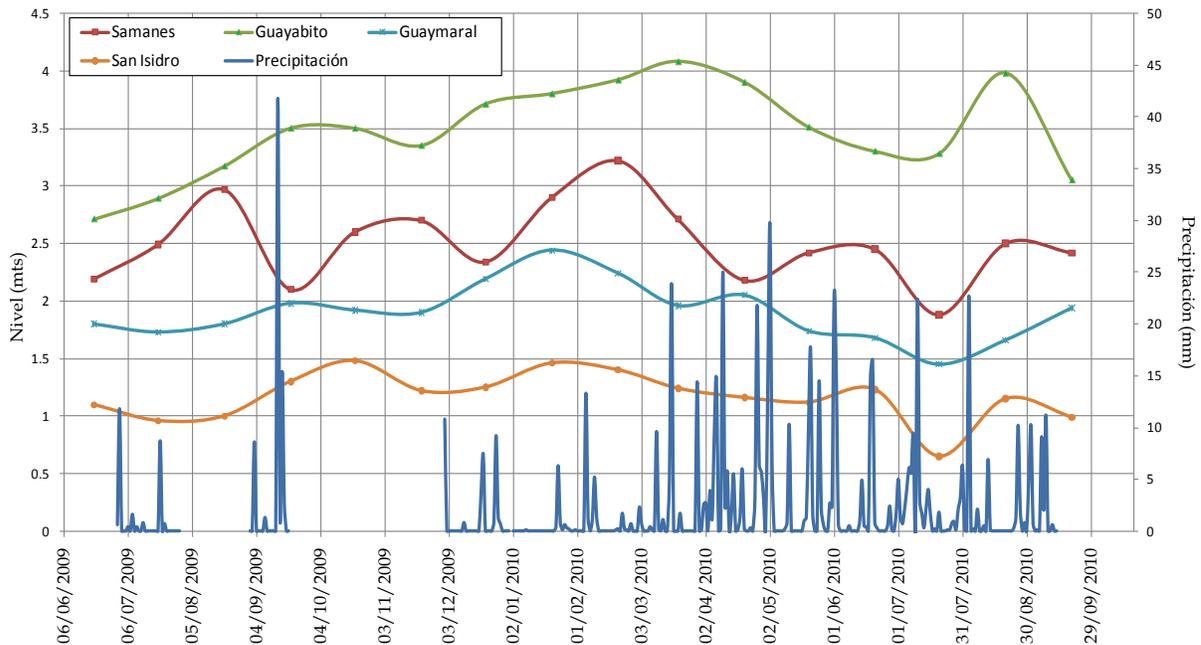


Figura No. 24. Comparación entre registros de precipitación y ascenso de niveles freáticos (primera aproximación).

4.4.4 Tributarios

A la Laguna de Sonso descargan desde los costados Oriental y Sur diversas fuentes superficiales que en su gran mayoría son canales de riego y drenaje usados por las haciendas en sus actividades agrícolas. Algunos de ellos usan como fuente de suministro de aguas del Río Guadalajara y del Río Sonso (ver Figura No. 25), otros se abastecen a partir del bombeo de pozos profundos. En ambas situaciones los excedentes de estas actividades van a parar a la Laguna de Sonso como escorrentía superficial. Estudios anteriores han intentado determinar

una conexión entre la escorrentía y la precipitación local y han llegado a la conclusión que esta relación no es clara (Hernández 2005) pues estas corrientes son intermitentes. Esto se puede evidenciar en la Figura No. 26 en donde se relaciona la precipitación acaecida en la fecha de realización de diversos aforos en los tributarios, ahí se observa que la corriente aforada aparece en días de no lluvia lo que es coherente con los ciclos de riego requeridos para mantener las condiciones de humedad necesaria en los diversos cultivos.

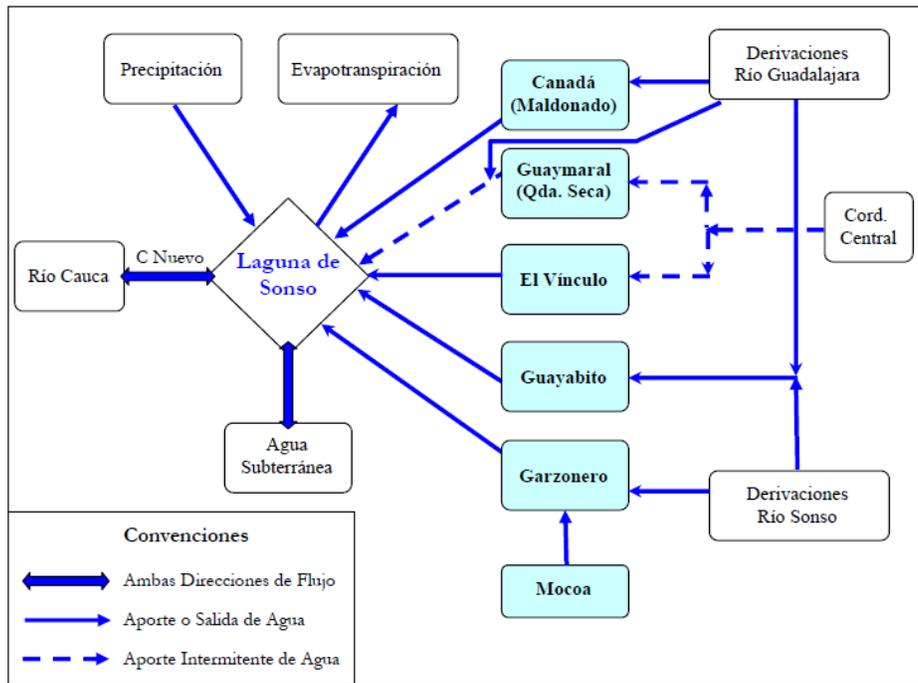


Figura No. 25. Principales tributarios de la Laguna de Sonso. Imagen tomada de PMAI 2006.

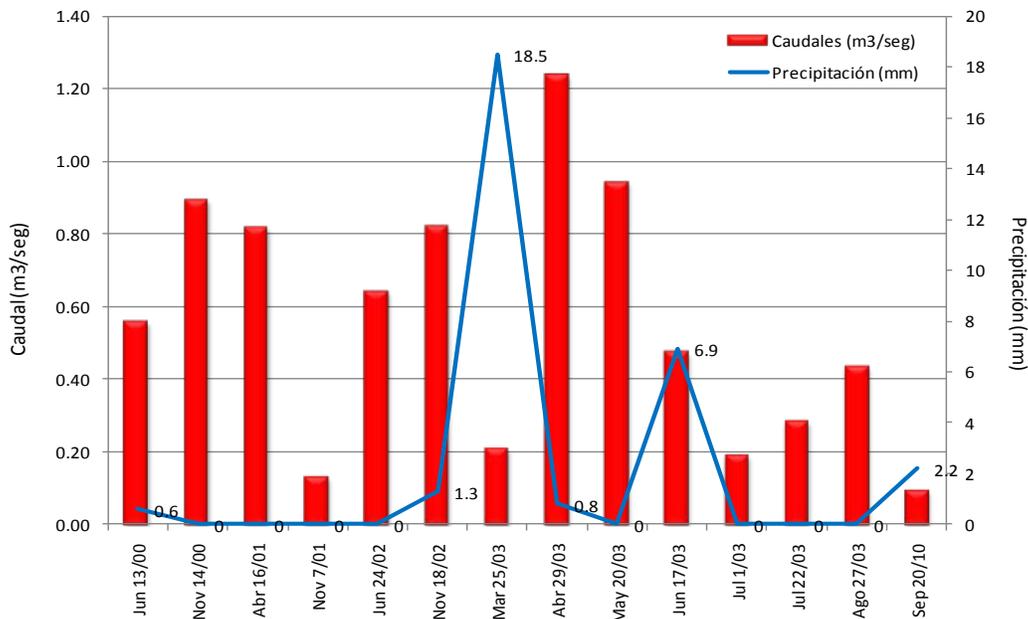


Figura No. 26. Relación del caudal aforado en los tributarios y la precipitación.

La CVC ha realizado una serie de aforos en los principales tributarios que arriban a la Laguna de Sonso (ver Tabla No. 15). A partir de estos aforos, y debido a que la precipitación en la cuenca de drenaje no está directamente relacionada con el caudal de los respectivos tributarios, se procedió a estimar el promedio de caudal histórico aforado hasta la fecha.

Tabla No. 15. Aforos realizados por CVC en los tributarios de la Laguna de Sonso.

Fecha	m ³ /seg						Total Caudal
	Canadá	Guaymaral	Guayabito	Vinculo	Mocoa	Garzonero	
Feb 12/90	0.04	0.03	0.01	0.11	0.04	0.07	0.29
Oct 23/95	0.37		0.07	0.33		0.06	0.82
Jun 24/96	0.07	0.01	0.04	0.15	0.03	0.05	0.36
Jul 14/97	0.04	0.03	0.04	0.08	0.02	0.08	0.28
Jun 2/99	0.11	0.06	0.07	0.07	0.04		0.36
Ago 11/99	0.08	0.01	0.12		0.03	0.08	0.31
dic 6/99	0.04	0.08	0.20	0.05	0.02	0.29	0.67
Jun 13/00	0.10	0.02	0.22	0.01	0.06	0.15	0.56
Nov 14/00	0.12	0.01	0.01	0.50	0.11	0.15	0.89
Abr 16/01	0.30	0.10	0.12	0.06	0.08	0.15	0.82
Nov 7/01		0.01	0.07		0.01	0.05	0.13
Jun 24/02	0.23	0.01	0.04	0.17	0.19		0.64
Nov 18/02	0.16	0.01	0.02	0.53	0.02	0.09	0.82
Mar 25/03	0.08	0.01		0.09	0.01	0.02	0.21
Abr 29/03	0.07	0.00	0.22	0.05	0.03	0.86	1.23
May 20/03	0.08		0.59		0.19	0.09	0.94
Jun 17/03	0.05	0.03	0.16	0.03	0.03	0.18	0.48
Jul 1/03	0.03		0.03	0.01	0.02	0.10	0.19
Jul 22/03	0.07		0.10		0.06	0.07	0.29
Ago 27/03	0.10			0.15	0.17	0.02	0.43
Sep 20/10	0.03	0.05	0.02				0.10
						Promedio	0.54

4.4.5 Aguas Subterráneas

Los aportes de caudal desde el acuífero adyacente hacia el humedal Laguna de Sonso han sido subestimados en algunos de los estudios realizados en la zona. En otros estudios sin embargo se ha abierto la posibilidad de considerar aportes importantes de las aguas subterráneas. Hernández (2005) plantea que de acuerdo al cierre de la ecuación de balance hídrico en la Laguna para el año 2003, los aportes de aguas subterráneas pueden oscilar en un rango de 14 a 28 m³/seg. En ese orden de ideas, el Plan de Manejo Integral de la Laguna de Sonso, estipuló la necesidad de evaluar la dinámica de las aguas subterráneas en relación con el humedal.

Bajo esa premisa, esta investigación ha logrado establecer una metodología sencilla para validar la magnitud de la ecuación de cierre de balance hídrico con respecto a los valores registrados de los niveles freáticos y su relación con los niveles en la Laguna de Sonso.

El método de análisis de flujo neto, a menudo llamado “Darcy/Dupuit” es probablemente el método más usado para cuantificar el flujo entre aguas superficiales y aguas subterráneas. Especialmente en grandes sistemas lagunares o a escala de cuenca. En este método una combinación de mediciones de niveles de agua en cercanías del borde del cuerpo de agua son usados para calcular los gradientes entre los pozos de monitoreo y el cuerpo de agua. La aproximación establecida genera líneas equipotenciales basadas en el estado de cabezas hidráulicas y niveles de los cuerpos de agua. Ver Figura No. 27, (USGS 2008).

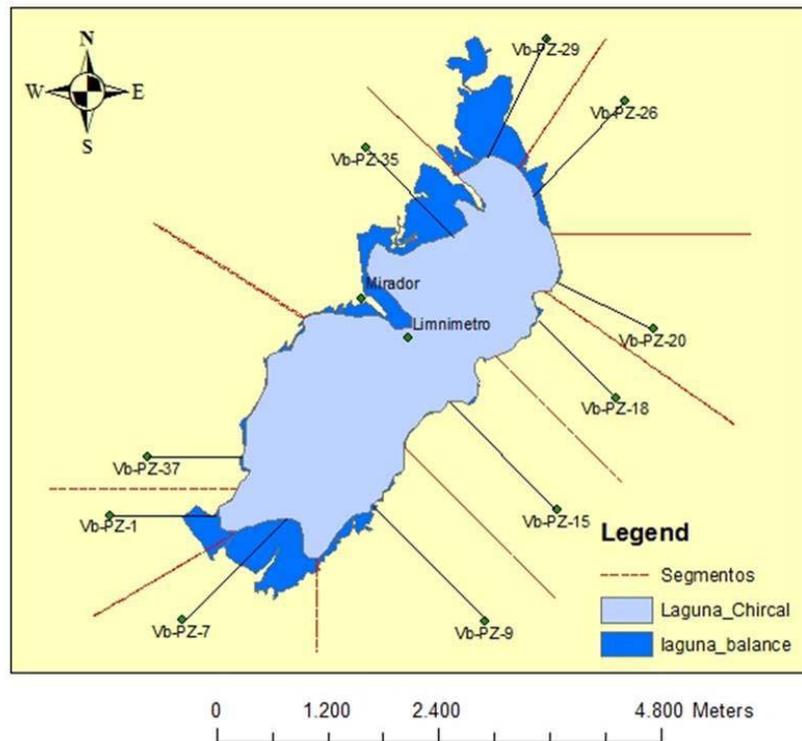


Figura No. 27. Segmentos asignados y líneas de distancia de cada piezómetro a la Laguna

En esta aproximación la línea de borde del cuerpo de agua es dividida en segmentos, con un número de segmentos dependientes de la localización y número de pozos de monitoreo. Para cada segmento se asocia un piezómetro y una cabeza hidráulica y el gradiente entre el piezómetro y el cuerpo de agua se aplica para todo el segmento.

Debido a que el flujo en cercanías del cuerpo de agua puede describir una trayectoria no lineal, es decir puede presentar una trayectoria parabólica; entonces se hace más conveniente aplicar un ajuste a la ecuación de Darcy conocida como la corrección de Dupuit:

$$Q_i = \sum_{i=1}^N KA \frac{(h_1^2 - h_2^2)}{2L}$$

Donde:

A: Área de la sección de flujo, b.d (m²)

b: Espesor del acuífero observado (m)

d: Longitud de cada segmento (m)

K: Conductividad Hidráulica (m/d)

hi: altura del piezómetro y el cuerpo de agua respectivamente (m)

L: Distancia desde el piezómetro hasta el borde del cuerpo de agua.

N: numero de segmentos evaluados.

Un caudal negativo indica que se está produciendo una recarga del acuífero desde el cuerpo de agua. Un caudal positivo indica que el cuerpo de agua está funcionando como manantial. En la Tabla No. 16 se observa los caudales medios mensuales de descarga y recarga obtenidos por el método de flujo neto.

Tabla No. 16. Caudales medios mensuales de aguas subterráneas (m³/seg).

Jun-09	Jul-09	Ago-09	Sep-09	Oct-09	Nov-09	Dic-09	Ene-09	Feb-09	Mar-10
1.58	1.58	1.52	1.40	1.30	1.33	1.33	1.30	1.34	1.39
-0.07	-0.08	-0.09	-0.04	-0.08	-0.09	-0.07	-0.12	-0.09	-0.12

Este análisis permitió evidenciar las zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas en la Laguna de Sonso. La zona preferencial de recarga, y como se ha venido constatando a través de cada uno de los métodos empleados a lo largo de la investigación; es el grupo de fincas en el costado Sur y Nor-Oriental de la Laguna, esto es; las haciendas Los Samanes, Guayabito I, La Gloria, Guaymaral, San Isidro, La Miel, Guabito y La Rochela. Lo contrario, es decir; la descarga hacía el acuífero sucede en las haciendas Bello Horizonte, La Isabela y probablemente en el sector de Villa Lobín.

El promedio mensual de descarga del acuífero hacía el humedal en el período analizado es de 1.41 m³/seg. Los trabajos anteriores no consideraron las salidas de aguas subterráneas del sistema hidrológico. En esta investigación se encontró que a través de este mecanismo salen de la Laguna 0.1 m³/seg.

4.5 BALANCE HÍDRICO

El presente capítulo aborda el modelo conceptual de intercambio entre cada uno de los subsistemas hídricos involucrados con el humedal Laguna de Sonso, y cuantifica los aportes de cada subsistema para el período hidrológico Junio de 2009 a Marzo de 2010. En particular, se pretende abordar el efecto en un período de estiaje sobre la dinámica hidrológica del humedal con miras a establecer los aportes que hacen las aguas subterráneas al sistema global, en ausencia de aportes desde el Río Cauca.

La Figura No. 28, establece un esquema conceptual de cada una de las variables que intervienen en la dinámica hidrológica del humedal Laguna de Sonso. La línea punteada indica la delimitación del sistema hidrológico que se va a analizar. Nótese que no se incluye los flujos intermedios ni los regionales. De igual forma, el proceso de lluvia-intercepción e

infiltración- evaporación en el área de drenaje adyacente a la Laguna se asume como una entrada puntual o agregada para el balance.

El balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad, que establece que para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y las salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada¹³:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Pn + Si + Gi - ET - So - Go$$

Donde:

$\Delta V/\Delta t$ = Cambio del volumen de agua almacenada

Pn = Precipitación neta

Si = Entradas de agua superficial

Gi = Entrada de agua subterránea

ET = Evapotranspiración

So = Salidas de agua superficial

Go = Salida de agua subterránea

El PMAI¹⁴ 2007 elaboró las curvas de nivel-área-volumen con la batimetría realizada por el Ingenio Pichichí. De este procedimiento se expone a continuación una tabla en la que se relacionan áreas de espejo de agua y volúmenes de almacenamiento para la Laguna de Sonso de acuerdo a las cotas de nivel o profundidad en la misma.

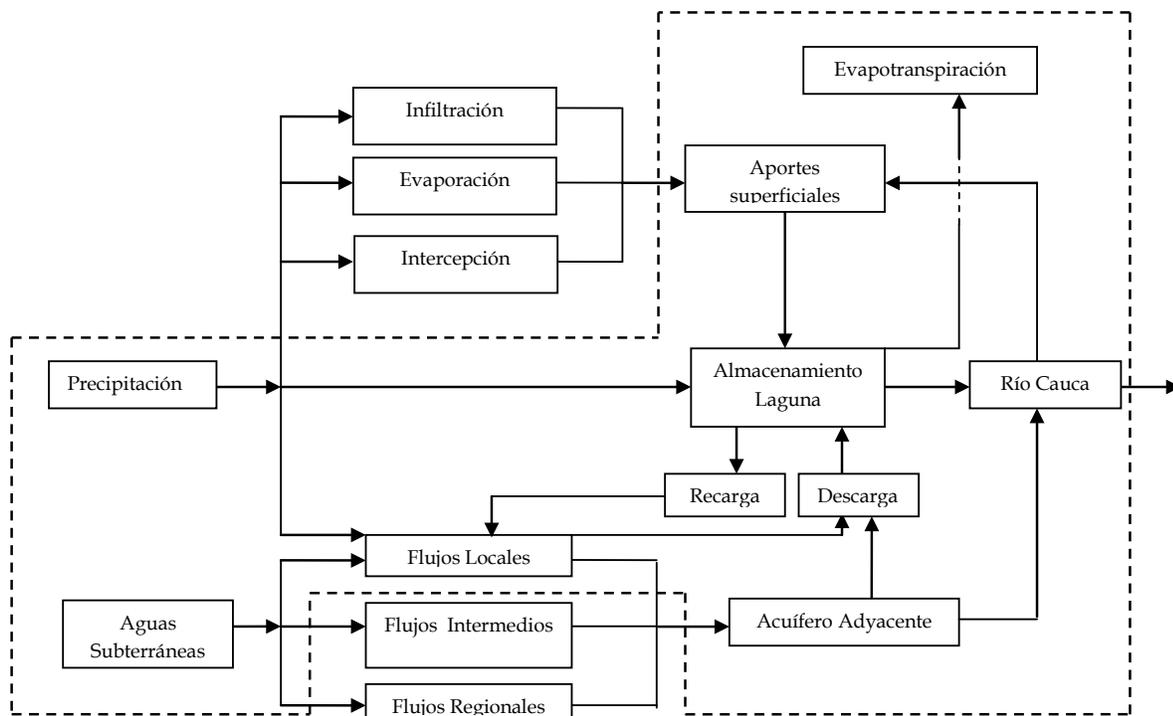


Figura No. 28. Esquema conceptual del sistema hidrológico en el humedal Laguna de Sonso.

¹³ Hernández M. F. Estudio de la Calidad del Agua de la Laguna de Sonso. Universidad del Valle, 2005.

¹⁴ Plan de Manejo Integral de la Laguna de Sonso.

Tabla No. 17. Relaciones Nivel-Área-Volumen en Laguna de Sonso.

Nivel		Volumen	Área
CVC	Igac	(m ³ x 10 ⁶)	(Ha)
934.5	929.08	0.00008	0.09
935	929.58	0.00568	2.63
935.5	930.08	0.0498	200.47
936	930.58	0.88	391.25
936.5	931.08	3.74	744.92
937	931.58	7.97	934.62
937.5	932.08	12.82	995.46
938	932.58	17.86	1015.76
938.5	933.08	22.96	1022.19
939	933.58	28.08	1024.55

Tomado de PMAI 2007.

Como se pudo observar en la Figura No. 21 los niveles en la Laguna de Sonso desde Junio de 2009 hasta Marzo de 2010 se mantuvieron dentro del rango 937 a 936.5 en sistema CVC; es decir dentro del rango 931.58 y 931.08 en coordenadas Igac. Por tanto el promedio de almacenamiento para este período de análisis es:

$$\frac{dS}{dt} = 5.855.000 \text{ m}^3$$

Con este dato de entrada se procede a estimar el posible valor de las aguas subterráneas para el año 2009 despejando de la ecuación de balance hídrico:

$$\frac{dS}{dt} = In - Out$$

$$\frac{dS}{dt} = (P + S_i + G_i) - (E_t + S_o + G_o)$$

Se tiene en cuenta la entrada promedio de cada variable y se hace la respectiva transformación de caudal a volumen (60 seg*60 min*24 h*30 d):

Tabla No. 18. Volúmenes de entrada y salida al sistema hidrológico

ENTRADAS (m ³)				SALIDAS (m ³)		
Río Cauca	Precipitación	Tributarios	Aguas Subter.	Caño	Evapot.	Aguas Subter.
0	5129288	1399680	Incógnita	4435056	657300	Se asume muy pequeña

$$5.855.000 \text{ m}^3 = (5.129.288 + 13.996.680 + X)m^3 - (4.435.056 + 657.300)m^3$$

De donde se obtiene un valor aproximado de volumen transferido desde el acuífero:

$$X = 4.418.389 \text{ m}^3$$

Que en términos de caudal es igual a 2 m³/seg mensual. Este valor incluye las salidas de aguas subterráneas. En la Tabla No. 19 se puede observar la tabulación del balance hídrico realizado para la Laguna de Sonso en el período mencionado. Cabe anotar que hubo algunos meses sin información y que no fueron incluidos en el balance.

Como se puede observar el cierre de la ecuación de balance hídrico para el período 2009 y el volumen de almacenamiento estimado por el PMAI, arrojaron un valor que es constatado con los volúmenes obtenidos por el método de flujo neto de la USGS 2008. Ello indica que el procedimiento es adecuado pese a que no se tiene un período entero de observación.

En la Tabla No. 20 se muestra un comparativo de otros balances realizados por otros autores en diferentes períodos, no obstante se puede observar como variables como la entrada de caudal debida a tributarios y la salida por evaporación son sobredimensionadas.

Tabla No. 19. Balance Hídrico para el periodo de análisis en Laguna de Sonso.

Mes	ENTRADAS				SALIDAS				Balance	Almacenamiento medio mensual (m ³)
	Precipitación (m ³ /seg)	Río Cauca (m ³ /seg)	Tributarios (m ³ /seg)	Caudal Subterráneo (m ³ /seg)	Evapo transpiración (m ³ /seg)	Río Cauca (m ³ /seg)	Caudal Subterráneo (m ³ /seg)			
jun-09	Sin datos	0	0.54	1.58	0.25	1.69	0.07			
jul-09	1.13	0	0.54	1.58	0.25	1.69	0.08	1.23	3192493	
ago-09	Sin datos	0	0.54	1.52	0.25	1.69	0.09			
sep-09	3.22	0	0.54	1.40	0.25	1.71	0.04	3.16	8200039	
oct-09	Sin datos	0	0.54	1.40	0.25	1.72	0.08			
nov-09	Sin datos	0	0.54	1.30	0.25	1.74	0.09			
dic-09	1.58	0.092	0.54	1.33	0.25	1.73	0.07	1.49	3855063	
ene-10	0.40	0.084	0.54	1.33	0.25	1.70	0.12	0.28	733376	
feb-10	1.14	0	0.54	1.30	0.25	1.66	0.09	0.97	2525205	
mar-10	2.69	0	0.54	1.34	0.25	1.61	0.12	2.58	6697187	

Tabla No. 20. Comparativo de balance hídrico de diferentes autores.

Año de Análisis	Autor	ENTRADAS (m ³)				SALIDAS (m ³)				Almac. medio Anual (m ³)
		Río Cauca	Precipitación	Tributarios	Agua Subter.	Caño	Evapot.	Agua Subter.		
2002	PMAI (2006)	4069654	7933237	13849317		5706168	20010699	0	135341	
2002	VELEZ (2006)	18050000	8238000	21966000	0		24677000	0	23577000	
2003	HERNANDEZ (2005)	3371164	12657780	7718730		6850596	15517443	0	1379635	
2009	SAMARENA (2010)	0	5129288	1399680	3743589	4435056	657300	192549	5180200	

5. DETERMINACIÓN DE IMPACTOS HIDROLOGICOS

La variación de los niveles eco hidrológicos en la Laguna de Sonso vienen dados por la estacionalidad de las lluvias en la zona; por la dinámica de intercambio con el Río Cauca; por el grado de cobertura del espejo de agua por cuenta del buchón (*Eichhornia crassipes*), por los períodos de mayor o menor radiación solar y lógicamente por la variación de los niveles freáticos en inmediaciones de la Laguna.

En particular este último aspecto y por ser el tema de esta investigación, se abordara los efectos en la disminución de los niveles freáticos en relación con los niveles en la Laguna de Sonso.

Según Custodio (2000), se puede considerar que la oscilación de niveles de un acuífero próximo a un río o lago con nivel variable se debe a la superposición de dos componentes:

Componente debido a las oscilaciones del río o lago.

Componente debido a la recarga o descarga natural o artificial que recibe el acuífero (lluvia, bombeos, evapotranspiración, infiltración desde un acuífero superior etc.)

En ambos casos, las oscilaciones vienen determinadas tanto como por los parámetros geométricos e hidrológicos (S y T) del acuífero, como por las condiciones de contorno. En la mayor parte de los acuíferos se puede admitir que es válida la aplicación de la ecuación general del flujo en los medios porosos, aplicada a un caso adimensional. Pues se admite que la variación de h es nula a lo largo de una misma vertical y que el flujo es igual en los planos perpendiculares al río o lago. Esta ecuación es:

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \frac{T}{S} \frac{\delta^2 h}{\delta x^2}$$

La solución de esta ecuación para condiciones complejas en la geometría del acuífero o en la distribución de T y S, o en las condiciones de contorno, solo puede ser prácticamente resuelta mediante la utilización de modelos analógicos o digitales.

En algunos casos sencillos de acuíferos homogéneos e isótropos, se ha encontrado la solución mediante un desarrollo mediante series de Fourier de las condiciones de contorno. Para las condiciones representadas en la Figura No. 29, se supone que la oscilación del río o lago tiene un régimen sinusoidal y en ese caso:

$$203 \text{ cm} - 92 \text{ cm} = (25 \text{ cm} - 0) * \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi * 0.003}{90 \text{ días} * 43.2 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}}}\right)$$

$$0.044 \text{ m} = -x \exp(0.00155 \text{ m})$$

$$\ln(0.044) = \ln(-x \exp(0.00155))$$

$$x = 2015 \text{ m}$$

El anterior resultado indica que en aquellos lugares en donde el nivel freático disminuya 50 cm, asumiendo un acuífero libre y suponiendo estado estable, es decir sin salidas ni entradas al sistema, los niveles en la laguna se verían afectados si esta disminución ocurre a 2015 m de distancia del borde de la misma.

Pese a que este modelo es bastante simple y determinista, es una primera aproximación a una posible delimitación de las líneas de impacto que tiene la variación en los niveles freáticos en inmediaciones del humedal Laguna de Sonso, y más aún si se tiene en cuenta que la franja de reserva natural en términos superficiales solo alcanza en promedio una distancia de 450 m desde el espejo lagunar, por tanto se hace necesario precisar la distancia de la línea de afectación teniendo en cuenta las demás variables que se hacen presentes en el sistema hidrológico del humedal. En la Figura No. 30 se observa la localización del límite de la reserva protectora y la línea de afectación si el nivel freático varía 50 cm en un período de 6 meses.

Téngase en cuenta que los registros de los niveles piezométricos han percibido variaciones de esta magnitud en solo 1 mes de registros.



Figura No. 30. Línea de afectación por una oscilación de 50 cm del nivel freático en los niveles de la Laguna de Sonso

6. LINEAMIENTOS DE MANEJO¹⁵

En muchos humedales, el nivel del agua depende de una combinación de precipitaciones directas, escorrentía y descarga/recarga de aguas subterráneas. A menudo las aguas subterráneas adquieren mayor importancia en la estación seca y pueden llegar a ser la única fuente de suministro de agua para el humedal. De modo que incluso pequeñas aportaciones de aguas subterráneas pueden resultar vitales para el mantenimiento de las características ecológicas del humedal.

Además, si bien las aguas subterráneas pueden ser volumétricamente una fuente menor de suministro de agua para algunos humedales, incluso una pequeña cantidad de agua subterránea puede ejercer un considerable impacto sobre la calidad del agua y, por tanto, sobre los procesos ecológicos y la biota del humedal. Por ejemplo, el cambio en la acidez de las aguas en un humedal puede conllevar a la desecación del mismo. Esto puede ocurrir por desbalances hidrológicos ya sea por aportes desde aguas superficiales o cambios en la calidad de las aguas subterráneas.

A medida que el agua fluye a través de un acuífero, disuelve los minerales que hay en el medio poroso, tales como el calcio, el sodio, bicarbonatos y cloruros, y la temperatura del agua acaba siendo igual a la del medio. A consecuencia de ello, las propiedades químicas y térmicas de las aguas subterráneas suelen ser bastante diferentes de las de las aguas superficiales. Por tanto, los humedales alimentados por aguas subterráneas suelen albergar comunidades de flora y fauna diferentes de los que se alimentan únicamente de aguas superficiales. Efectivamente, en algunos casos, la presencia o ausencia de determinadas especies que se sabe que necesitan de las aguas subterráneas puede ser un indicador de si un humedal depende o no en gran medida del aporte de aguas subterráneas.

Es esencial que los encargados del manejo del humedal y los organismos a quienes compete la protección y el mantenimiento de las características ecológicas de los humedales tengan la posibilidad de influir y contribuir a la elaboración de los planes y estrategias de manejo de las aguas subterráneas. Es también necesario, sin embargo, determinar el nivel de contribución técnica al manejo de los recursos hídricos que es preciso recabar de los responsables de la gestión del humedal.

Puede haber casos en que la interacción entre humedales y aguas subterráneas quede muy limitada o falte por completo, y la extracción de aguas subterráneas a partir de acuíferos locales puede tener muy pocas repercusiones para los humedales. En cambio, hay casos en que la extracción de aguas subterráneas de un acuífero profundo situado a considerable

¹⁵ Tomado de las directrices según Ramsar, 2007.

distancia del humedal puede tener efectos no previstos, pero muy importantes, para la hidrología y, por ende, para las características ecológicas de un humedal.

Por ahora Ramsar, ha elaborado un marco preliminar en siete etapas. En el que figuran cuestiones clave o esferas de interés que hacen parte del marco de ordenación de cuencas hidrográficas; concebidas para proporcionar la información y los conocimientos pertinentes en relación con las aguas subterráneas a fin de apoyar la integración de las aguas subterráneas dentro del manejo de los humedales a escala de cuenca hidrográfica.

En la Tabla No. 21 se indica la correspondencia entre las etapas para el manejo de las aguas subterráneas y las etapas de manejo de las cuencas hidrográficas.

Cuando una etapa corresponde tanto a la columna de las aguas subterráneas (lado izquierdo) como a la columna de manejo de cuencas hidrográficas (lado derecho), significa que la etapa en cuestión de la metodología para el manejo de cuencas hidrográficas comprende implícitamente aspectos propios de las aguas subterráneas y no se ofrecen lineamientos independientes en relación con las aguas subterráneas.

Tabla No. 21. Correspondencia en las etapas de manejo de aguas subterráneas y cuencas hidrográficas, Ramsar 2007.

Marco para el manejo de aguas subterráneas	Metodología clave para el manejo de cuencas hidrográficas
Etapa 1. Marcos de políticas, reglamentarios e institucionales	
Etapa 2. Proceso de participación de los interesados directos en la configuración de las etapas.	
Etapa A: Exploración selectiva para identificar los humedales potencialmente asociados con aguas subterráneas.	Etapa 3 i) Inventario de los humedales de la cuenca o cuencas.
Etapa 3ii): Evaluación del estado actual y tendencias.	
Etapa B: Modelo conceptual de las interacciones entre aguas subterráneas y humedales.	Etapa 3 iii): Determinar la función de los recursos hídricos de los humedales.
Etapa C: Análisis de situación de los impactos combinados, estado actual y tendencias, centrado en la interfaz entre aguas subterráneas y humedales.	
Etapa 4. Establecimiento de prioridades acordadas para los humedales de la cuenca.	
Etapa D: Determinar las necesidades de aguas subterráneas de los humedales.	Etapa 5. Establecimiento de objetivos de manejo cuantitativo para los humedales.
Etapa E. Convenir y fijar asignaciones de aguas subterráneas para los humedales, y límites a la explotación de las aguas subterráneas.	
Etapa F: Especificar acciones y estrategias de manejo respecto de las aguas subterráneas para los humedales de la cuenca, e incluirlas en el plan de manejo de tierras y aguas para la cuenca.	Etapa 6. Plan de manejo de los usos del agua y el suelo para la cuenca.
Etapa 7a: ejecución a nivel de humedal.	
Etapa 7b: Ejecución a nivel de cuenca.	
Etapa G. Monitoreo y evaluación de las aguas subterráneas.	Etapa 8. Seguimiento y elaboración de informes a nivel de cuenca y de humedal.
Etapa 9. Examen, reflexión y revisión de las prioridades.	

6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS.

Etapa A: Exploración selectiva para identificar humedales potencialmente asociados con aguas subterráneas.

Los humedales deben considerarse en tres dimensiones dentro del paisaje: las más comúnmente conocidas del contorno lateral y el tamaño de un humedal, así como su morfología, están más fuertemente influidas por la topografía y la hidrología. Sin embargo, no pueden entenderse completamente las funciones de un humedal en relación con el agua sin considerar también su marco geológico.

Según como sea la geología del subsuelo y el entorno, un humedal estará más o menos fuertemente asociado y en dependencia con aguas subterráneas. La exploración selectiva a escala de cuenca hidrográfica indicara la probabilidad de que los humedales de la cuenca estén fuertemente asociados con las aguas subterráneas y puede indicar así mismo los tipos de interacción que cabe esperar. Sin embargo, harían falta estudios más detallados, posiblemente con visitas *in situ* incluidas, para confirmar dichas asociaciones en el caso de humedales concretos.

La exploración selectiva exigirá la superposición de mapas geológicos, de vegetación y de usos del suelo. Además, deberán reunirse cifras generales sobre índices de recarga y de extracción (dichas cifras podrán obtenerse probablemente a partir de los planes de manejo de los recursos hídricos ya existentes) a fin de determinar el lugar de explotación de los recursos freáticos. El resultado del ejercicio será descubrir humedales que estén conectados con aguas subterráneas (como sitios de recarga y descarga) y que exijan un ulterior estudio detallado.

Etapa B: Modelo conceptual de las interacciones entre aguas subterráneas y humedales.

Para cada humedal, identificado en el ejercicio de exploración selectiva, que pueda sufrir las consecuencias de una explotación actual o futura de las aguas subterráneas debe elaborarse un modelo conceptual. Este podría ser un simple ejercicio de despacho o podría comprender detallados estudios de campo y modelos numéricos. La elaboración de modelos conceptuales ha de comenzar por definir los mecanismos de transferencia de agua mediante los cuales el agua entra y sale de cada humedal.

Calcular un balance hídrico puede ayudar a cuantificar las contribuciones de agua de diversas fuentes y posibles recargas de aguas subterráneas a los acuíferos. El balance hídrico debe calcularse para diferentes estaciones y tanto para condiciones de humedad como de sequía. Debe explicitarse el margen de incertidumbre en la estimación de la magnitud de los mecanismos de transferencia de agua a fin de presentar un contexto de riesgo.

Esta información es necesaria para cuantificar el grado de dependencia de un humedal con respecto a las aguas subterráneas e, inversamente, la dependencia potencial de un acuífero respecto de los humedales con él asociados, de modo que las necesidades de aguas subterráneas de los humedales asociados puedan cuantificarse e, inversamente, la necesidad de contribución de los humedales para la recarga de aguas subterráneas pueda cuantificarse igualmente.

Etapa C: Análisis de situación de los impactos combinados, estado actual y tendencias, centrado en el interfaz entre aguas subterráneas y humedales.

En la mayoría de las cuencas hidrográficas que poseen recursos explotables de aguas subterráneas puede haber numerosos individuos o empresas que extraigan agua de las perforaciones, y esa extracción puede no estar suficientemente controlada, especialmente cuando las aguas subterráneas se consideran legalmente propiedad privada. Es posible que extracciones suplementarias de aguas superficiales no sean conocidas ni controladas.

Es de vital importancia que toda evaluación del estado actual de los humedales asociados a aguas subterráneas incluya también la evaluación de los impactos, separados y combinados, de la extracción y la descarga de aguas subterráneas y aguas superficiales de la cuenca. Es igualmente importante estudiar como los cambios de la cubierta superficial de las tierras y las características del suelo pueden afectar la recarga de un acuífero y, en consecuencia, el suministro de agua al humedal. De igual forma, se hace preciso estudiar posibles situaciones más complejas de cambio climático o cambio en los usos del suelo, pues debe utilizarse la unidad de captación o de un acuífero para estimar como pueden cambiar en el futuro las interacciones entre las aguas subterráneas y humedales.

Etapa D: Determinar las necesidades de aguas subterráneas de los humedales

La cuantificación de los mecanismos de transferencia de aguas proporciona el componente hidrológico de la evaluación de las interacciones entre humedales y aguas subterráneas. En general, el ecosistema de humedal (incluidos sus componentes, suelos, plantas y animales, sus funciones, recarga de aguas subterráneas o ciclo de nutrientes y biodiversidad etc.) se adaptara al régimen hidrológico, incluida la magnitud, la frecuencia, la duración y el ritmo temporal de los mecanismos de transferencia de agua. Aunque los cambios de gran envergadura en la hidrología del humedal provocaran normalmente importantes cambios en las características ecológicas, algunos cambios de menor alcance en la hidrología pueden no desembocar en alteraciones ecológicas.

Esta etapa exige determinar las necesidades preferentes de agua del ecosistema de humedal y su sensibilidad al cambio hidrológico, su capacidad de resistencia y su capacidad de adaptación. Ello permite definir las consecuencias del cambio hidrológico para el ecosistema de humedal.

Etapa E: Convenir y fijar asignaciones de aguas subterráneas para los humedales, y límites a la explotación de las aguas subterráneas.

Las necesidades de aguas subterráneas de los humedales deben explicitarse de manera que puedan incluirse al determinar el rendimiento sostenible del acuífero y la consiguiente asignación de los recursos hídricos disponibles para los diferentes usos. De este modo, las consecuencias para la salud del humedal de las diferentes opciones de asignación de aguas subterráneas pueden resultar visibles para los responsables del manejo de los recursos hídricos y para la sociedad en su conjunto, y pueden incluirse en los planes de asignación de agua de la cuenca. En muchos casos no se dispondrá de suficiente agua para satisfacer todas las demandas. Sin embargo, si los responsables de tomar las decisiones conocen las

consecuencias para las características ecológicas y para los medios de vida que dependen de ello, las necesidades de agua de los humedales pueden estudiarse juntamente con los demás usos del agua.

Debe asignarse agua suficiente a los humedales de superficie o subterráneos que dependan del acuífero, a fin de mantener las características ecológicas deseadas, aunque ello puede exigir un compromiso con las extracciones permitidas con fines industriales, domésticos o agrícolas. Las asignaciones globales de agua a partir de las aguas subterráneas, incluidas las asignaciones para el mantenimiento de los humedales, deben determinarse paralelamente a escala de cuenca o acuífero y a escala de cada humedal.

Etapa F: Especificar acciones y estrategias de manejo respecto de las aguas subterráneas para los humedales de la cuenca, e incluirlas en el plan de manejo de tierras y aguas para la cuenca.

Algunas estrategias específicamente relacionadas con las aguas subterráneas pueden incluirse en el plan de manejo de tierras y aguas para la cuenca, a fin de minimizar los impactos de la explotación de las aguas subterráneas sobre los humedales asociados a ellas. Por ejemplo:

- Las aguas subterráneas pueden ser la fuente más importante de agua para un humedal en determinadas épocas del año, tales como la estación seca o durante períodos de sequía, de modo que puede permitirse una mayor extracción durante los períodos húmedos, cuando el humedal no corre riesgo, a fin de compensar una menor extracción cuando el humedal se encuentra en situación crítica.
- No deben practicarse perforaciones junto al humedal allí donde el cono de depresión podría reducir el nivel del agua en el humedal y provocar la degradación de las características ecológicas.
- Allí donde los humedales se alimenten tanto de aguas de superficie como de aguas subterráneas, existe la posibilidad de atender las necesidades de agua en diferentes estaciones a partir de fuentes diferentes (manejo conjunto). Por ejemplo, un humedal previamente alimentado por aguas subterráneas podría sostenerse o rehabilitarse mediante aportaciones de agua de superficie a partir de una represa situada aguas arriba. Sin embargo, es también vital tener en cuenta las necesidades del humedal en materia de calidad del agua, dado que la calidad de las aguas superficiales puede ser muy diferente de la calidad de las aguas subterráneas.

Etapa G: Monitoreo y evaluación de las aguas subterráneas

Especialmente en el caso en que los humedales están asociados con extensos acuíferos regionales, cuyos límites pueden rebasar la divisoria de aguas, es necesario vigilar el estado de las aguas subterráneas y la demanda de éstas, paralelamente con la vigilancia del estado y la respuesta de los humedales a los cambios en la disponibilidad de aguas subterráneas.

Debe haber también una vigilancia a largo plazo de las tendencias observadas en los niveles de las aguas subterráneas en sitios o en regiones donde tiene lugar la explotación intensiva del recurso o es probable que se dé en el futuro, incluidos aquellos casos de amplia utilización de métodos de captación de aguas subterráneas a pequeña escala (v.g.: efectos multiplicadores del uso agrícola de bombas hidráulicas de pedales por pequeños agricultores).

La vegetación de los humedales puede proporcionar un indicador de alerta temprana frente a extracciones excesivas a corto plazo (v.g.: mediante el llamado “estrés” de agua). Una importante empresa minera está utilizando este criterio con éxito para regular la extracción de aguas subterráneas a lo largo del río Limpopo en el África austral. Sin embargo, la lectura de piezómetros es el método preferido para evaluar los efectos de la extracción en la mayoría de los casos.

Los conjuntos de datos a largo plazo sobre características y variabilidad de las aguas subterráneas son generalmente limitados, en parte debido a la dificultad de medir el volumen de las aguas subterráneas, y en parte debido a que el nivel y la calidad de las aguas subterráneas tiende a variar lentamente en respuesta al clima u otras presiones, por lo que los períodos de medición deben ser notablemente más largos a fin de establecer perfiles naturales, tanto espaciales como temporales, de variabilidad de las aguas subterráneas. La ausencia general de datos hace que resulte esencial adoptar un planteamiento adaptativo para el establecimiento y la consecución de objetivos. Debe ponerse en marcha un programa de monitoreo apropiado para recoger información retroactiva a fin de perfeccionar el modelo conceptual y, en consecuencia, reforzar los requisitos de determinación de las aguas subterráneas de los humedales y pulir o revisar las asignaciones efectivas de aguas subterráneas a los humedales como una forma de manejo adaptativo.

7. CONCLUSIONES

La presente investigación ha logrado constatar a través de los diversos esquemas de trabajo la conexión entre las aguas subterráneas y el humedal Laguna de Sonso.

A partir de la caracterización hidroquímica se observa que la zona Sur y Oriental del humedal presenta las mayores concentraciones iónicas de todos los cuerpos de agua. Las concentraciones de aquellas especies recientes o de menor meteorización se hace evidente en los pozos de monitoreo de las haciendas La Gloria (costado Oriental) y la hacienda El Guabito (costado Sur). A su vez las concentraciones que indican un mayor grado de meteorización se presenta en el pozo de observación de Villa Lobín ubicado en el costado Norte entre la Laguna y el Río Cauca.

La Laguna presenta valores de concentración menores que en el costado Sur y Oriental de las especies evaluadas, indicando una posible mezcla del agua proveniente desde ese sector. Posteriormente el agua evaluada en la zona Norte del acuífero muestra valores menores a los mostrados en la Laguna, este comportamiento permite inferir una línea de flujo que avanza desde el Sur y Oriente del humedal, pasa por la Laguna y evacua en el sector Norte hacia el sector de la Isabela y Bello Horizonte.

El análisis isotópico ha permitido desmitificar la creencia de la conexión del Río Sonso y el acuífero adyacente al humedal. Los resultados de Deuterio y Oxígeno 18 no han mostrado ninguna semejanza entre las aguas del Río, el acuífero y mucho menos con las de la Laguna.

Sin embargo para los meses de Agosto y Septiembre de 2009 las aguas del Río Sonso que fueron muestreadas en el piedemonte de la cordillera central, registraron una misma marcación isotópica que las aguas muestreadas en el Río Cauca a la altura de la estación Mediacanoa. Esto es interesante en la medida que a unos 5 Km aguas arriba de la desembocadura del Río Sonso la marcación isotópica en el Río Cauca no coincide con la marcación obtenida en la estación de Mediacanoa. Por tanto se puede establecer la existencia de una mezcla de agua significativa entre las aguas del Río Cauca y las aguas de escorrentía de la cordillera central.

Los resultados de la isotopía en la Laguna no muestran una interacción clara con ninguno de los cuerpos de agua del hidrosistema. No obstante el comportamiento de la concentración isotópica en este cuerpo indica una concentración por evaporación y por tanto un gradiente de flujo de abajo hacia arriba, que permite inferir una zona de manantial.

El Río Guadalajara fue noticia en este análisis, pues la marcación isotópica en sus aguas es similar en Septiembre y Octubre de 2009 a la marcación obtenida en la zona Norte del acuífero, esto puede conducir a la conclusión que las aguas lluvias provenientes de esa

cuenca de drenaje están llegando hasta el acuífero adyacente a la laguna y puede representar un potencial fuente de recarga.

Por último si se tiene en cuenta que el margen de error del análisis realizado por el Instituto Ingeis de Bs.As. Es de ± 0.2 ; la concentración de Tritio puede indicar que las aguas del Río Guadalajara y los tres puntos del acuífero son aguas mucho más recientes que las aguas contenidas en el nivel superior (nivel A) del acuífero regional del Valle del Cauca, la cual esta datada como agua menores a 50 años.

La piezometría ha permitido ratificar el comportamiento de las líneas de flujo subterráneo hacia la Laguna de Sonso desde dos frentes a saber; Sur-Norte y Oriente-Occidente. Una variación en esta apreciación se observa en las líneas de flujo proveniente del Río Guadalajara en donde se observa un gradiente desde el Río mencionado hacia la Laguna, describiendo una trayectoria Norte-Sur.

Pese a que se tiene una buena densidad de pozos de observación de niveles freáticos, la optimización del trazado de las redes de flujo en cercanías del Río Cauca y de la Laguna de Sonso debe ser analizado con más detalle, pues la convergencia de las líneas equipotenciales no necesariamente describe un flujo paralelo hacia el Río y por el contrario llegar a intersectar ya sea al Río o a la misma Laguna. Para verificar este procedimiento se requiere establecer un gradiente con cotas detalladas sobre el nivel del Río hasta la estación de Mediacanoa e incluirlas en la interpolación. De igual forma se requeriría conocer el comportamiento de los niveles freáticos en el margen izquierdo del Río Cauca.

Como se ha mencionado con anterioridad el balance hídrico realizado en este estudio, ha permitido establecer la importancia de los aportes de las aguas subterráneas hacia el humedal Laguna de Sonso. Para realizar este cálculo se escogió el período de estudio coincidente con las fechas de monitoreo de los piezómetros que a su vez coincidió con un período de bajos niveles en el Río Cauca y de baja pluviosidad pese a que en el resto del país el fenómeno Enzo arreciaba con una fuerte temporada de lluvias. Esto favoreció la simplificación de variables de entrada requeridas para el cálculo del balance hídrico.

Los resultados obtenidos describen de buena manera el comportamiento de la totalidad del hidrosistema. El método escogido para el cálculo de la evapotranspiración mostro un comportamiento adecuado para las características de la zona, no subestima ni sobredimensiona las salidas del sistema. Los aportes de los tributarios del costado Oriental se mantiene dentro de los rangos aforados históricamente por CVC y arrojan resultados lógicos con respecto al comportamiento de la escorrentía por riego y drenaje de la zona. La estación El Vinculo no registró información pluviográfica en algunos meses del período de estudio, eso imposibilito tener un dato de balance para ese mes en específico. Se recomienda la instalación de una estación hidroclimatológica en cercanías de la Laguna que permita acceder a datos en tiempo real y que sirva como referente de los eventos sucedidos en esa zona ya que el método de Thiessen puede desviar fuertemente las tendencias y afectar los valores reales de precipitación.

La expresión de Darcy/Dupuit para estimar el intercambio de aguas subterráneas con cuerpos de aguas superficiales demostró ser un método eficiente y de buen ajuste para la

ecuación de balance. Los valores obtenidos permitieron deducir que los aportes de aguas subterráneas pueden llegar a representar hasta un 40% de las entradas totales al sistema (teniendo en cuenta que el Río Cauca no realiza aportes en este período).

En general el balance hídrico arrojó resultados satisfactorios respecto a otros trabajos. Los valores encontrados para cada variable guardaron una buena proporción respecto a los valores totales, muestra de ello fue la comprobación realizada por medio del valor de cierre de la ecuación de balance hídrico, en donde se relaciono los valores de almacenamiento propuestos por el PMAI (2005) y los resultados de las demás variables. El resultado valido los procedimientos escogidos.

La implementación de la expresión de Custodio & Lamas (2001) para determinar la influencia de las variaciones de los niveles freáticos respecto a las oscilaciones del nivel en un cuerpo de agua superficial, arrojó una primera aproximación del límite de protección de las aguas subterráneas alrededor del humedal. No obstante se recomienda implementar un modelo de resolución más fina para determinar la influencia de variables como el bombeo de pozos profundos, la precipitación y la temperatura local entre otros.

Finalmente se hace necesario divulgar este trabajo entre las entidades pertinentes para involucrar la gestión del recurso hídrico subterráneo como mecanismo de protección de una de las principales componentes del sistema hidrológico del humedal Laguna de Sonso.

La aplicación del modelo de oscilación piezométrica en función de los niveles de la Laguna por medio de series de Fourier propuesto por Custodio (2001), permitió encontrar una primera aproximación del límite de explotación de las aguas subterráneas en inmediaciones del Humedal Laguna de Sonso. Si bien es cierto que la oscilación registrada en los piezómetros (50 cm) solo describe los cambios en la zona superior del acuífero, no se debe subestimar el aporte de los flujos locales al mantenimiento de la ecohidrología de la Laguna pues la declinación de los mismos no solo afectaría de manera directa sus niveles medios; sino que indicaría también la disminución de los volúmenes base del acuífero regional.

Se recomienda aplicar esta misma expresión usando variables inherentes al acuífero regional para lograr un valor más preciso de los límites de explotación de aguas subterráneas como medida de protección y de gestión integrada del recurso hídrico en el Humedal.

8. BIBLIOGRAFÍA

Asoyotoco. Plan de manejo ambiental integral Humedal la Laguna de Sonso Municipio de Guadalajara de Buga. Cali, Febrero de 2007.

Caracterización y Modelación del matemática del Río Cauca, Tramo Salvajina - La Virginia - Volumen I, Universidad del Valle-CVC, 2001.

Castany G. Tratado práctico de aguas subterráneas. Ediciones Omega, Barcelona 1971.

Custodio & Llamas. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, 2001.

D. Santa. Identificación de interacciones hidrológicas entre el humedal Ciénaga Colombia y el acuífero libre del bajo Cauca Antioqueño. Universidad de Antioquia, Medellín 2009.

Freeze & Cherry. Groundwater, Vancouver 1975.

Hernández, M.F. (2005). Estudio de la Calidad del Agua y Estado Trófico de la Laguna de Sonso. Tesis de Maestría para optar al Título de Maestría en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle, Colombia.

Hidráulica subterránea principios básicos. Sanchez J. Depto de Geología, Universidad de Salamanca. Enero de 2008.

Isotopos ambientales en el ciclo hidrológico. IGME. Temas: Guías y manuales. ISBN: 84-7840-465-1.

Jaramillo J. Introducción a las ciencias del suelo. Facultad de Geociencias, Unal sede Medellín, 2001.

Lexow C. Hidrodinámica de la zona no saturada. Universidad de la Pampa, Santa Rosa 2010.
Linsley et Al. Hidrología para ingenieros. Ediciones Mc Graw Hill, Stanford 1977.

Marios Sophocleus, Hydrogeology Journal. Interaction between ground water and surface ground water No 10 , Febrero 2000.

Medina G. Paéz G. Hidrogeoquímica e isotopía de los acuíferos de la zona sur del Departamento del Valle del Cauca. CVC. Cali, Marzo de 2006.

Medina G., Aprovechamiento y Variación de las Reservas de Aguas Subterráneas en el Valle del Cauca. CVC, 1994.

R. Rhenals. Validación del modelo hidrogeológico del Occidente Antioqueño mediante técnicas isotópicas e hidroquímicas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2009.

Secretaría de la convención Ramsar, 2007. El manejo de las aguas subterráneas: Lineamientos para el manejo de las aguas subterráneas a fin de mantener las características ecológicas de los humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 3ª edición, vol. 9. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).

USGS. Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water, Techniques and methods. Virginia, USA, 2008.

Velez M. Victoria. Hidráulica de aguas subterráneas. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín, 2004.

ANEXOS

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Ubicación, construcción y nivelación topográfica de piezómetros.

Anexo B. Análisis de Scholler y Piper para cada una de las campañas de muestreo.

Anexo C. Estadísticos básicos de cada parámetro diferenciados por tipo de cuerpo de agua.

Anexo D. Resultados de los análisis de isótopos realizados por el instituto Ingeis

Anexo E. Correlaciones litológicas

Anexo F. Base de datos de los niveles mensuales registrados hasta la fecha de la red de baterías piezométricas.

Anexo G. Líneas isopiezas correspondientes a los meses de junio de 2009 a marzo de 2010.

Anexo H. Valores de caudal obtenidos para la expresión.

Anexo A.
Ubicación, construcción y nivelación
topográfica de piezómetros.

A.1. UBICACIÓN DE LAS BATERÍAS PIEZOMÉTRICAS Y POZOS DE MONITOREO

Inicialmente se realizó una localización previa sobre planos de los puntos en los cuales se construirían las baterías piezométricas alrededor de la laguna de Sonso para la medición de niveles de agua subterránea, pero las condiciones reales de inundación, rutas de acceso, seguridad y el objetivo de la medición observadas en visitas de campo realizadas a la zona, hicieron necesaria la reubicación de estos puntos, teniendo en cuenta las áreas inundadas durante la creciente de febrero - marzo de 1999 registradas en el Proyecto de Modelación del Río Cauca (Univalle - CVC, 2007).

Posterior a la revisión mencionada anteriormente, se ubicaron y georeferenciaron los puntos en los cuales quedaron construidas las 20 baterías piezométricas (incluyendo piezómetros y pozos de monitoreo), considerando además la localización de los pozos profundos y aljibes de la zona que también pueden ser utilizados para medición de niveles. En total se construyeron 32 piezómetros y 4 pozos de monitoreo, para un total de 38 puntos de medición. El listado de los puntos y su ubicación se presentan en la tabla 1.

CODIGO	ESTE	NORTE	LOCALIZACION
B01 - PM 1	1082983	921754	Pozo de Monitoreo Hacienda La Miel
B02	1082902	921855	Hacienda La Miel
B03	1083796	921056	Hacienda San Isidro
B04	1083842	921121	Hacienda San Isidro
B05	1084229	918652	Hacienda Guaymaral
B06	1084151	918669	Hacienda Guaymaral
B07	1083109	916727	Hacienda Guayabito
B08 No. 1	1082628	916775	Hacienda Guayabito
B08 No. 2	1082753	916735	Hacienda Guayabito
B09	1081377	915801	Hacienda Samanes
B10	1082409	915491	Hacienda Samanes
B11	1079015	915531	Hacienda El Guavito
B12 - PM 3	1079036	915407	Hacienda El Guavito
B13	1078321	916629	Hacienda La Rochela
B14	1078270	916669	Hacienda La Rochela
B15	1083663	917962	Hacienda La Gloria
B16 - PM 2	1083748	917936	Pozo de monitoreo La Gloria
B17	1081044	920665	Hacienda Bello Horizonte
B18 - PM 4	1081055	920616	Pozo de Monitoreo Bello Horizonte
B19	1081498	920517	Hacienda La Isabella
B20	1081567	920414	Hacienda La Isabella
Aljibe 1	1078990	915558	Hacienda El Guavito
Aljibe 2	1082390	915507	Hacienda Los Samanes
Aljibe 3	1083150	916682	Hacienda Guayabito
Aljibe 4	1083659	917964	Hacienda La Gloria
Aljibe 5	1081520	920414	Hacienda La Isabella
Aljibe 6	1081053	920637	Hacienda Bello Horizonte

B: Batería piezométrica

PM: Pozo de monitoreo

A.2. MÉTODO DE PERFORACIÓN

Los métodos de perforación utilizados para la construcción de los pozos de monitoreo y piezómetros fueron manual con Auger y mecánico por percusión con martillo de perforación neumático, retirando las muestras con cuchara de válvula. El sistema de perforación por percusión se presenta en la fotografía 1.



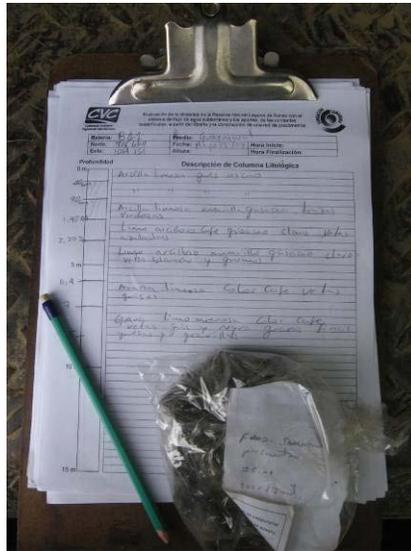
Fotografía 1. Perforación por percusión

Las perforaciones se realizaron en un diámetro de 4" para los piezómetros y 8" para los pozos de monitoreo.

A.3. CONSTRUCCIÓN DE PIEZÓMETROS Y POZOS DE MONITOREO

A.3.1. Perforación

Las perforaciones se realizaron en un diámetro de 4" para los piezómetros y 8" para los pozos de monitoreo. Durante cada perforación se llevó un registro de campo detallado que incluyó las coordenadas de cada punto, nomenclatura de cada batería o pozo de monitoreo, localización (predio), profundidad a la que ocurre cada cambio de formación, descripción litológica de cada muestra, profundidad a la que se encontró el primer nivel de agua, profundidad y diámetro de perforación, cambios observables en el nivel de agua relacionados con la profundidad del pozo y el nivel del agua final de la perforación. Adicional a lo anterior se tomaron muestras del material acuífero encontrado, en el cual quedó ubicado el respectivo filtro. El registro de la perforación y toma de muestras se presenta en la fotografía 2.



Fotografía 2. Registro de campo y toma de muestras

A.3.2. Revestimiento

Para el revestimiento de los piezómetros y pozos de monitoreo se utilizó tubería PVC RDE 21 de 2" y 4" respectivamente.

A.3.3. Filtros

Los filtros se realizaron con tubería PVC RDE 21 ranurada en diagonal cada 3 cm con dos cortes en el contorno del tubo. La tubería fue ranurada manualmente con segueta de acuerdo a la longitud de cada filtro dejando entre 0.30 m y 0.50 m al final del tubo como desarenador, tal como se muestra en la fotografía 3.



Fotografía 3. Corte de ranuras para la elaboración de filtros.

A.3.4. Filtro de grava

Para la filtración de materiales finos se utilizó grava No.1 y No. 2 (2 mm – 6 mm), entre la pared de la perforación y la tubería ranurada. La grava instalada quedó aproximadamente 1 m por encima del filtro dependiendo de la profundidad del nivel de agua encontrado. En la fotografía 4 se presenta el proceso de adición del filtro de grava.



Fotografía 4. Filtro de grava

A.3.5. Sello de bentonita

Una vez instalado el filtro de grava en el piezómetro se colocaron por encima de éste una capa entre 0.30 m y 0.50 m de bolas de bentonita elaboradas manualmente, las cuales evitan que la capa de concreto que sella la superficie libre entre la tubería y la perforación se mezcle con el filtro de grava, obstruyendo el flujo del agua. Fotografía 5.



Fotografía 5. Sello de bentonita

A.3.6. Sellado en concreto y protección

El sello final correspondió a una capa de concreto desde la capa de bolas de bentonita hasta la superficie del terreno, sobresaliendo 0,10 m por encima del nivel del terreno en una formaleta de 0.30 m x 0.30 m, sobre la cual sobresale una cubierta en lamina galvanizada de 0.20 m de altura con tapa y llave. Para los pozos de monitoreo y piezómetros ubicados en zonas inundables se utilizaron tubos de cemento que sobresalen 0.90 m por encima de la superficie de terreno. En la fotografía 6 se presenta el proceso de sellado en concreto y la tapa de protección.



Fotografía 6. Sellado en concreto y tapa de protección

A.4. NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA

El trabajo sobre el levantamiento topográfico de planimetría y altimetría de las baterías piezométricas localizadas alrededor de la Laguna de Sonso describe los siguientes pasos:

Se hizo reconocimiento de campo con 2 comisiones de topografía de los 40 piezómetros y aljibes localizados en las haciendas LA ROCHELA, EL GUAVITO, LOS SAMANES, GUAYAVITO1, LA GLORIA, GUAYMARAL, SAN ISIDRO, LA MIEL, LA ISABELA, BELLO HORIZONTE Y LA MARIA con el fin de saber la localización exacta en terreno y a la vez que los propietarios o mayordomos nos dieran el permiso de entrar a cada lugar obviamente presentado el permiso otorgado por la fundación.

Se empezó la búsqueda de los GPS más cercanos al sitio de trabajo como el GPS#17 localizado sobre la baranda del puente sobre el río Cauca a la altura de media canoa, el GPS#43 localizado cerca al mirador dentro de la laguna de Sonso el cual no se encontró. Finalmente la altimetría de todos los piezómetros quedó amarrada o ligada al GPS#17-IGAC. Ver fotografía 7.

Una comisión de topografía se dedicó solamente a hacer nivelaciones y contra nivelaciones de los piezómetros y aljibes. Este trabajo se realizó de la siguiente manera:

En cada una de las haciendas se materializó un BM ya sea sobre concreto o en una parte sólida. Se empezó la nivelación desde la placa GPS#17 hasta el BM#1 y luego se contra niveló del BM#1 hasta la placa o desde la placa hasta el BM#1 y así sucesivamente del BM#1 al BM#2 y del BM#2 al BM#1.

Estas nivelaciones y contra nivelaciones se hicieron con un error permisible de 0.001 milímetro cada 100 metros o 0.01 centímetro por kilómetro, esto se hace con el fin de tener errores de nivel y la información está escrita en una cartera o libreta de nivel donde se tomaron todos los datos de campo. Como observación se hace énfasis en que no se corrigieron cotas en los cambios la libreta está tal cual como se tomó en campo.



Fotografía 1. GPS IGAC # 17 puente sobre río Cauca – Mediacanoa.

La otra comisión de topografía se dedicó a hacer levantamiento planimétrico con una estación total se empezó a levantar todo lo existente alrededor de los piezómetros como referencia del trabajo campo.

El producto a entregar fue en terreno materialización de todos los BMs. 2 libretas claras limpias y legibles con toda la información de campo, fotos de cada uno de los sitios de trabajo y 12 planos, uno general y 11 de cada una de las haciendas donde se encuentran ubicados los piezómetros (ver anexo 1 y registro fotográfico)

Se empleó personal de topografía, personal nativo de la zona, vehículo, canoa y planchón. Equipos de nivel, estación total y GPS. En la tabla 1. Se resume la localización planimétrica y de altimetría referida a las coordenadas IGAC de cada uno de los piezómetros.

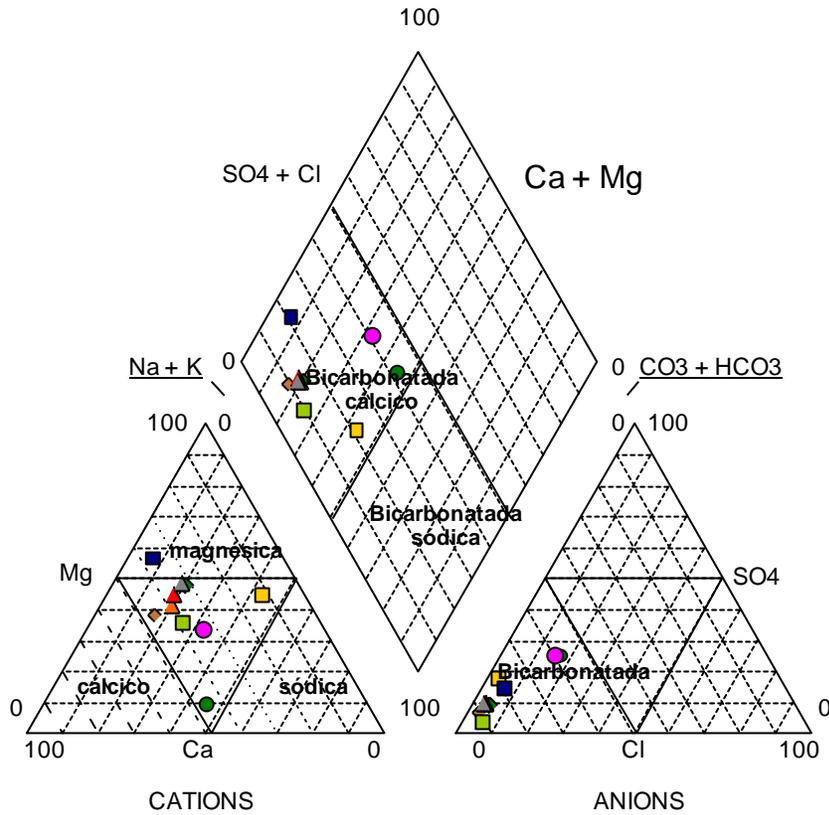
Tabla 1. Nomenclatura, planimetría y altimetría de los piezómetros

HACIENDA	PIEZOMETRO	NORTE	ESTE	ELEV./BORDE TUBO
LA ROCHELA	Vb-pz-1	916,983.827	1,077,935.652	934,777
	Vb-pz-2	916,982.330	1,077,937.732	934,847
	Vb-pz-3	916,950.819	1,077,963.078	934,467
	Vb-pz-4	916,947.658	1,077,960.632	934,667
EL GUAVITO	Vb-pz-5	915,845.733	1,078,649.320	934,368
	Vb-pz-6	915,845.520	1,078,652.720	934,278
	Vb-pz-7	915,862.681	1,078,714.913	933,748
	Vb-pz-8	915,861.857	1,078,718.803	933,738
	Aljibe			934,388
LOS SAMANES	Vb-pz-9	915,845.201	1,081,980.646	938,724
	Vb-pz-10	915,844.080	1,081,982.882	938,804
	Vb-pz-11	915,824.139	1,082,056.422	939,344
	Vb-pz-12	915,826.201	1,082,057.731	939,304
	Aljibe	-	-	939,134
GUAYAVITO 1	Vb-pz-13	917,090.728	1,082,264.582	935,143
	Vb-pz-14	917,052.265	1,082,390.921	935,483
	Vb-pz-15	917,045.137	1,082,747.104	937,613
	Vb-pz-16	917,045.123	1,082,746.176	937,533
	Aljibe	-	-	937,079
	Aljibe	-	-	938,034
LA GLORIA	Vb-pz-17	918,284.431	1,083,305.253	935,533
	Vb-pz-18	918,255.302	1,083,389.683	935,243
	Vb-pz-19	918,258.049	1,083,389.909	935,293
	Aljibe	-	-	935,066
GUAYMARAL	Vb-pz-20	918,987.334	1,083,785.806	937,012
	Vb-pz-21	918,986.551	1,083,788.064	937,002
	Vb-pz-22	918,967.977	1,083,864.952	937,388
	Vb-pz-23	918,967.057	1,083,866.911	937,398
SAN ISIDRO	Vb-pz-24	921,372.579	1,083,435.790	935,954
	Vb-pz-25	921,371.962	1,083,439.086	935,984
	Vb-pz-26	921,440.449	1,083,479.187	936,444
	Vb-pz-27	921,438.928	1,083,481.106	936,454
	Aljibe	-	-	937,190
LA MIEL	Vb-pz-28	922,075.576	1,082,624.711	934,949
	Vb-pz-29	922,117.933	1,082,648.796	934,719
	Vb-pz-30	922,118.532	1,082,646.832	934,819
LA ISABELA	Vb-pz-31	920,737.038	1,081,208.892	934,048
	Vb-pz-32	920,735.513	1,081,204.800	934,078
	Vb-pz-33	920,833.073	1,081,140.681	934,128
	Vb-pz-34	920,832.531	1,081,136.176	933,638
BELLO HORIZONTE	Vb-pz-35	920,936.389	1,080,695.385	933,769
	Vb-pz-36	920,985.456	1,080,680.704	933,789
LA MARIA	Vb-pz-37	917,609.957	1,078,340.812	935,039
	Vb-pz-38	917,609.153	1,078,343.945	935,079
	Vb-pz-39	917,572.715	1,078,447.461	935,009
	Vb-pz-40	917,571.004	1,078,450.068	934,829
	Aljibe	-	-	934,389
	Aljibe	-	-	934,145
LAGUNA DE SONSO	LIMNIGRAFO	918,869.000	1,081,152.000	931,856

Anexo B.
Análisis de Scholler y Piper para cada
una de las campañas de muestreo.



CLASIFICACION DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA LAGUNA DE SONSO SEPTIEMBRE 2009



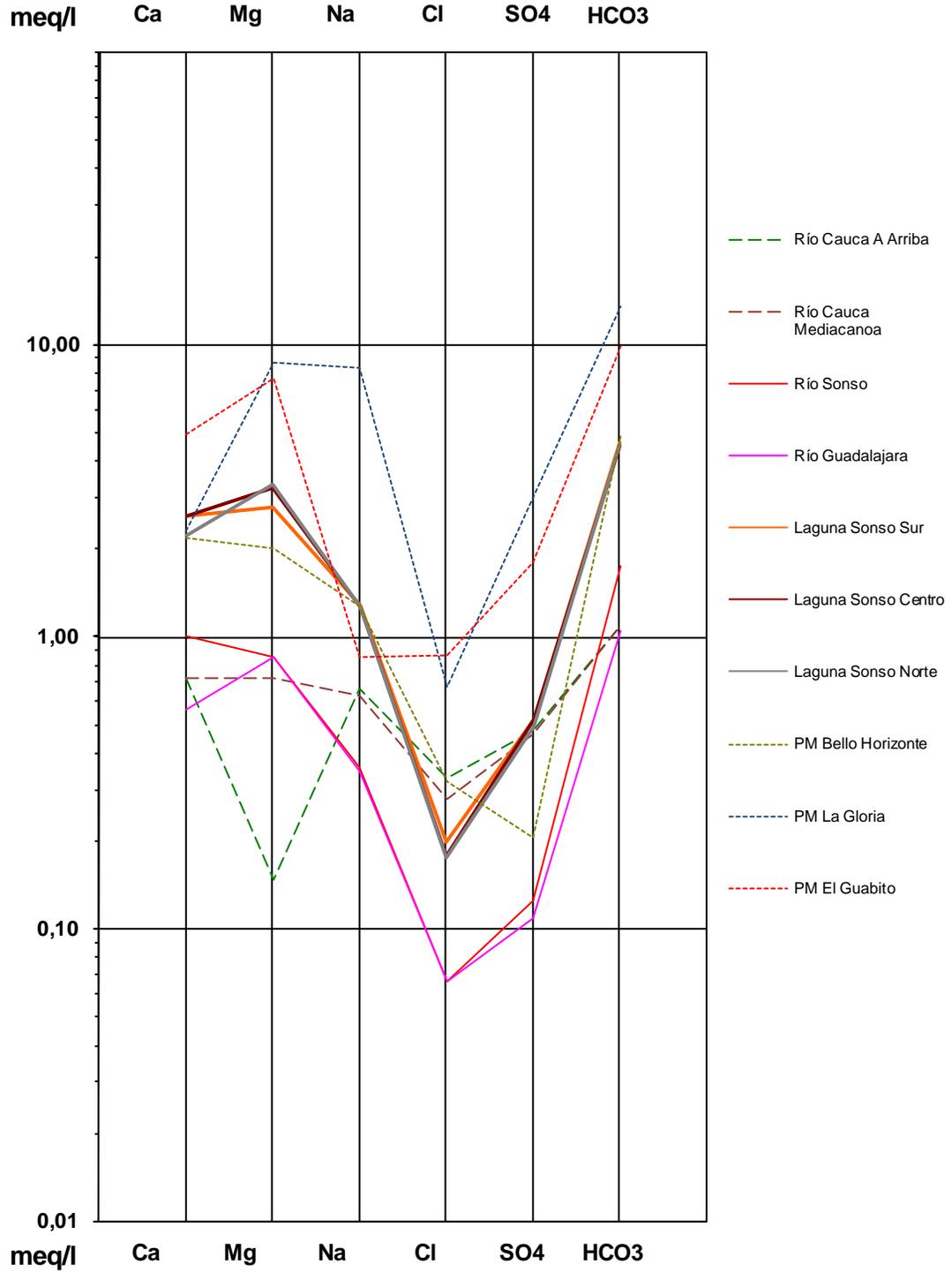
CATIONS

ANIONS

- Río Cauca A Arriba
- Río Cauca Mediacanoa
- ◆ Río Sonso
- ◆ Río Guadalajara
- ▲ Laguna Sonso Sur
- ▲ Laguna Sonso Centro
- ▲ Laguna Sonso Norte
- PM Bello Horizonte
- PM La Gloria
- PM El Guabito

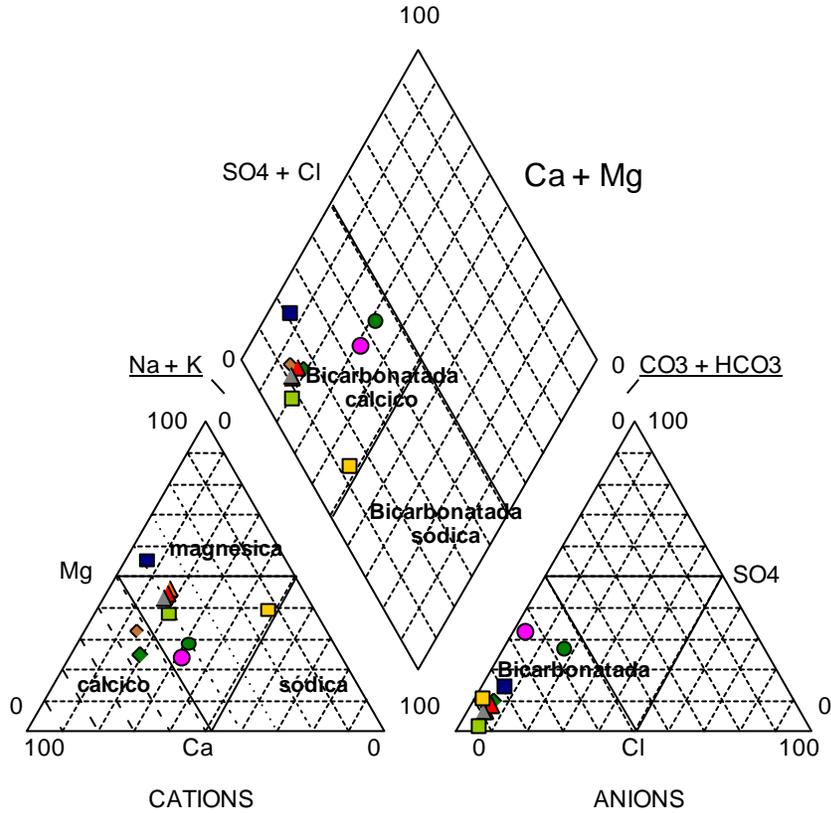


CLASIFICACION DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA LAGUNA DE SONSO SEPTIEMBRE 2009





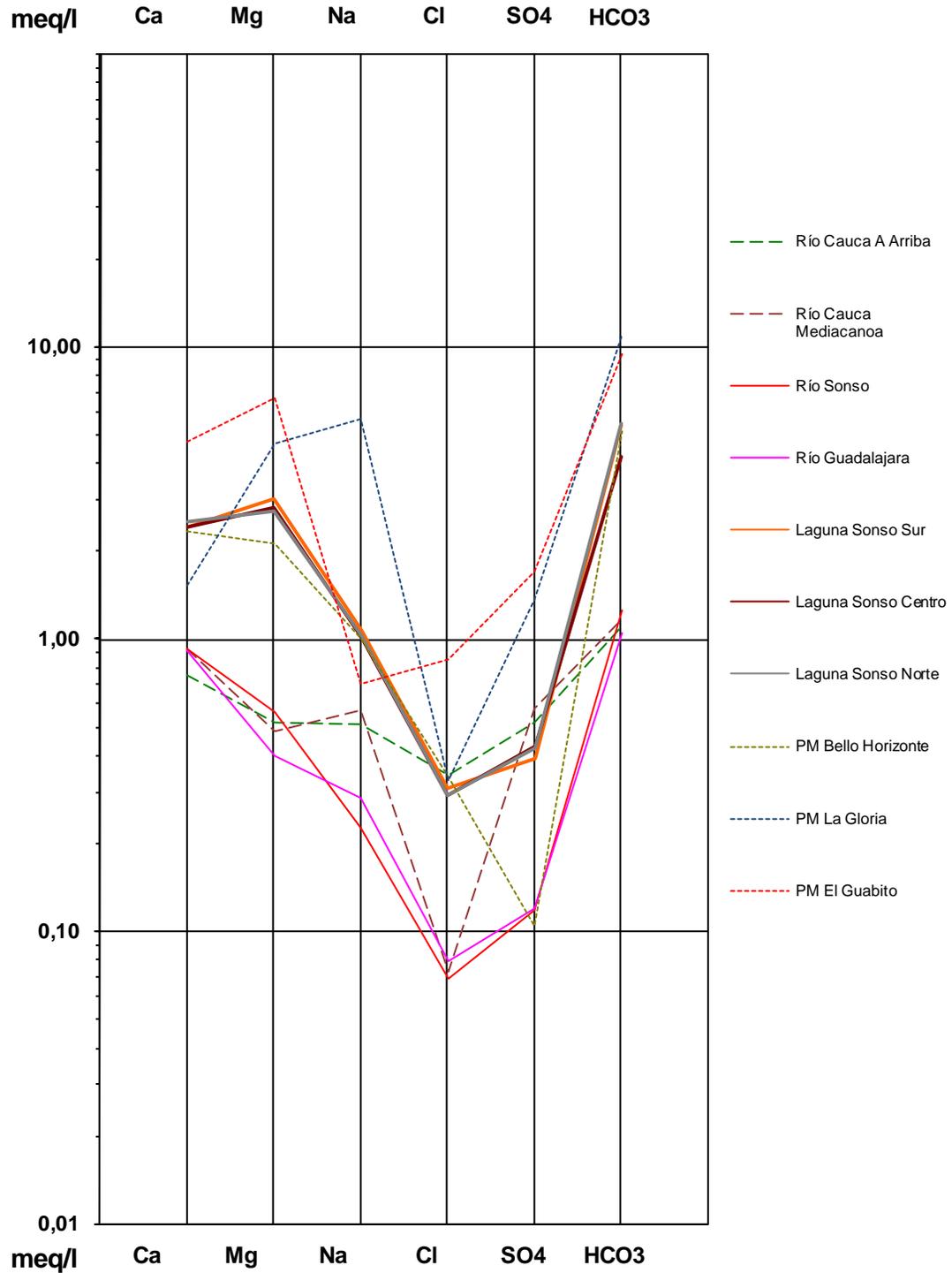
CLASIFICACION DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA LAGUNA DE SONSO OCTUBRE 2009



- | | |
|----------------------|------------------------|
| ● Río Cauca A Arriba | ● Río Cauca Mediacanoa |
| ◆ Río Sonso | ◆ Río Guadalajara |
| ▲ Laguna Sonso Sur | ▲ Laguna Sonso Centro |
| ▲ Laguna Sonso Norte | ■ PM Bello Horizonte |
| ■ PM La Gloria | ■ PME I Guabito |

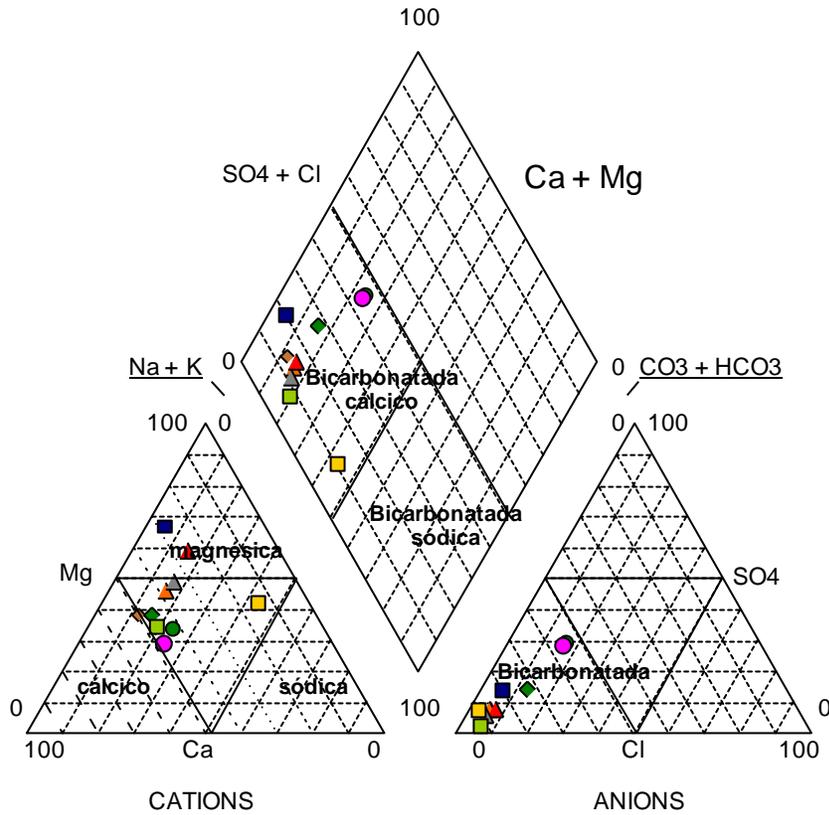


CLASIFICACION DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA LAGUNA DE SONSO OCTUBRE 2009





CLASIFICACION DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA LAGUNA DE SONSO NOVIEMBRE 2009



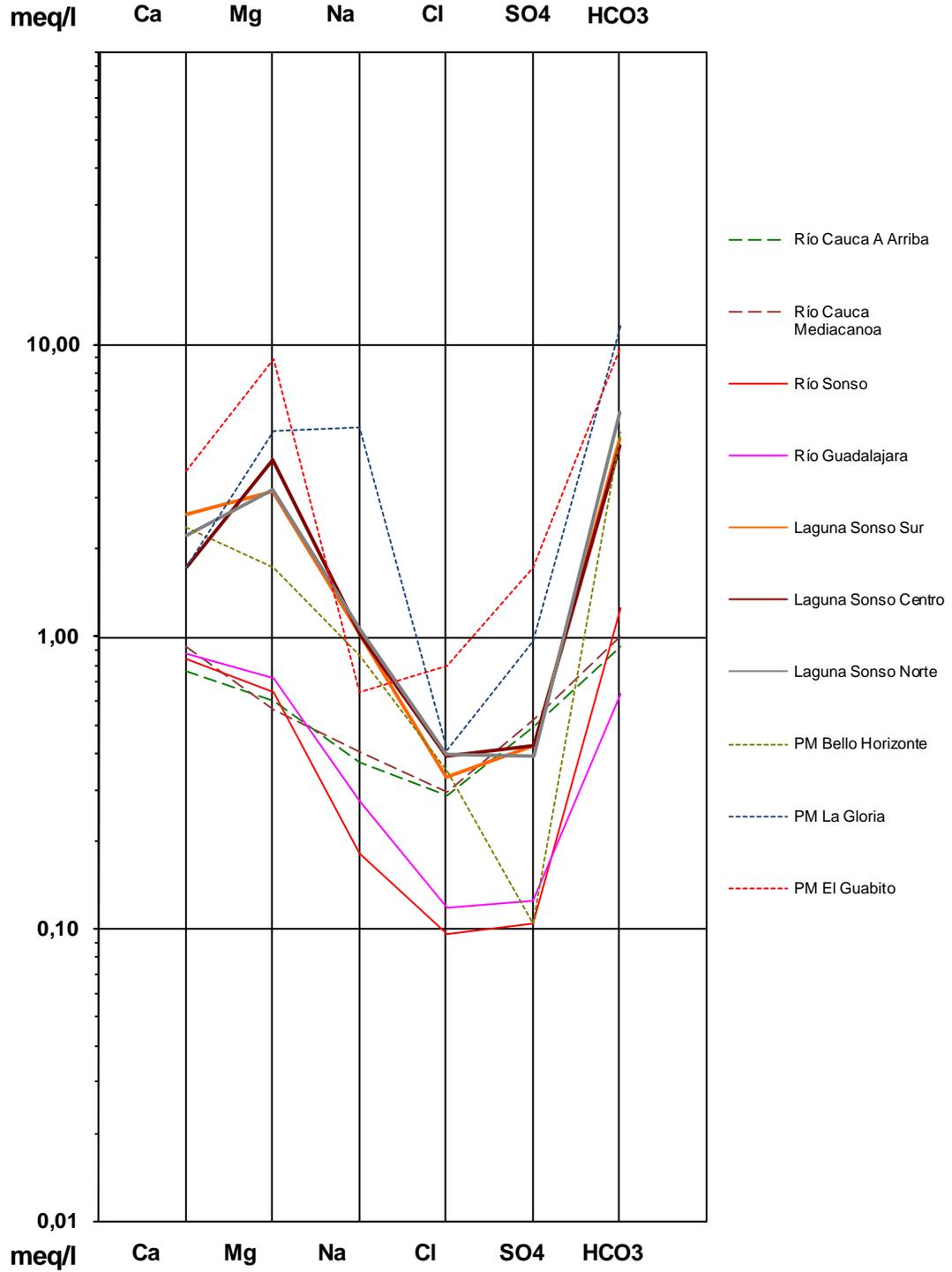
CATIONS

ANIONS

- Río Cauca A Arriba
- Río Cauca Mediacanoa
- ◆ Río Sonso
- ◆ Río Guadalajara
- ▲ Laguna Sonso Sur
- ▲ Laguna Sonso Centro
- ▲ Laguna Sonso Norte
- PM Bello Horizonte
- PM La Gloria
- PM El Guabito



**CLASIFICACION DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA LAGUNA DE SONSO
NOVIEMBRE 2009**



Anexo C.
Estadísticos básicos de cada parámetro
diferenciados por tipo de cuerpo de
agua.

Agosto

Subsistema	Estadístico	pH	CE(μS/cm)	CaCO3	HCO3	COT	SO4	Cl-
Aguas Superficiales	Promedio	8.03	188.17	2.35	61.90	0.00	16.47	8.01
	Desviación Estándar	0.42	12.61	4.08	12.42	0.00	9.94	4.06
	Varianza	0.17	159.05	16.61	154.21	0.00	98.86	16.49
	Coefficiente_Asimetria	1.29	1.70	1.73	0.54	0.00	-1.71	-1.70
Aguas Subterráneas	Promedio	8.47	826.67	20.60	390.60	0.00	47.47	20.23
	Desviación Estándar	0.21	349.68	18.18	155.42	0.00	42.45	15.88
	Varianza	0.04	122277.4	330.5	24155.08	0.00	1802.00	252.33
	Coefficiente_Asimetria	1.29	-1.12	0.00	-1.46	0.00	0.00	1.51
Laguna	Promedio	8.467	534.767	39.733	164.700	0.00	5.000	7.467
	Desviación Estándar	0.058	7.160	7.100	132.909	0.00	0.00	1.270
	Varianza	0.003	51.263	50.413	17664.730	0.00	0.00	1.612
	Coefficiente_Asimetria	-1.73	1.67	-0.04	-1.71	0.00	0.00	1.70

Septiembre

Subsistema	Estadístico	pH	CE(μS/cm)	CaCO3	HCO3	COT	SO4	Cl-	NO3	Ca	Mg	Fe	Na	K
Aguas Superficiales	Promedio	8.02	178.25	4.50	75.83	4.95	14.11	6.50	0.75	15.00	7.73	1.20	11.49	1.63
	Desviación Estándar	0.74	21.65	9.00	20.17	3.90	9.87	4.98	0.46	3.66	4.03	0.61	4.01	0.84
	Varianza	0.55	468.92	81.00	407.03	15.21	97.34	24.77	0.22	13.39	16.21	0.37	16.07	0.70
	Coefficiente_Asimetria	0.73	-1.04	2.00	1.96	2.00	0.00	0.10	-0.30	0.95	-1.84	-0.37	0.03	0.00
Aguas Subterráneas	Promedio	7.43	1010.00	0.00	573.67	27.30	80.00	21.90	2.94	62.80	73.73	31.69	80.73	3.40
	Desviación Estándar	0.20	483.43	0.00	268.20	42.09	67.31	9.75	2.16	31.04	43.31	31.24	97.95	2.26
	Varianza	0.04	233701.0	0.0	71930.33	1771.47	4530.54	95.16	4.65	963.79	1875.64	976.22	9593.66	5.10
	Coefficiente_Asimetria	-1.14	-0.65	0.00	-0.37	1.73	-0.41	-0.88	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Laguna	Promedio	8.513	565.667	16.167	279.667	24.360	24.667	6.527	1.506	49.700	37.633	6.297	29.233	1.850
	Desviación Estándar	0.102	4.933	6.877	4.509	33.731	0.68	0.428	0.389	4.157	3.573	2.067	0.306	0.291
	Varianza	0.010	24.333	47.293	20.333	1137.761	0.46	0.183	0.151	17.280	12.763	4.273	0.093	0.084
	Coefficiente_Asimetria	1.57	-1.65	1.72	-0.33	1.73	0.00	1.69	-1.04	-1.73	-1.39	1.04	-0.94	-0.31

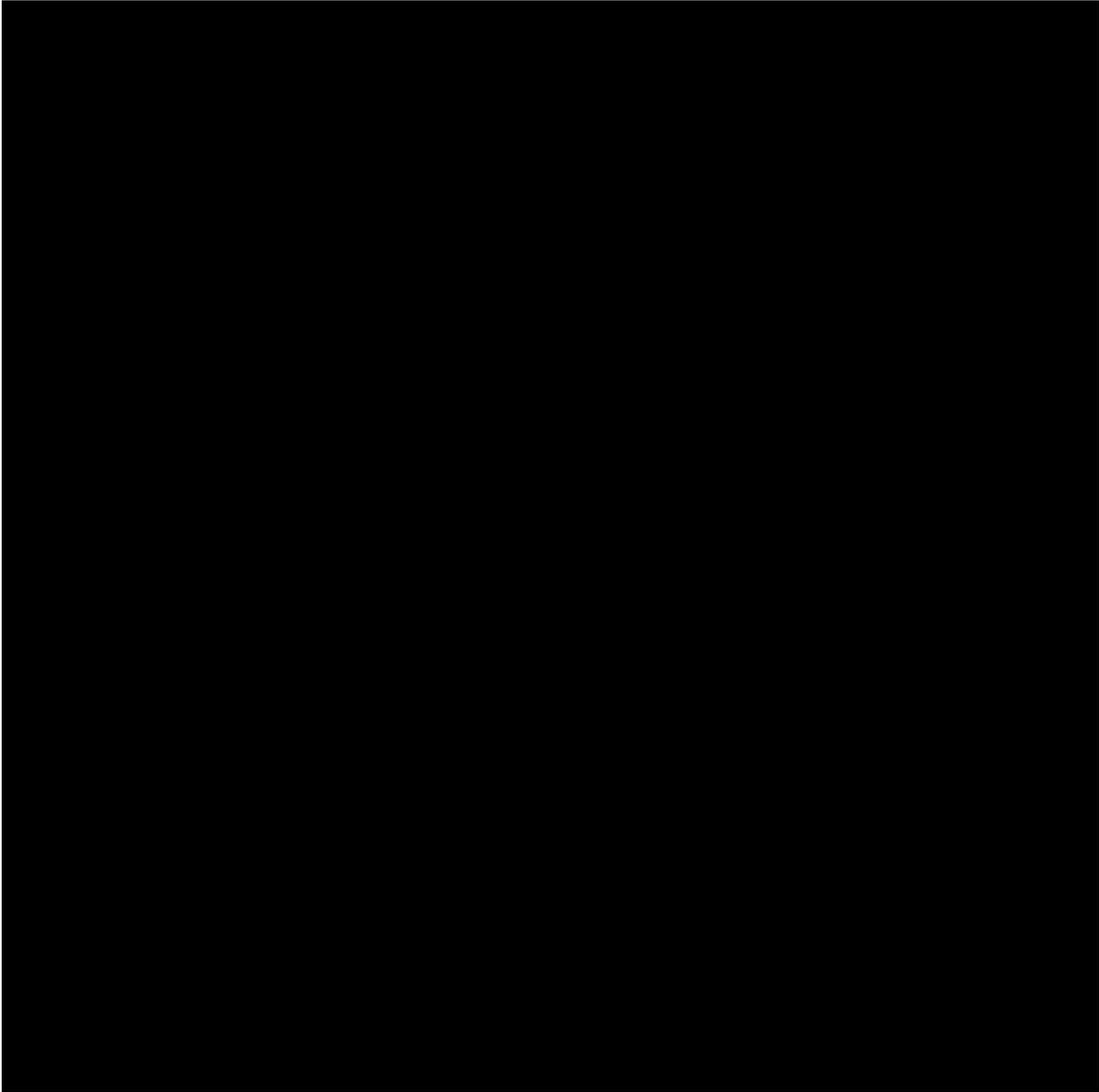
Octubre

Subsistema	Estadístico	pH	CE(µS/cm)	CaCO3	HCO3	COT	SO4	Cl-	NO3	Ca	Mg	Fe	Na	K
Aguas Superficiales	Promedio	8.20	187.00	2.85	69.95	3.00	15.99	5.01	0.30	17.60	5.96	1.22	9.16	1.88
	Desviación Estándar	0.52	33.15	3.78	5.23	0.00	11.95	4.80	0.17	1.60	0.83	0.16	3.88	1.01
	Varianza	0.27	1098.67	14.29	27.40	0.00	142.86	23.01	0.03	2.56	0.69	0.02	15.07	1.01
	Coefficiente_Asimetria	0.32	-1.58	1.10	0.45	0.00	0.04	1.99	0.39	-2.00	-0.74	-0.86	-0.02	0.00
Aguas Subterráneas	Promedio	7.58	893.67	0.00	520.33	3.00	50.80	17.97	1.45	57.20	54.47	11.27	56.50	2.54
	Desviación Estándar	0.17	337.13	0.00	184.64	0.00	40.48	10.68	1.40	33.36	27.75	9.51	63.75	2.18
	Varianza	0.03	113657.3	0.0	34092.33	0.00	1638.84	114.12	1.96	1113.07	770.09	90.41	4064.29	4.77
	Coefficiente_Asimetria	-1.17	-1.71	0.00	-1.25	0.00	-1.43	1.73	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Laguna	Promedio	8.390	561.667	4.567	307.000	5.497	19.967	10.600	0.517	49.167	34.700	2.700	23.933	1.920
	Desviación Estándar	0.075	7.638	7.910	42.579	1.144	0.95	0.346	0.382	1.222	1.709	0.175	0.666	0.212
	Varianza	0.006	58.333	62.563	1813.000	1.309	0.89	0.120	0.146	1.493	2.920	0.031	0.443	0.045
	Coefficiente_Asimetria	0.59	0.94	1.73	-1.68	-1.23	0.00	1.73	-0.54	0.94	0.52	0.26	1.69	-1.46

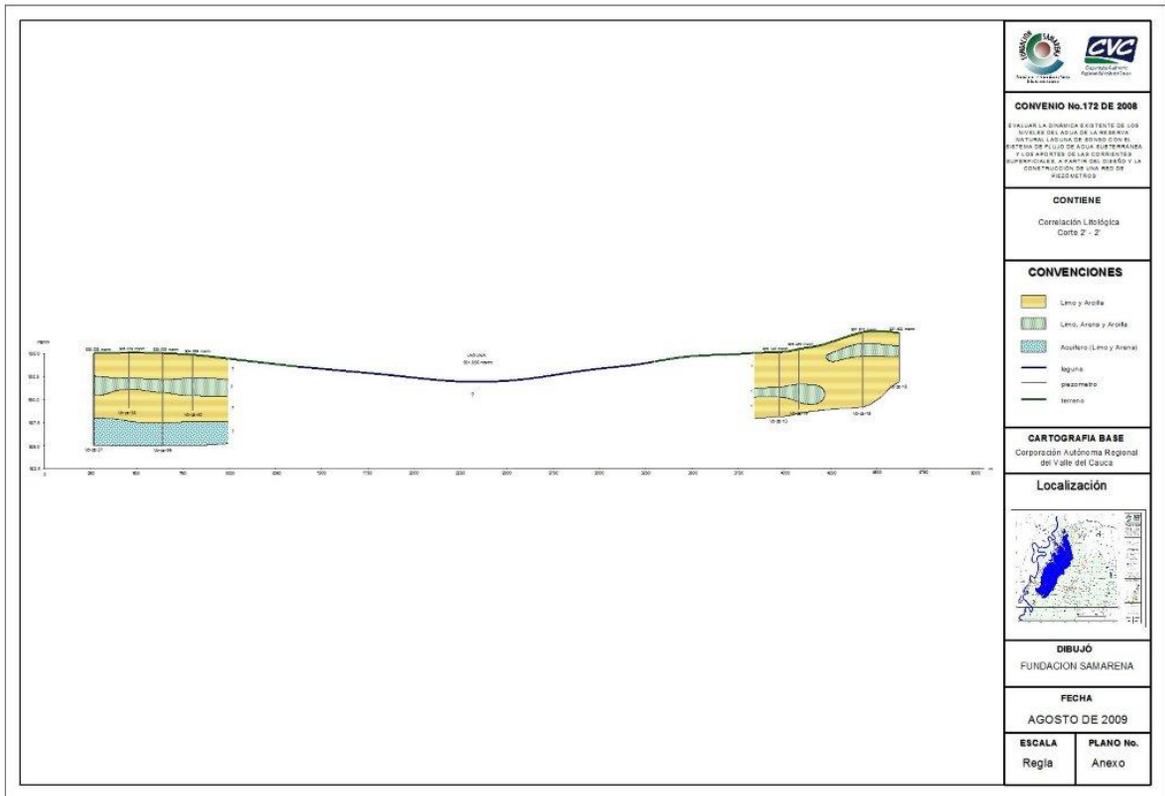
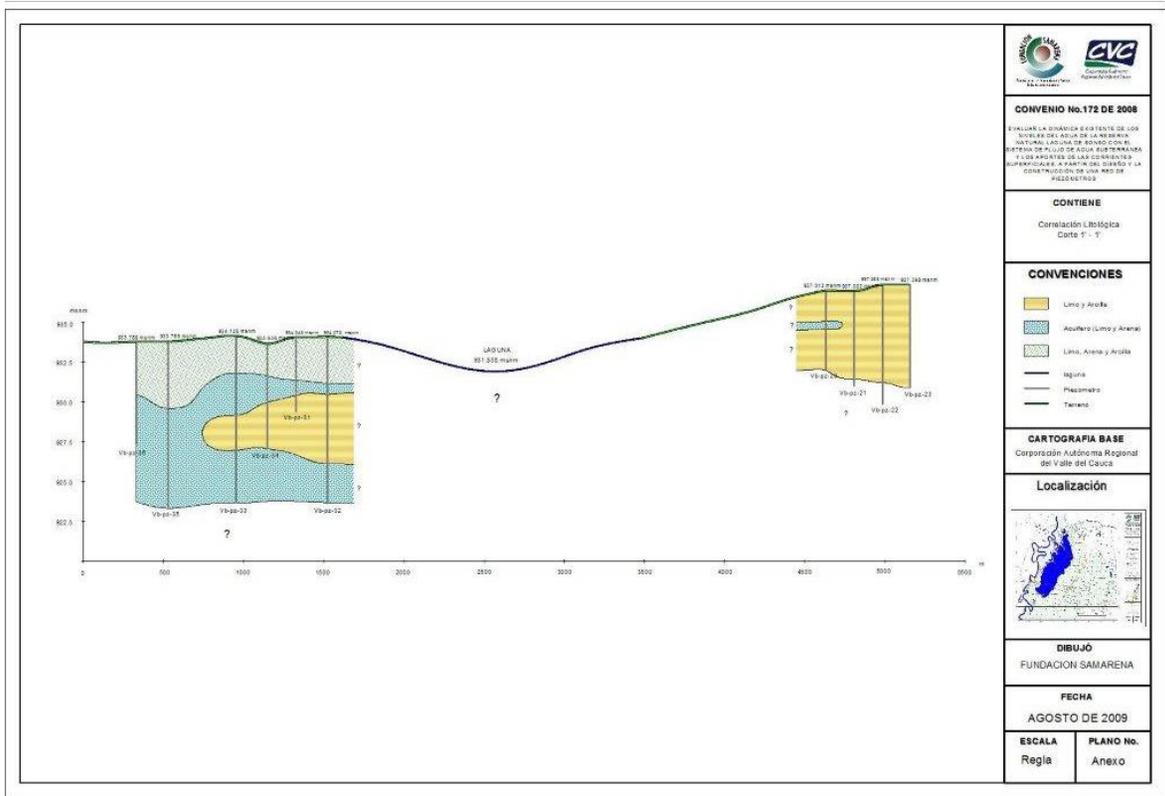
Noviembre

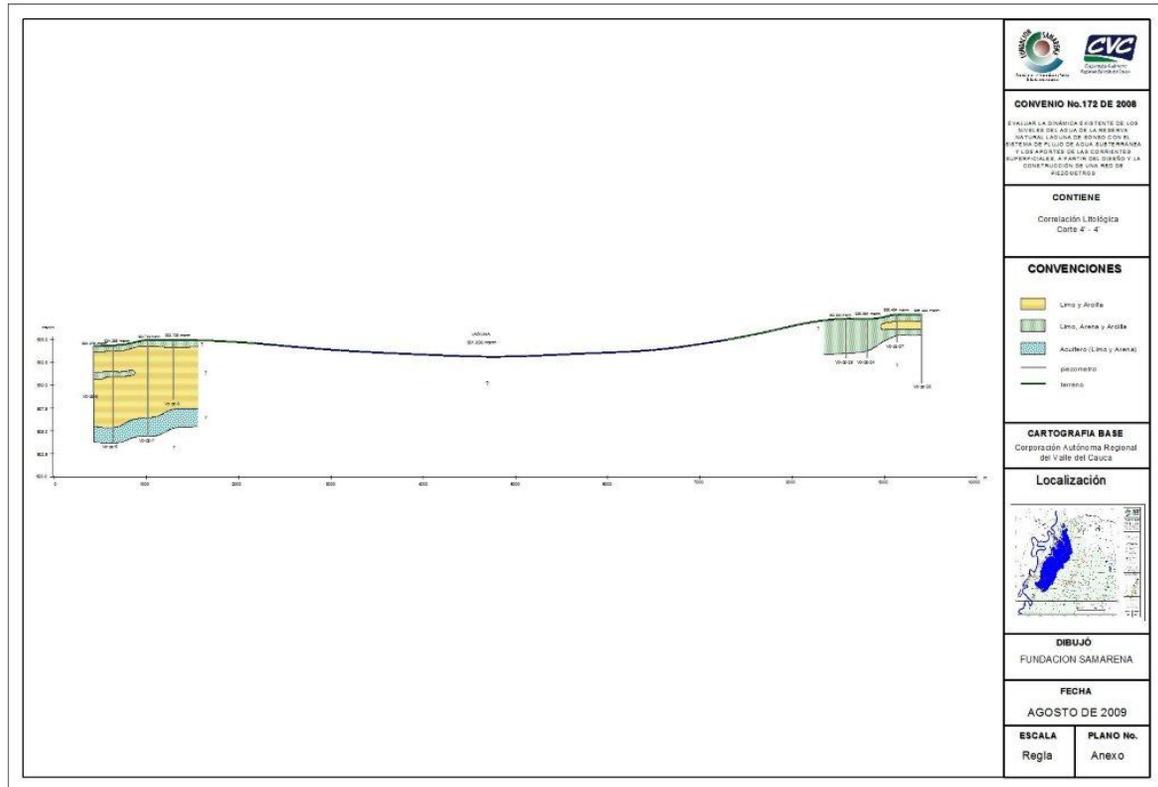
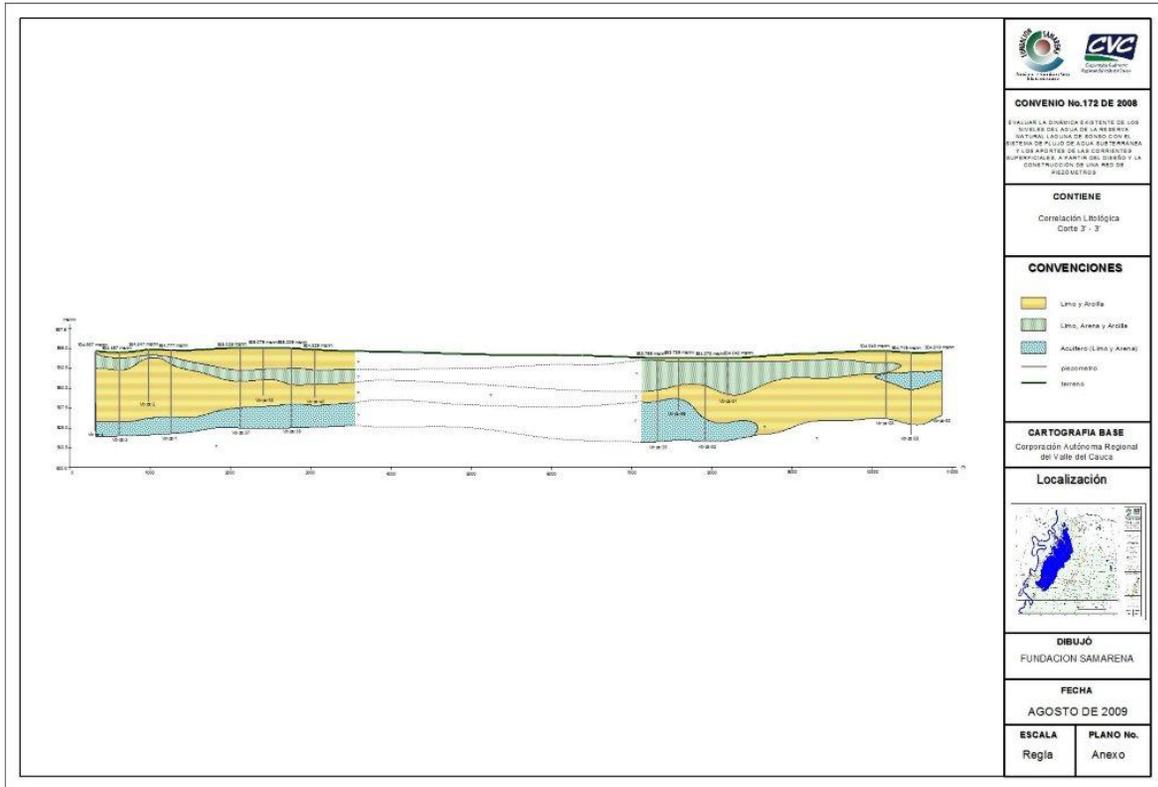
Subsistema	Estadístico	pH	CE(µS/cm)	CaCO3	HCO3	COT	SO4	Cl-	NO3	Ca	Mg	Fe	Na	K
Aguas Superficiales	Promedio	8.11	162.50	13.13	58.20	0.00	14.85	7.05	0.70	17.00	7.66	2.83	7.06	1.75
	Desviación Estándar	0.52	17.46	15.75	15.16	0.00	10.82	3.77	0.39	1.37	0.83	2.48	2.33	0.85
	Varianza	0.28	305.00	248.06	229.88	0.00	117.09	14.24	0.15	1.87	0.69	6.16	5.43	0.72
	Coefficiente_Asimetria	0.04	-0.16	0.37	-0.19	0.00	0.00	-0.04	1.40	-0.75	0.76	0.18	-0.61	0.00
Aguas Subterráneas	Promedio	7.76	877.67	0.00	537.00	0.00	45.00	18.37	2.10	52.13	63.40	11.48	51.23	2.33
	Desviación Estándar	0.22	332.00	0.00	208.73	0.00	39.32	8.59	2.69	20.48	43.59	6.02	58.74	1.87
	Varianza	0.05	110225.3	0.0	43567.00	0.00	1545.96	73.84	7.22	419.52	1899.91	36.29	3450.24	3.51
	Coefficiente_Asimetria	-1.01	-1.70	0.00	-1.30	0.00	-0.16	1.59	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Laguna	Promedio	8.530	580.667	11.000	307.333	0.00	19.867	13.233	0.872	43.833	41.800	2.683	23.667	1.843
	Desviación Estándar	0.053	7.024	10.536	45.369	0.00	1.01	1.242	0.197	8.848	5.910	1.138	0.462	0.023
	Varianza	0.003	49.333	111.000	2058.333	0.00	1.02	1.543	0.039	78.293	34.930	1.295	0.213	0.001
	Coefficiente_Asimetria	-1.46	0.42	-0.42	1.52	0.00	0.00	-1.72	1.62	-0.53	1.68	1.42	1.73	1.73

Anexo D.
Resultados de los análisis de isótopos
realizados por el instituto Ingeis



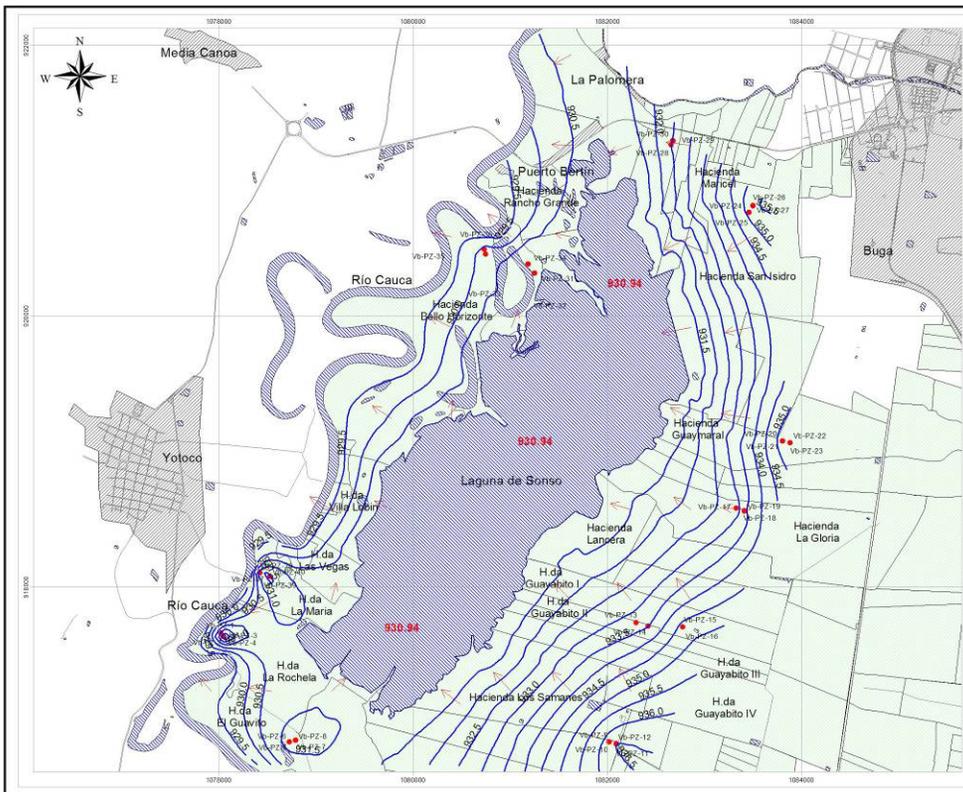
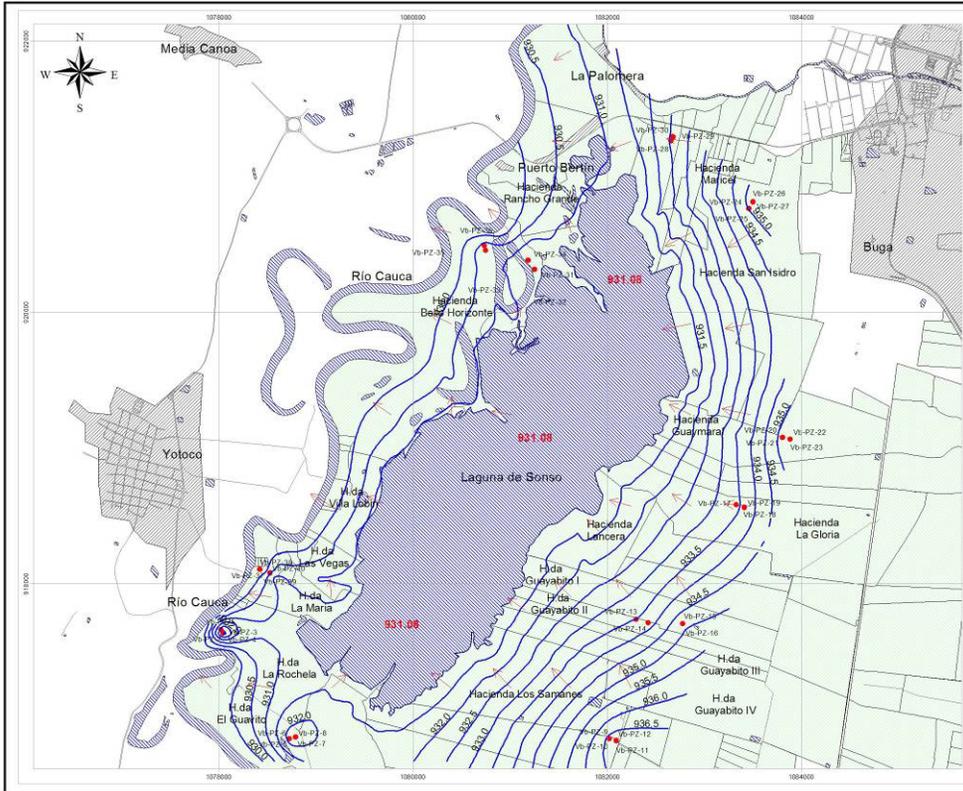
Anexo E. Correlaciones litológicas

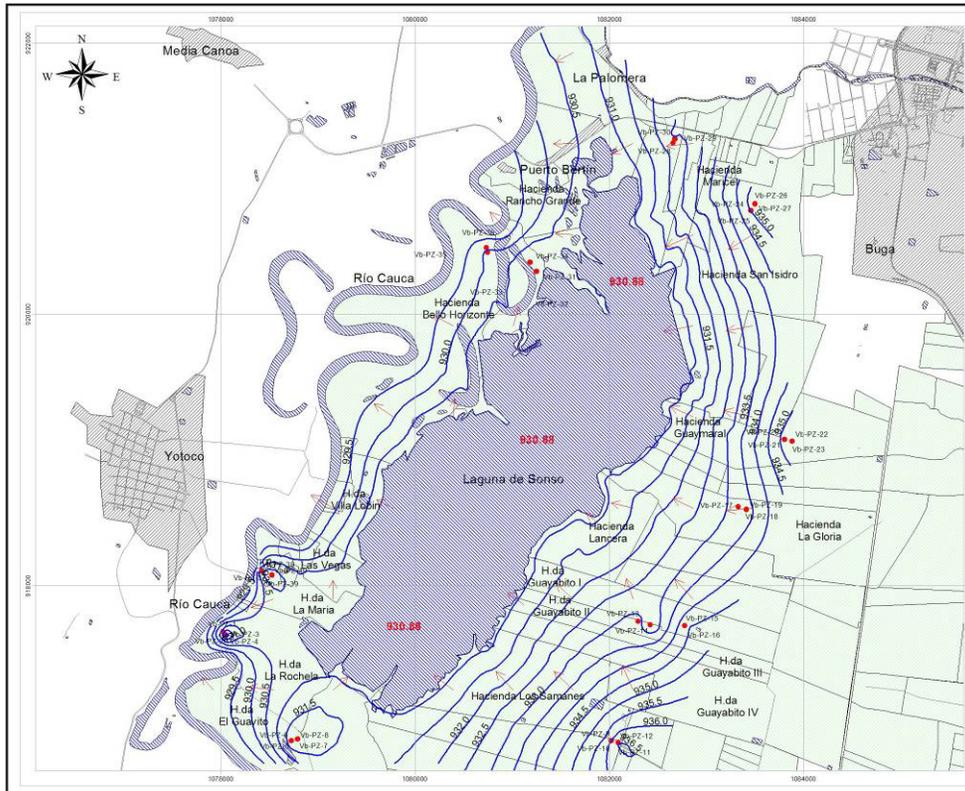




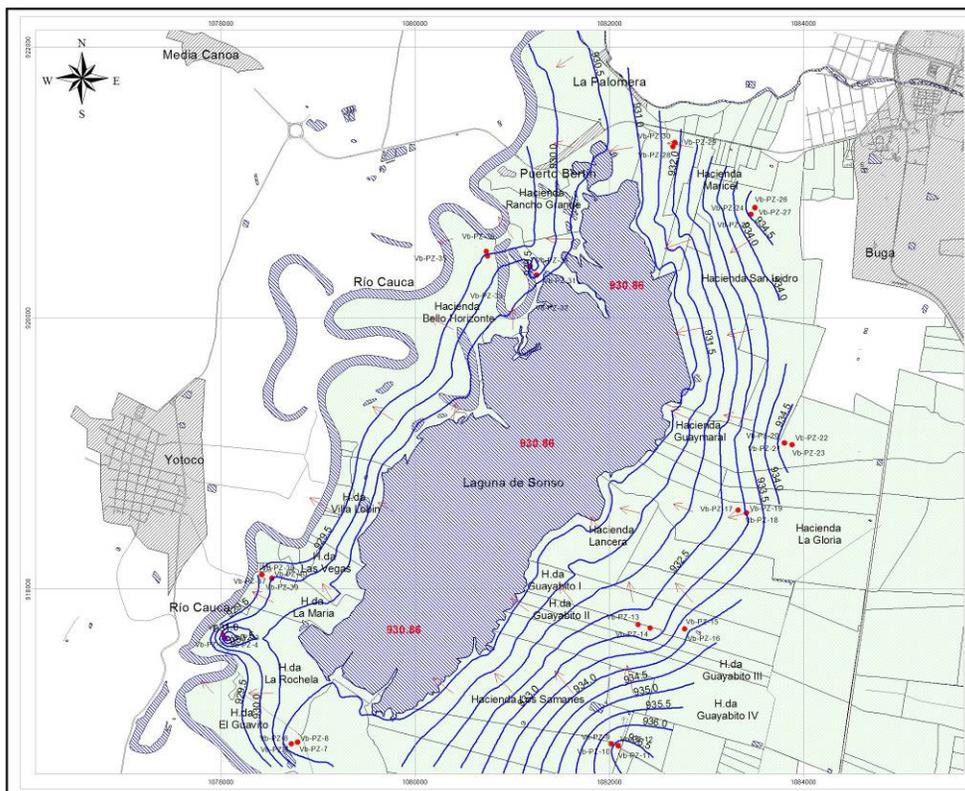
Anexo F.
Base de datos de los niveles mensuales
registrados hasta la fecha de la red de
baterías piezométricas.

Anexo G.
Líneas isopiezas correspondientes a los
meses de junio de 2009 a marzo de 2010.

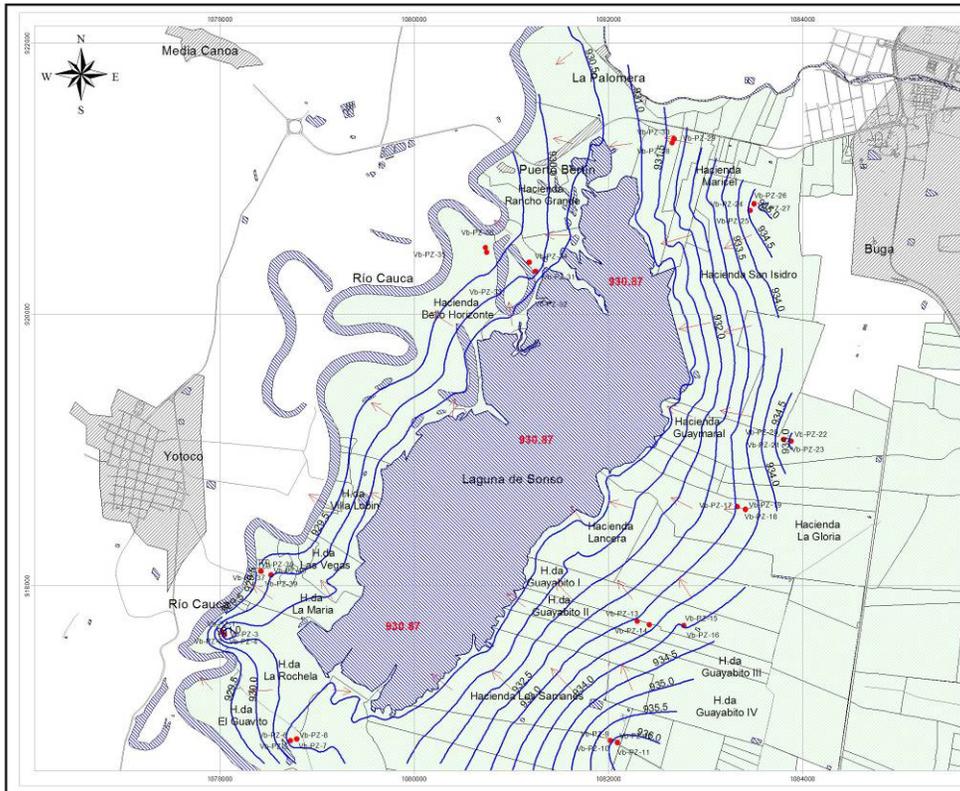




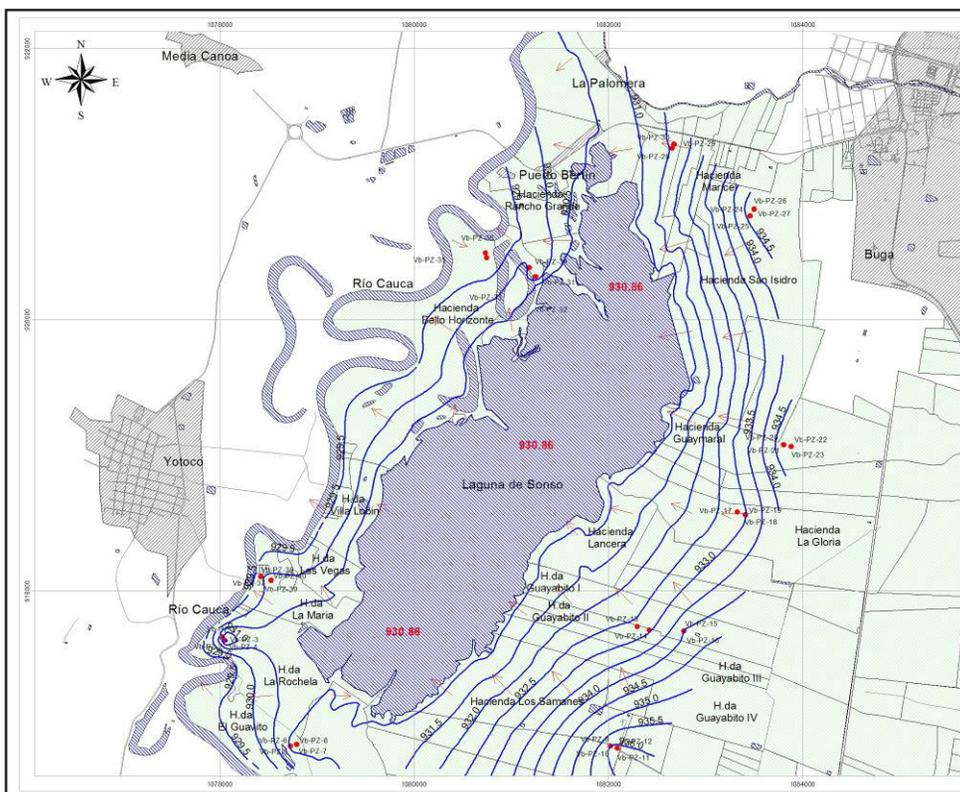
Proyecto EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA RESERVA NATURAL LAGUNA DE SONSO CON EL SISTEMA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LOS APORTES DE LAS CORRIENTES, A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED PIEZOMÉTRICA.	
Contiene NIVELES FREÁTICOS Y DIRECCIONES DE FLUJO (AGOSTO-2009)	
Cartografía Base CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA - CVC	
Convenciones Cuerpos de agua Zona Urbana Predios Localización de Piezómetros Nivel Freático Dirección de Flujo	
Localización Regional 	
Revisó Bio. Pablo Emilio Flores Ing. Juan Geovani Bernal	
Dibujó Ing. John Jairo Márquez Molina	
Fecha SEPTIEMBRE 17 de 2010	
Escala 1:25449	Plano No. 3 de 10



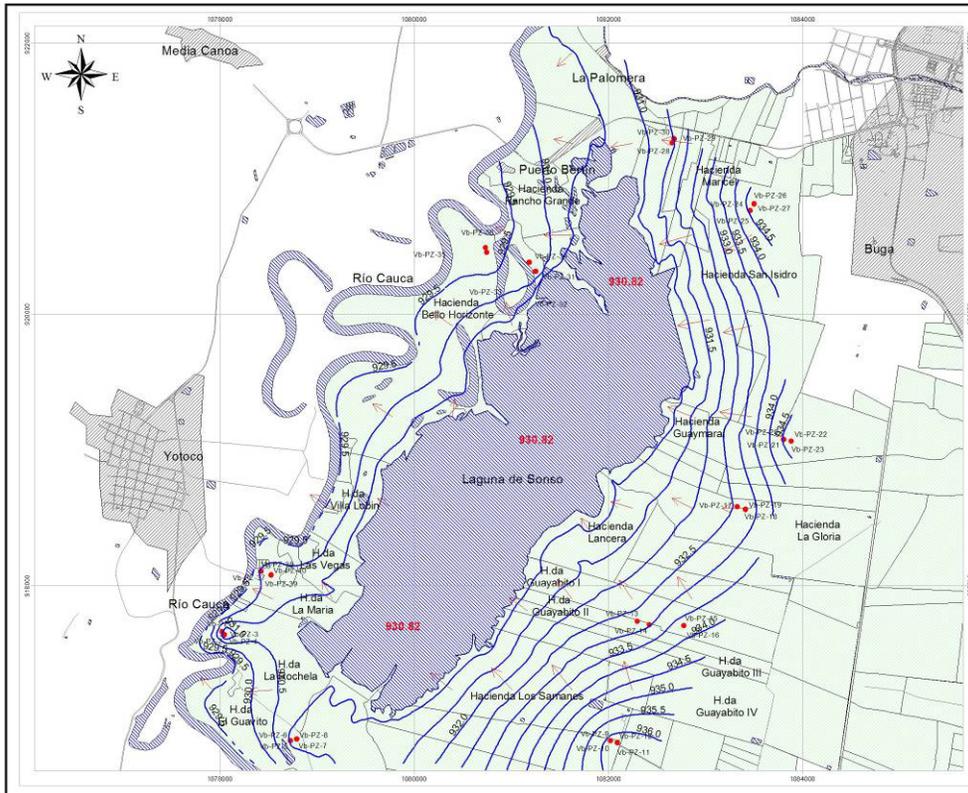
Proyecto EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA RESERVA NATURAL LAGUNA DE SONSO CON EL SISTEMA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LOS APORTES DE LAS CORRIENTES, A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED PIEZOMÉTRICA.	
Contiene NIVELES FREÁTICOS Y DIRECCIONES DE FLUJO (SEPTIEMBRE-2009)	
Cartografía Base CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA - CVC	
Convenciones Cuerpos de agua Zona Urbana Predios Localización de Piezómetros Nivel Freático Dirección de Flujo	
Localización Regional 	
Revisó Bio. Pablo Emilio Flores Ing. Juan Geovani Bernal	
Dibujó Ing. John Jairo Márquez Molina	
Fecha SEPTIEMBRE 17 de 2010	
Escala 1:25449	Plano No. 4 de 10



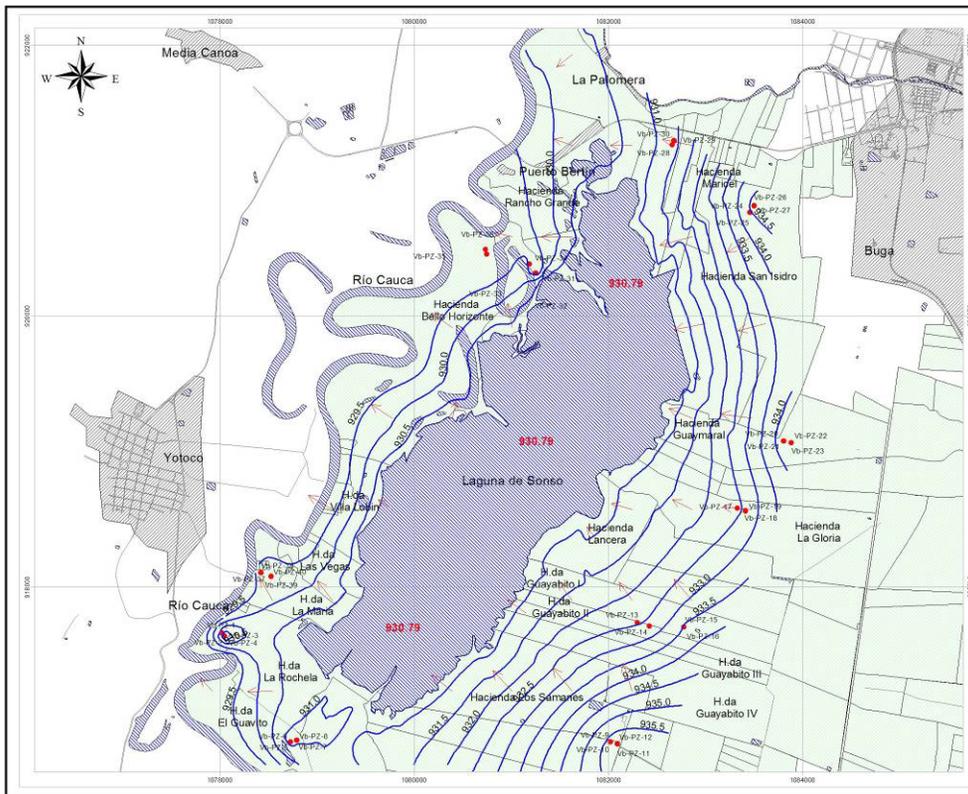
Proyecto EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA RESERVA NATURAL LAGUNA DE SONSO CON EL SISTEMA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LOS APORTES DE LAS CORRIENTES A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED PIEZOMÉTRICA.	
Contiene NIVELES FREÁTICOS Y DIRECCIONES DE FLUJO (OCTUBRE-2009)	
Cartografía Base CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA - CVC	
Convenciones Cuerpos de agua Zona Urbana Predios Localización de Piezómetros Nivel Freático Dirección de Flujo	
Localización Regional 	
Revisó Bio. Pablo Emilio Flores Ing. Juan Geovani Bernal	
Dibujó Ing. John Jairo Márquez Molina	
Fecha SEPTIEMBRE 17 de 2010	
Escala 1:25449	Plano No. 5 de 10



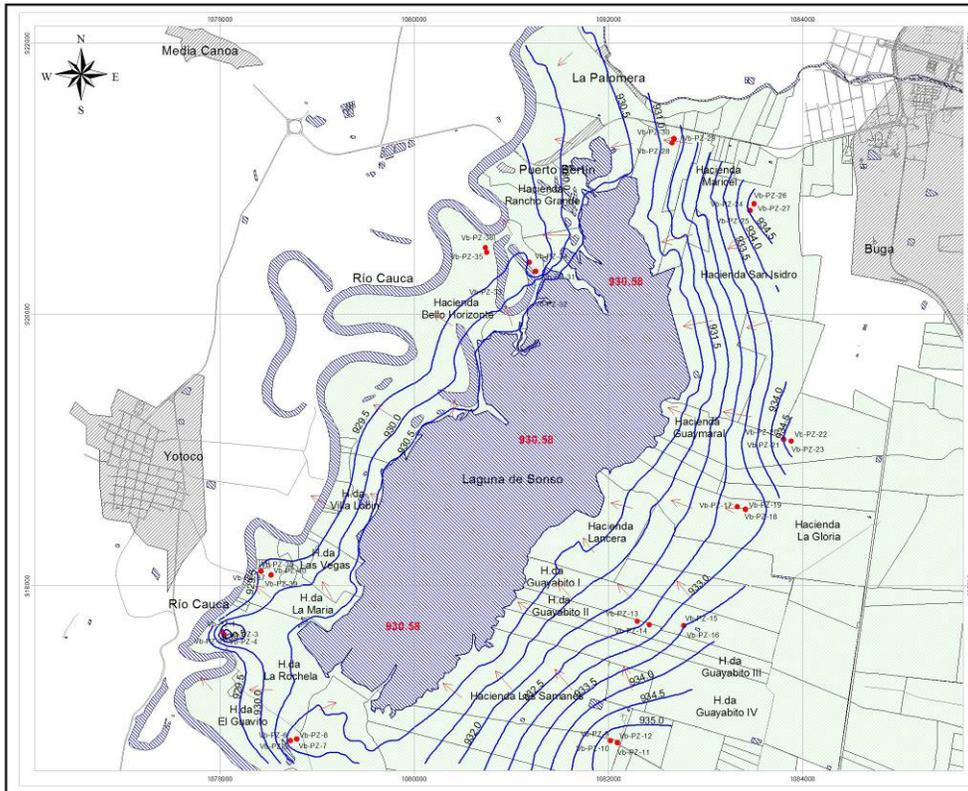
Proyecto EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA RESERVA NATURAL LAGUNA DE SONSO CON EL SISTEMA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LOS APORTES DE LAS CORRIENTES A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED PIEZOMÉTRICA.	
Contiene NIVELES FREÁTICOS Y DIRECCIONES DE FLUJO (NOVIEMBRE-2009)	
Cartografía Base CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA - CVC	
Convenciones Cuerpos de agua Zona Urbana Predios Localización de Piezómetros Nivel Freático Dirección de Flujo	
Localización Regional 	
Revisó Bio. Pablo Emilio Flores Ing. Juan Geovani Bernal	
Dibujó Ing. John Jairo Márquez Molina	
Fecha SEPTIEMBRE 17 de 2010	
Escala 1:25449	Plano No. 6 de 10



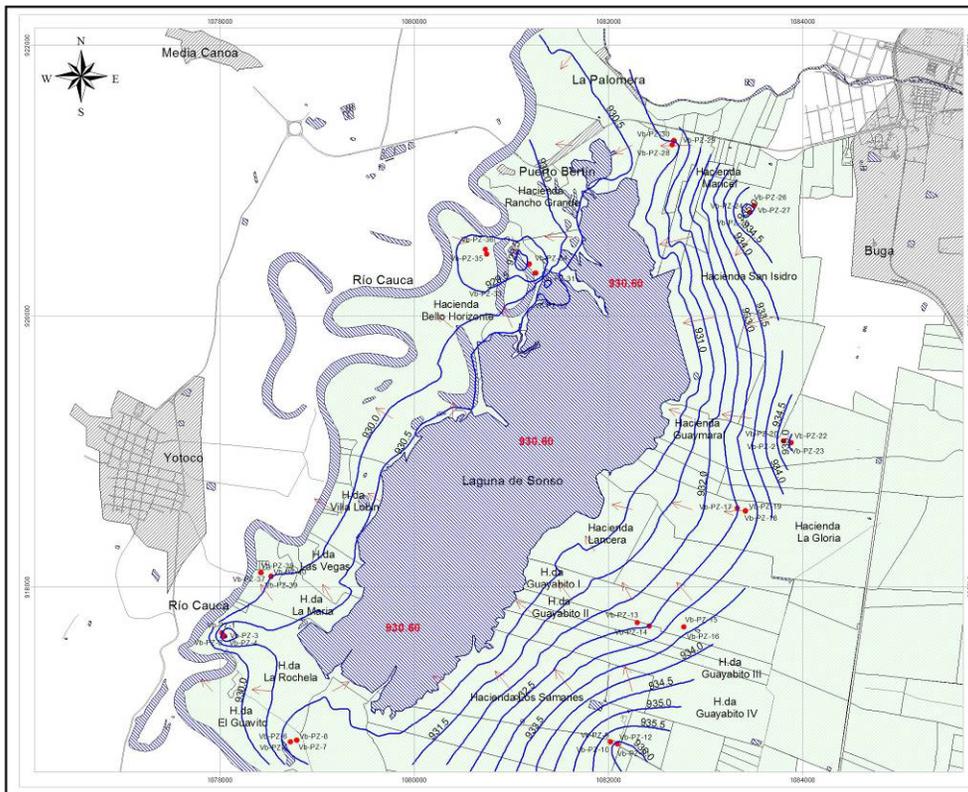
Proyecto EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA RESERVA NATURAL LAGUNA DE SONSO CON EL SISTEMA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LOS APORTES DE LAS CORRIENTES A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED PIEZOMÉTRICA.	
Contiene NIVELES FREÁTICOS Y DIRECCIONES DE FLUJO (DICIEMBRE-2009)	
Cartografía Base CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA - CVC	
Convenciones Cuerpos de agua Zona Urbana Predios Localización de Piezómetros Nivel Freático Dirección de Flujo	
Localización Regional 	
Revisó Bio. Pablo Emilio Flores Ing. Juan Geovani Bernal	
Dibujó Ing. John Jairo Márquez Molina	
Fecha SEPTIEMBRE 17 de 2010	
Escala 1:25449	Plano No. 7 de 10



Proyecto EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA RESERVA NATURAL LAGUNA DE SONSO CON EL SISTEMA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LOS APORTES DE LAS CORRIENTES, A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED PIEZOMÉTRICA.	
Contiene NIVELES FREÁTICOS Y DIRECCIONES DE FLUJO (ENERO-2010)	
Cartografía Base CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA - CVC	
Convenciones Cuerpos de agua Zona Urbana Predios Localización de Piezómetros Nivel Freático Dirección de Flujo	
Localización Regional 	
Revisó Bio. Pablo Emilio Flores Ing. Juan Geovani Bernal	
Dibujó Ing. John Jairo Márquez Molina	
Fecha SEPTIEMBRE 17 de 2010	
Escala 1:25449	Plano No. 8 de 10



Proyecto EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA RESERVA NATURAL LAGUNA DE SONSO CON EL SISTEMA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LOS APORTES DE LAS CORRIENTES, A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED PIEZOMÉTRICA.	
Contiene NIVELES FREÁTICOS Y DIRECCIONES DE FLUJO (FEBRERO-2010)	
Cartografía Base CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA - CVC	
Convenciones Cuerpos de agua Zona Urbana Predios Localización de Piezómetros Nivel Freático Dirección de Flujo	
Localización Regional 	
Revisó Bio. Pablo Emilio Flores Ing. Juan Geovani Bernal	
Dibujó Ing. John Jairo Márquez Molina	
Fecha SEPTIEMBRE 17 de 2010	
Escala 1:25449	Plano No. 9 de 10



Proyecto EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA RESERVA NATURAL LAGUNA DE SONSO CON EL SISTEMA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LOS APORTES DE LAS CORRIENTES, A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED PIEZOMÉTRICA.	
Contiene NIVELES FREÁTICOS Y DIRECCIONES DE FLUJO (MARZO-2010)	
Cartografía Base CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA - CVC	
Convenciones Cuerpos de agua Zona Urbana Predios Localización de Piezómetros Nivel Freático Dirección de Flujo	
Localización Regional 	
Revisó Bio. Pablo Emilio Flores Ing. Juan Geovani Bernal	
Dibujó Ing. John Jairo Márquez Molina	
Fecha SEPTIEMBRE 17 de 2010	
Escala 1:25449	Plano No. 10 de 10

Anexo H.
Valores de caudal obtenidos para la
expresión.

CAUDALES HISTORICOS AFORADOS EN CAÑO NUEVO				
Fecha	Q (m3/seg)	N(m)	cota	diferencia
29-ene-90	5,26	2,24	936,53	934,29
29-may-90	5,83	2,06	936,38	934,32
19-jun-90	5,44	2,17	936,51	934,34
24-sep-90	0,25	1,17	935,5	934,33
23-oct-90	6,2	2,85	937,07	934,22
14-ene-91	0,52	2,27	936,61	934,34
03-abr-91	1,74	2,74	937,05	934,31
18-jun-91	1,01	1,84	936,22	934,38
14-mar-94	15,28	4,14	938,5	934,36
18-abr-94	20,46	4,2	938,49	934,29
18-dic-95	3,76	2,77	937,19	934,42
30-ene-96	8,85	3,32	937,84	934,52
26-feb-96	10,88	3,84	938,23	934,39
26-mar-96	17,83	4,48	938,86	934,38
23-abr-96	11,11	3,8	938,15	934,35
02-jul-96	3,32	3,28	937,63	934,35
23-sep-96	0,9	1,38	935,75	934,37
15-oct-96	0,57	1,96	936,35	934,39
28-oct-96	1,47	2,25	936,6	934,35
27-nov-96	2,82	1,57	935,91	934,34
16-dic-96	9,5	2,54	936,89	934,35
01-abr-97	6,45	2,66	936,96	934,3
11-jun-97	7,56	3,28	937,57	934,29
19-ago-97	0,26	1,22	935,66	934,44
30-sep-97	0,88	1,35	935,702	934,352
19-ene-98	0,31	0,85	935,18	934,33
31-mar-98	0,26	2,04	936,31	934,27
06-jul-98	0,21	2,04	936,31	934,27
21-sep-98	1,05	1,65	936,02	934,37
14-ene-99	24,74	4,53	938,86	934,33
16-feb-99	5,9	4,46	938,86	934,4
19-abr-99	19,97	4,58	938,96	934,38
04-may-99	23,76	4,66	939	934,34
02-jun-99	9,38	2,72	937	934,28
20-oct-99	3,37	2,56	936,8	934,24
15-feb-00	15,29	2,93	937,41	934,48
19-may-00	3,5	3,38	938,34	934,96
08-ago-00	1,74	2,08	936,36	934,28
15-ene-01	1,25	1,96	936,21	934,25
15-ago-01	1,15	1,23	935,55	934,32
19-mar-02	1,4	2,36	936,59	934,23
20-may-02	4,79	1,84	936,16	934,32