

**MUESTREO DE ISOTOPOS ESTABLES EN LA ESCORRENTÍA TOTAL DE
EVENTOS Y OTROS MUESTREOS COMPLEMENTARIOS**

**Ricardo Adolfo Barliza Tovar
Efraín Cristancho Torres**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2007**

**MUESTREO DE ISOTOPOS ESTABLES EN LA ESCORRENTÍA TOTAL DE
EVENTOS Y OTROS MUESTREOS COMPLEMENTARIOS**

**Ricardo Adolfo Barliza Tovar
Efraín Cristancho Torres**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Civil**

**Director:
Sully Gomez Isidro
Ing. Civil, M.sc., PhD**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2007**

A mis padres, por su colaboración y paciencia

A mi madrina, por su apoyo desinteresado

A mi hijo, por ser mi fuente de motivación

Al mijin, por su cooperación

RICARDO

*A mi madre, Claudia y Eliana, mis tres mujeres,
por su apoyo, paciencia y compañía.*

ECT

AGRADECIMIENTOS

A nuestra directora, doctora Sully Gómez por su apoyo, cooperación y asistencia.

Al Ing. Msc. Jorge A. Guzmán por sus aportes, colaboración e interés en este proyecto.

A los Ings. Giovanni Balaguera y Adriana Serrano por sus opiniones y colaboración desinteresada.

Al grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) por su apoyo técnico.

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM por facilitarnos la información de sus estaciones.

Al Acueducto de Piedecuesta y al de Floridablanca por ofrecernos su apoyo en el muestreo.

A la señora Maria de la Cruz Adarme, encargada del muestreo de Café Madrid, por su gentil hospitalidad, y en general a todos los operadores encargados del muestreo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1	3
MARCO TEORICO DE ISOTOPOS ESTABLES Y EL HIDROGRAMA	3
1.1 ISOTOPOS	3
1.1.1 Nomenclatura.....	3
1.1.2 Fraccionamiento de los isótopos.....	4
1.1.3 Los Isótopos del Hidrogeno y el Oxigeno en el Ciclo Hidrológico	7
1.1.4 Medición y Standardización de Isótopos Estables del Agua	8
1.1.5 Isótopos estables del Oxigeno	10
1.1.5.1 Abundancia Natural	10
1.1.5.2 Variaciones naturales del ^{18}O en la precipitación.....	11
1.1.5.3 Variaciones naturales del ^{18}O en el agua superficial.....	12
1.1.6 Isótopos Estables del Hidrógeno	12
1.1.6.1 Abundancia Natural	12
1.1.6.2 Variaciones naturales del ^2H	13
1.1.7 Isótopos en los Ríos	14
1.1.7.1 Isótopos Estables del Hidrógeno y del Oxígeno	14
1.1.7.2 Variaciones del ^2H y del ^{18}O en los Ríos.....	15
1.1.8 Línea Meteórica o Recta de Craig	16
1.2 EL HIDROGRAMA	17
1.2.1 Componentes del Hidrograma	18
1.2.1.1 Escorrentía.....	18
1.2.1.2 Flujo Base	19

1.2.2 Separación del Flujo Base	20
1.2.2.1 Métodos de Separación del Flujo Base	21
1.2.2.2 Separación del Flujo Base Mediante Técnicas Isotópicas	22

CAPITULO 2.....28

ANTECEDENTES, MUESTREOS E INFORMACIÓN ISOTÓPICA EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA.....	28
2.1 GENERALIDADES DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIÓ LEBRIJA.....	28
2.2 PERSPECTIVA GENERAL DE LAS INVESTIGACIONES EXISTENTES	31
2.3 DATOS ISOTÓPICOS DISPONIBLES DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	31
2.4 DATOS ISOTÓPICOS DISPONIBLES DE PRECIPITACIÓN.....	32
2.5 DATOS ISOTOPICOS DISPONIBLES DE ESCORRENTIA.....	33
2.6 MUESTREO DE ISOTOPOS ESTABLES EN EL FLUJO BASE	34
2.6.1 Localización de los Puntos de Muestreo.....	34
2.6.1.1 El Conquistador	37
2.6.1.2 La Esperanza.....	38
2.6.1.3 Majadas	39
2.6.1.4 Café Madrid	40
2.6.2 Práctica del Muestreo	41
2.6.2.1 Toma de Las Muestras para el Flujo Base.....	41
2.6.3 Resultados Obtenidos.....	44
2.7 MUESTREO DE ISOTOPOS ESTABLES EN LA ESCORRENTÍA TOTAL	44

<u>CAPITULO 3.....</u>	<u>48</u>
APLICACIÓN DE TÉCNICAS ISOTÓPICAS EN LA SEPARACIÓN DE FLUJO BASE DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA.....	48
3.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS EXISTENTES Y OBTENCIÓN DE LAS DESVIACIONES ISOTÓPICAS PROMEDIO (Δ_O , Δ_S , Δ_T).....	48
3.1.1 Depuración de los datos:	49
3.1.2 Obtención de las Desviaciones Isotópicas Promedio	53
3.1.2.1 Espacialización de la Precipitación.	54
3.1.3 Espacialización de Agua Subterránea	61
3.1.4 Obtención de δ_T	64
<u>CAPITULO 4.....</u>	<u>65</u>
ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS	65
El cálculo tipo mediante ^{18}O , con los valores correspondientes al método RBF es:	65
El cálculo tipo mediante 2H , con los valores correspondientes al método RBF es:	65
<u>5 CONCLUSIONES</u>	<u>71</u>
<u>RECOMENDACIONES.....</u>	<u>73</u>
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>75</u>
<u>ANEXOS.....</u>	<u>80</u>

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1. Características de los Isótopos Estables del Oxígeno.....	11
Tabla 2. Características de los Isótopos Estables del Hidrógeno.....	13
Tabla 3. Información General de los sitios de muestreo.....	35
Tabla 4. Valores promedio y productos resultantes de la espacialización de los datos de disponibles de precipitación.....	58
Tabla 5. Obtención de las desviaciones isotópicas promedio de precipitación de la CSRL, según muestreo 2004-2005.....	59
Tabla 6. Obtención de desviaciones isotópicas promedio de precipitación de la CSRL según muestreo de pequeñas corrientes superficiales en la zona del macizo, 1994.....	60
Tabla 7. Promedio de datos de isótopos de precipitación (20005) y corrientes superficiales (1994).....	60
Tabla 8. Desviaciones isotópicas promedio de Agua subterránea de la CSRL, según muestreo 2002-2003 y 2004.....	63
Tabla 9. Valores promedio de información isotópica de agua subterránea en la CSRL.....	64
Tabla 10. Valores promedio de información isotópica de escorrentía total del río Lebrija.....	64
Tabla 11. Separación de flujo base mediante promedios obtenidos con diferentes métodos de interpolación a partir de información isotópica disponible de la CSRL.....	66
Tabla 12. Comparación de diferentes métodos de separación de flujo base aplicados en la estación de Café Madrid.....	68

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Esquema de un Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS).....	10
Figura 2. Línea de Craig y Línea Meteórica Local de la Cuenca Superior del Río Lebrija.....	17
Figura 3 Componentes básicos dell hidrograma.....	18
Figura 4. Terminología Importante del Hidrograma.....	21
Figura 5. Fundamento conceptual de los elementos del hidrograma expresado en la ecuación 3.....	25
Figura 6. Localización regional de la C.S.R.L.....	29
Figura 7. Subcuencas de la C.S.R.L.....	30
Figura 8. Localización de los cuatro puntos de muestreo.....	36
Figura 9. Diseño de marco metálico para la recolección de muestras.....	42
Figura 10. Comportamiento Bimodal de la precipitación.....	45
Figura 11. Hidrograma del evento de precipitación muestreado para escorrentía total, 29 y 30 de Abril 2006, estación Café Madrid.....	46
Figura 12. Efecto estacional en la Escorrentía.....	49
Figura 13. Tendencia Lineal de datos isotópicos en corrientes de la CSRL. Periodo de muestreo: Enero-Julio de 2005.....	50
Figura 14. Tendencia general de los datos isotópicos en algunos ríos de la CSRL. Periodo de muestreo: Enero-Julio de 2005.....	50

Figura 15. Relación meteórica en muestras isotópicas de lluvia, CSRL. 2005.....	52
Figura 16. Mascara de la CSRL generada por SPELL-Map. El área azul contiene celdas con valor unitario y el área blanca con celdas en blanco.....	56
Figura 17. Mascara de la zona alta de la CSRL generada por SPELL-Map.....	57
Figura 18. Izquierda: Datos isotópicos de $\delta^{18}O$ del mes de Marzo de 2005 espacializados mediante el método RBF. Derecha: Datos isotópicos de mm de Precipitación del mes de Marzo de 2005 espacializados mediante el método RBF.....	58
Figura 19. Resultado de la multiplicación de los mapas $\delta^{18}O$ y Precipitación del mes de Marzo mediante el método de interpolación RBF.....	58
Figura 20. Izquierda: Datos isotópicos de $\delta^{18}O$ de algunas corrientes superficiales tomados en el año 1994 espacializados mediante método de interpolación RBF. Derecha: Datos isotópicos de 2H de algunas corrientes superficiales en 1994, espacializados mediante el método de interpolación IDQ.....	61
Figura 21. Máscara del área de la CSRL con cotas menores a 1500 m generada por SPELL-Map. El área azul contiene celdas con valor unitario y el área blanca con celdas en blanco.....	62
Figura 22. Izquierda: Espacialización de datos $\delta^{18}O$ de agua subterránea recopilados en verano mediante RBF. Derecha: Espacialización de datos δ^2H de agua subterránea recopilados en invierno mediante IDQ.....	62

LISTA DE FOTOS

	Pag
Foto 1. El Conquistador. Ubicación del sitio de muestreo. 11 Nov. 2006.....	37
Foto 2. La Esperanza. Ubicación del sitio del muestreojo. Dic. 2006.....	38
Foto 3. Majadas. Ubicación del sitio de Muestro. Oct. 2006.....	39
Foto 4. Estación Limnigráfica Café Madrid. Abril de 2006.....	40
Foto 5. Utilización del marco metálico.....	42
Foto 6. Envase de polietileno para almacenamiento de las muestras.....	43
Foto 7. Sonda multiparámetros ELJKELKAMP.....	43

LISTA DE ANEXOS

	Pag
Anexo 1. Parámetros Físicoquímicos del Muestreo de Isótopos Estables en el Flujo Base. (Agosto de 2005-Abril de 2006).....	80
Anexo 2. Datos de Niveles y Parámetros Físicoquímicos del Muestreo de Escorrentía Total en la estación de Café Madrid. 29 y 30 de Abril de 2006.....	84

RESUMEN

TITULO:

MUESTREO DE ISOTOPOS ESTABLES EN LA ESCORRENTÍA TOTAL DE EVENTOS Y OTROS MUESTREOS COMPLEMENTARIOS*

AUTORES:

Ricardo Adolfo Barliza Tovar

Efraín Cristancho Torres**

PALABRAS CLAVES:

Cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L.); Isótopos Estables; Fraccionamiento Isotópico, Separación del Flujo Base.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto se realizó en la Cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L.), localizada al Nor-Oriente del departamento de Santander, cuyas características generales son la presencia de pendientes elevadas y variabilidad climática. Se implementó un muestreo de isótopos estables en algunas estaciones preseleccionadas en los ríos: Suratá, Río Frió, Río de Oro y Río Lebrija. Dicho muestreo se desarrolló en el periodo comprendido entre los meses de Agosto de 2005 y Junio de 2006, mediante técnicas que intentaron tomar muestras isotópicas de flujo base directamente del río; con el propósito de estudiar el comportamiento de las corrientes en época de verano y la relación entre el flujo base y la respuesta de los acuíferos.

Además, se hizo un muestreo de isótopos estables en el río Lebrija en la estación Café Madrid en el punto de cierre de la cuenca, durante un evento de lluvia, para muestrear la variación de concentración de isótopos estables durante los efectos de la precipitación.

El documento comprende una revisión bibliográfica de los conceptos fundamentales desarrollados en la investigación; una presentación y análisis de los datos isotópicos existentes de la C.S.R.L.; los resultados de la estimación del flujo base de la C.S.R.L. mediante técnicas isotópicas y una comparación con técnicas convencionales de separación.

Como resultado del estudio se pudo establecer que el valor porcentual del flujo base se encuentra entre valores que varían entre 33 y 84% de la escorrentía total de la cuenca.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de ingeniería Civil, Director: GOMEZ ISIDRO, Sully.

ABSTRACT

TITLE:

SAMPLING OF STABLE ISOTOPES IN THE TOTAL RUN-OFF AND OTHERS COMPLEMENTARY SAMPLINGS*

AUTHORS:

Ricardo Adolfo Barliza Tovar
Efraín Cristancho Torres**

KEY WORDS:

River Lebrija Superior Catchments (C.S.R.L.); Stable Isotope; Isotopic Fractioning; Base flow Separation

DESCRIPTION:

The current project was made about the upper basin of Lebrija's River located at the northeast of Colombia in the department of Santander, this zone is characterized by steep slopes and weather variability. The sampling was implemented in some preselected stations in the rivers: Suratá, Río Frío, Río de Oro and Lebrija. The sampling period was done between August 2005 and June 2006. The used techniques tried to take samples of the base flow directly from the river. The objective of the study were to found the relation between base flow and groundwater and the behavior of the rivers in low precipitation times.

In addition, during a rain event, a sampling of steady isotopes was taken in the Café Madrid station of the Lebrija river near to the closing point of the river basin. It was useful to check the variation of steady isotope concentration during precipitation effects and for identifying the hidrograph components: base flows and surface run-off, by mean of isotopic techniques.

First of all, the report presents the theoretical framework, wich is a revision of fundamental concepts in the research; secondly, it is show an analysis of the existing isotopes data of CSRL. The results of the base flow estimation mean of isotopes techniques and a comparison with the other conventional techniques.

The study established that the ratio corresponding to base flow is between 33-84% of the total run-off.

* Graduation Project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director: GOMEZ ISIDRO, Sully.

INTRODUCCIÓN

El agua como recurso hídrico dador de vida, se ha convertido en objeto de investigaciones a lo largo de la historia, dando paso a incógnitas sobre la sostenibilidad de este recurso y el aprovechamiento del agua subterránea como una importante alternativa como fuente de abastecimiento. Los isótopos estables del agua al ser trazadores naturales de los componentes del ciclo hidrológico, son utilizados como una herramienta importante en el estudio de esta compleja búsqueda, para cuantificar el aporte del flujo lento a los ríos, mediante la obtención de la separación de flujo base.

El proyecto de investigación sobre el Muestreo de Isótopos Estables en la Escorrentía total de eventos de la Cuenca superior del río Lebrija y otros muestreos complementarios, es una continuidad de los trabajos realizados por la UIS para la conservación y protección de los recursos hídricos de la región de Bucaramanga y su área Metropolitana. En este sentido, a través de proyectos, han sido propuestas algunas metodologías que permitieron estimar la participación del flujo base en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Dichas metodologías arrojaron diferentes valores porcentuales que van desde 50 al 83%.

La investigación desarrollada en el presente proyecto de grado tiene como objetivo la separación de flujo base en la Cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L.) mediante técnicas isotópicas, estimando de esta manera la participación del agua subterránea en el ciclo hidrológico. Los resultados de dicha estimación, permitirán en un futuro concienciar a la comunidad y tomar medidas preventivas que permitan la sostenibilidad del recurso hídrico de la Cuenca Superior del Río Lebrija.

El Capítulo 1 muestra el marco teórico como una revisión bibliográfica de los conceptos fundamentales desarrollados en la investigación. En el Capítulo 2, se presentan y analizan los datos isotópicos existentes de la Cuenca Superior del Río Lebrija. En el Capítulo 3, se lleva a cabo el desarrollo de una metodología que da lugar a la estimación del flujo base en la Cuenca Superior Del Río Lebrija, a partir de la información isotópica disponible.

En el Capítulo 4 se lleva a cabo el análisis de resultados y se hace una comparación con otras metodologías de separación. En este capítulo se interpretan los datos obtenidos y se comparan con investigaciones anteriores, analizando así las ventajas y desventajas de los métodos empleados.

Posteriormente se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPITULO 1

MARCO TEORICO DE ISOTOPOS ESTABLES Y EL HIDROGRAMA

1.1 ISOTOPOS

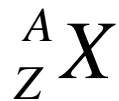
Los isótopos son cada uno de los núcleos atómicos de un mismo elemento químico, con el mismo número atómico, pero con diferente número másico. En otras palabras, son átomos que tienen el mismo número de protones y de electrones, pero un diferente número de neutrones.

Son estables los que **no** exhiben propiedades radioactivas y por lo tanto no experimentan desintegración, pudiendo ser utilizados como trazadores que sigan los elementos del ciclo del agua en su curso natural. Por ejemplo, se puede aplicar la abundancia del ^2H y ^{18}O durante las precipitaciones para descifrar varios de los componentes del hidrograma de escorrentía. Cuando se utilizan isótopos estables como trazadores del ciclo hidrológico, la característica diferenciadora entre sus componentes es el contraste en concentración de los mismos, debida a la transición del agua de un estado a otra (agua líquida a vapor).

1.1.1 Nomenclatura

Se debe recordar que la suma del número de protones (Z) y el número de electrones (N), en el núcleo de un átomo cualquiera es conocida como número de masa (A). La notación Standard que se utiliza para representar el núcleo determinado un elemento (X), consiste en escribir el símbolo del elemento,

colocándole el número de masa (A) en la parte superior izquierda como un superíndice y su número atómico (Z) en la parte inferior izquierda como un subíndice, así:



Sin embargo, puesto que cada elemento químico se caracteriza porque todos sus átomos tienen en su núcleo un mismo y definido número de protones, el valor Z va implícito en el símbolo químico. Por esta razón se utiliza más frecuentemente la forma abreviada de representación:



Por ejemplo, la mayoría de los átomos de oxígeno tienen 8 protones y 8 neutrones, es decir una masa atómica de 16 ($^{16}_8O_8$), mientras que cerca del 0.2% de los átomos de oxígeno tienen 10 neutrones ($^{18}_8O_{10}$) o (^{18}O) con notación convencional usando solamente el símbolo del elemento y su peso atómico. En realidad, la masa de un núcleo es un poco menor que la masa combinada de estos neutrones y protones. La “equivocada” masa es expresada como la energía nuclear almacenada (de acuerdo a la relación masa-energía de Einstein $E=mc^2$), la cual representa el total de energía requerida para romper los enlaces del núcleo (Clark & Fritz, 1997).

1.1.2 Fraccionamiento de los isótopos

Aunque los isótopos de un elemento tienen las mismas propiedades químicas, en la realidad se presentan variaciones en las abundancias isotópicas que sobrepasan la medida habitual.

En cuanto a la igualdad de las moléculas que contienen diferentes isótopos del mismo elemento, se puede decir que se cumplen en forma relativa porque cuando se realizan estudios con espectrómetros de masa se observan pequeñas diferencias tanto en el comportamiento físico como químico de dichas moléculas isotópicas. El fenómeno que hace que estas diferencias se produzcan recibe el nombre de fraccionamiento o discriminación isotópica. Este se puede presentar con el cambio del agua de un estado a otro, por ejemplo: la evaporación del agua líquida o mediante su transformación en otro compuesto.

Las diferencias en las propiedades físicas y químicas de los componentes isotópicos se deben a las diferencias en la masa de los núcleos atómicos al poseer más o menos neutrones, esto hace que las moléculas isotópicas más pesadas tengan una movilidad inferior. La energía cinética de una molécula se determina simplemente por medio de la temperatura: $KT = \frac{1}{2}mv^2$ (K = constante de Boltzmann, T = temperatura absoluta, m = masa molecular, v = velocidad molecular media). Por consiguiente, si se tiene en cuenta su contenido isotópico, las moléculas tienen el mismo $\frac{1}{2}mv^2$. Esto implica que las moléculas con una mayor masa (m) necesariamente han de tener una velocidad (v) menor (Rozanski & Froehlich, 2002).

En resumen, el fraccionamiento isotópico es el enriquecimiento relativo entre el isótopo pesado respecto al isótopo ligero:

$$R = \frac{\textit{abundancia del isotopo en defecto}}{\textit{abundancia del isotopo en exceso}}$$

Se presenta cuando el agua cambia de estado debido a que las moléculas más livianas tienen una mayor movilidad y en consecuencia una mayor probabilidad de

salir de la masa de agua líquida en los procesos de evaporación y de mantenerse en la masa de vapor en los procesos de condensación.

Algunas consecuencias prácticas son:

a) las moléculas más pesadas tienen una velocidad de difusión menor.

b) la frecuencia de colisión con otras moléculas, que es la primera condición para que se origine una reacción química, es inferior para las moléculas más pesadas; esta es una de las razones por las que, por regla general, las moléculas ligeras reaccionan más rápidamente.

Existen dos tipos de fraccionamiento isotópico: el fraccionamiento cinético y el fraccionamiento de equilibrio. El primero se origina por procesos físicos o químicos irreversibles es decir en un solo sentido. Ejemplo: La evaporación de agua con separación inmediata y sin nuevo contacto con el agua; la absorción y difusión de los gases. En los procesos físicos las moléculas isotópicamente más ligeras presentan velocidades superiores y menores energías de enlace; en los procesos químicos las moléculas ligeras reaccionan más rápidamente que las pesadas. Sin embargo, se presentan casos donde ocurre lo contrario. El segundo, caso el fraccionamiento de equilibrio (termodinámico), consiste en el efecto isotópico de una reacción de equilibrio (termodinámica), el ejemplo típico para este proceso es la reacción de intercambio isotópico $A^* + B \leftrightarrow A + B^*$ donde el asterisco (*) representa la presencia del isótopo de menor abundancia (Rozanski & Froehlich, 2002).

1.1.3 Los Isótopos del Hidrogeno y el Oxígeno en el Ciclo Hidrológico

El hecho que el agua sobre la tierra se mueva en un ciclo, desde los océanos las nubes, los ríos y de nuevo a los océanos, ha sido conocido desde las primeras civilizaciones en diferentes partes del mundo. Sin embargo, la cuantificación de los flujos entre las diferentes partes del ciclo, particularmente en la atmósfera y la superficie, ha sido una tarea difícil.

Luego del descubrimiento de isótopos pesados estables del Oxígeno (^{18}O) y del Hidrogeno (^2H también conocido como deuterio), los cuales se encuentran en concentraciones promedio de 2000 p.p.m. y 320 p.p.m. respectivamente; se evidenciaron hacia 1920 diferencias significativas en el contenido isotópico de agua de mar, agua dulce y nieve (Gilfillan, 1934; And Review By Rankama, 1954). A principios de la década de 1950, como resultado de la disponibilidad de mejores técnicas de medición, se pudo descubrir que la dependencia del contenido isotópico de lluvia varía de acuerdo diferentes factores como: temperatura del aire, cantidad de precipitación, altitud y latitud (Friedman, 1953; Dansgaard, 1953; Epstein, 1956). Los fundamentos para el uso de isótopos para cuantificar los flujos en el ciclo hidrológico fueron sólidamente establecidos en la década de 1950.

Tanto el hidrógeno como el oxígeno, que son los elementos constitutivos del agua, contienen principalmente isótopos ligeros. Cuando el agua de los océanos se evapora, los isótopos más pesados se condensan primero y caen en forma de lluvia antes que los más ligeros. Es en los océanos donde se genera la mayor parte del vapor de agua en la atmósfera, por consiguiente, mientras más alejada de la costa sea la precipitación, menor será la cantidad de isótopos pesados que contenga.

En cada etapa del ciclo hidrológico, se registra un pequeño cambio consistente en una diferencia en la concentración de isótopos de oxígeno e hidrógeno en el agua que es tan singular como una huella dactilar. Los isótopos de los contaminantes, como trazas metálicas o compuestos químicos disueltos en agua, también ofrecen pistas sobre sus orígenes.

Algunos isótopos del agua como ^{18}O y ^2H al ser particularmente estables, ofrecen la posibilidad de abarcar períodos prolongados de fenómenos meteorológicos de miles de años de duración. Sus firmas quedan preservadas dondequiera que se registra el ciclo del agua, en sedimentos de océanos, y lagos, en las incisiones anulares de los árboles, en glaciares y casquetes polares, en depósitos en cuevas y en aguas subterráneas.

1.1.4 Medición y Standardización de Isótopos Estables del Agua

La necesidad de comparar datos isotópicos a escala global demandó la standardización de las mediciones entre los laboratorios. Dos organizaciones colaboraron en la calibración, catalogación y distribución de referencias: the International Atomic Energy Agency (IAEA) y the National Institute of Standards and Technology (NIST).

En 1961 Harmon introdujo el término “Standard Mean Ocean Water” (SMOW) como una medida Standard de la concentración de ^{18}O y ^2H del agua de mar, paradójicamente tomada del río Potomac. Posteriormente la IAEA preparó agua oceánica destilada como patrón y la identificó como VSMOW (Viena Standard Ocean Water), que ha sido la referencia internacionalmente aceptada de ^{18}O y ^2H para agua por más de tres décadas; cuyos valores se muestran a continuación:

$$\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{VSMOW}} = (2005.2 \pm 0.45) \times 10^{-6} \quad (\text{Baertschi, 1976})$$

$$\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}\right)_{\text{VSMOW}} = (155.76 \pm 0.05) \times 10^{-6} \quad (\text{Hageman et al., 1970})$$

Cuando VSMOW reemplazó SMOW de Craig, vino a ser expresada simplemente como SMOW. Actualmente la definición de las concentraciones de ^{18}O y ^2H del agua son expresadas mediante la diferencia en partes por mil de la relación D/H y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ respecto a las mismas relaciones en el agua del océano (SMOW). Esta diferencia se expresa como desviación cuya notación es δ :

$$\delta = \frac{C_{\text{MUESTRA}} - C_{\text{SMOW}}}{C_{\text{SMOW}}} \quad (1)$$

Donde δ es la desviación isotópica en ‰, C_{MUESTRA} es la concentración de isótopos de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ para el oxígeno y D/H para el deuterio, estas pueden determinarse generalmente con una exactitud entorno a $\pm 0.1\text{‰}$ y $\pm 1\text{‰}$ respectivamente, C_{SMOW} es la concentración de isótopos (SMOW).

El equipo que lleva a cabo la medición del contenido isotópico en las muestras es el Espectrómetro de Masas. Funciona acelerando las partículas mediante una diferencia de potencial, la cual las arrastra hacia un campo magnético en una zona de vacío, generando en su trayectoria un movimiento espiral o circular (Fuerza de Lorentz), de manera tal que los iones con mayor masa describirán círculos más grandes (Aceleración Centrífuga) siendo posible su clasificación. En la figura 1 se muestra el funcionamiento de una espectrómetro de masa. Para detalles de medición y funcionamiento ver: Los Artículos en IAEA (2001), Werner and Brand (2001), Gehre and Strauch (2003) y Werner (2003).

En la actualidad, lamentablemente nuestro país no cuenta con dicha tecnología, motivo por el cual se hizo necesario enviar las muestras recolectadas en este trabajo de grado a la IAEA, Vienna (Austria).

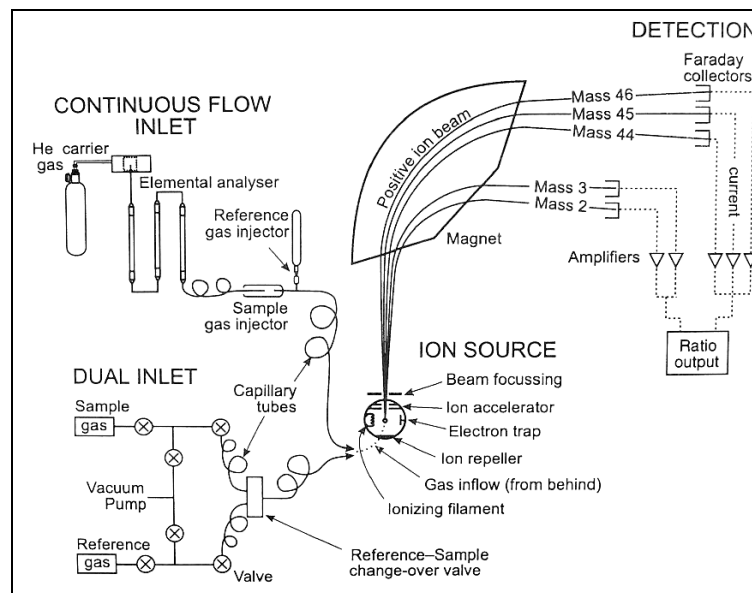


Figura 1. Esquema de un Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS)
Fuente: Clark, I., Fritz, P. (1997)

1.1.5 Isótopos estables del Oxígeno

1.1.5.1 Abundancia Natural

El Oxígeno posee tres isótopos estables: ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O , con abundancias de 99,76; 0,035 y 0.2% respectivamente. El ^{17}O aporta poca información sobre el ciclo hidrológico; el ^{16}O es el más abundante y en el ^{18}O las variaciones se miden en forma mas precisa. Es decir, se considera el cociente del $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\approx 0,0020$).

Los valores de ^{18}O muestran variaciones de casi el 100‰. El ^{18}O presenta mayor concentración en los lagos (salinos) por estar sujetos a un alto grado de evaporación, en cambio en las zonas altas y en los climas fríos, el ^{18}O es menor. De ahí, que en el ciclo hidrológico de los climas templados el rango de ^{18}O no excede el 30‰.

Tabla 1. Características de los Isótopos Estables del Oxígeno.
Fuente: (Rozanski & Froehlich, 2002).

	^{16}O	^{17}O	^{18}O
Estabilidad	estable	estable	estable
Abundancia natural	0.9976	0.00038	0.00205
Rango de abundancia en el ciclo hidrológico		15μ	30μ
Representación		$^{17}\delta$ o $\delta^{17}\text{O}$	$^{18}\delta$ o $\delta^{18}\text{O}$
Unidades		‰	‰
Instrumento		EM	EM
Modo analítico		O_2	CO_2 o O_2
Desviación estándar usual			0.05 μ
Estándar internacional			VSMOW para el agua VPDV para carbonato
Valores absolutos			VSMOW: 0.0020052 VPDV: 0.0020672

1.1.5.2 Variaciones naturales del ^{18}O en la precipitación

El vapor de agua atmosférico en precipitación se transforma debido a factores climáticos y locales. Mientras más se alejen las lluvias de la fuente principal de vapor de las regiones ecuatoriales, más negativo se vuelve el ^{18}O . Los efectos que causan las variaciones regionales y temporales en el ^{18}O de la precipitación son: el efecto latitudinal, el continental, el de altitud, el estacional y el efecto intensidad.

1.1.5.3 Variaciones naturales del ^{18}O en el agua superficial

La concentración de ^{18}O sufre variaciones en el agua de los ríos por efectos estacionales: en verano los valores tienden a ser mayores y en invierno disminuyen. La evaporación, en las regiones tropicales y semiáridas produce enriquecimiento de ^{18}O de las aguas superficiales, pudiéndose encontrar concentraciones de ^{18}O entre el +3 y el +4‰, sin embargo, se han reportado algunos casos con valores más altos de concentración como por ejemplo: +20‰ en algunos lagos.

1.1.6 Isótopos Estables del Hidrógeno

1.1.6.1 Abundancia Natural

El Hidrogeno es un elemento químico que consta de dos isótopos estables, el ^1H y ^2H (D o deuterio), tiene unas abundancias entre el 99,985 y el 0,015% y una relación isotópica $^2\text{H}/^1\text{H} \approx 0,00015$. Esta relación presenta una variación natural del 250‰, mayor que las variaciones del ^{13}O y del ^{18}O , debido a las diferencias de masas relativamente grandes existentes entre los isótopos. El ^2H en aguas superficiales con una evaporación intensa, presenta concentraciones elevadas, lo mismo que sucede con el ^{18}O , a diferencia del hielo de los polos que tienen bajos contenidos de ^2H .

Tabla 2. Características de los Isótopos Estables del Hidrógeno
Fuente: (Rozanski & Froehlich, 2002).

	¹ H	² H	³ H
Abundancia natural	0.99985	0.00015	< 10 ⁻¹⁷
Estabilidad	estable	estable	estable
Actividad específica natural			< 1.2 Bq/L agua
Decaimiento/Descendiente			β ⁻ / ³ He
Vida media (T_{1/2})			12.320 ± 0.022 a
Factor de decaimiento (λ)			5.576*10 ⁻² /a = 1/18.33 a ⁻¹
Energía β máxima			18 KeV
Rango de abundancia en el ciclo hidrológico		250 ‰	0 a 10 ⁻¹⁶
Registrado como		² δ o δ ² H o δD	³ A
Unidades		‰	UT, Bq/L H ₂ O
Instrumento		MS	CPG, ECL
Medio analítico		H ₂	H ₂ O, C ₂ H ₆ , C ₆ H ₆
Desviación estándar usual		0.5 ‰	≥1% niveles altos
Estándar internacional		VSMOW	NBS-SRM 4361
Valores absolutos		² H/ ¹ H = 0.00015575	³ H/ ¹ H = 6600 UT = 0.780 Bq/g H ₂ O 01-01-1988

1.1.6.2 Variaciones naturales del ²H

Existen correlaciones entre los efectos del fraccionamiento del ²H y del ¹⁸O. Por consiguiente también existe una relación entre el ²H y ¹⁸O de las aguas naturales y una fuerte correlación entre las variaciones de ²H y ¹⁸O de las precipitaciones, del hielo y en gran parte de aguas subterráneas y aguas superficiales no evaporadas.

1.1.7 Isótopos en los Ríos

Los isótopos mas significativos en el agua de los ríos son el ^2H (deuterio), el ^3H (tritio) y el ^{18}O (oxígeno 18), debido a que permite el cálculo del balance de agua, el estudio de la dinámica del agua y el estudio de las relaciones entre el agua superficial y el agua subterránea de los ríos y sus cuencas fluviales.

1.1.7.1 Isótopos Estables del Hidrógeno y del Oxígeno

Los isótopos del agua, ^2H y ^{18}O son muy útiles debido a su comportamiento conservativo y a su uso como trazadores del ciclo hidrológico, permitiendo definir el origen, historia y recorrido de los flujos de agua en las diferentes partes del ciclo hidrológico.

Las variaciones estacionales de ^{18}O y ^2H son mayores en los ríos en los que la escorrentía superficial procedente de la precipitación reciente es la fuente principal del caudal y son menores cuando la fuente dominante del caudal de los ríos es el agua subterránea.

En las cabeceras de las grandes cuencas las precipitaciones locales son un componente importante del agua fluvial. En las partes bajas de la cuenca, el aporte local de agua de precipitación puede ser menos importante, excepto en el caso de inundaciones. Las contribuciones de diferentes fuentes: superficiales y subsuperficiales, cada una con su relación isotópica característica, determinan la composición isotópica del agua en los ríos. Por tal razón, se deben realizar análisis isotópicos del agua de los ríos, ya que estos proporcionan información

sobre el origen y la cantidad de las diferentes contribuciones: superficiales y subterráneas.

La medición de los isótopos del agua ^2H y ^{18}O proporcionan los mismos resultados en cuanto a su composición isotópica, de modo que es suficiente o igual medir solo uno de los dos. Esto indica que la evaporación del agua de río posee una influencia insignificante en esta composición. No obstante, en los ríos y en las cuencas fluviales de las zonas áridas, donde la evaporación puede ser un factor importante, la combinación de las medidas del ^2H y ^{18}O es de suma importancia ya que permite cuantificar el efecto de la evaporación y estudiar los procesos de mezcla entre el agua del río y el agua subterránea adyacente.

1.1.7.2 Variaciones del ^2H y del ^{18}O en los Ríos

Resulta evidente que la composición isotópica del agua del río esta relacionada con la de la precipitación. En los sistemas pequeños de drenaje, el ^{18}O del agua de escorrentía es igual a la de la precipitación local o regional. En los ríos mas grandes, que transportan agua a lo largo de grandes distancias, puede o no puede haber una diferencia significativa entre el ^{18}O del agua y el de la precipitación media de la zona de muestreo.

En los ríos mas grandes el aumento de ^{18}O durante el verano no se debe a la evaporación, sino que se atribuye a las variaciones estacionales de la precipitación. Por consiguiente, los ríos grandes no solo contienen agua subterránea antigua con una composición isotópica virtualmente constante, sino que también, presentan una componente de incorporación con una variación isotópica relativamente rápida producto de la precipitación.

En los ambientes alpinos y nórdicos el almacenamiento temporal de la precipitación de invierno en formas de capas de invierno y nieve, y su fusión durante el verano, pueden invertir o por lo menos desplazar los ciclos hidrológicos (Rozanski & Froehlich, 2002).

1.1.8 Línea Meteórica o Recta de Craig

En 1961, Harmon Craig publicó su descubrimiento, encontró una correlación lineal obtenida entre la desviación isotópica de ^{18}O vs la desviación isotópica de ^2H , definida por la siguiente expresión:

$$\delta^2\text{H} = a \delta^{18}\text{O} + b \quad (2)$$

Tal como muestra la ecuación 2, la línea de Craig se caracteriza por tener una pendiente de **a** igual a 8 e interceptar al eje de $\delta^2\text{H}$ con un valor **b** igual a 10 conocido como exceso de deuterio. Los valores **a** y **b** pueden variar de acuerdo a cada región y a la procedencia del vapor atmosférico, pero siempre conservando la tendencia lineal de la ecuación. Por ejemplo, en la figura 2 puede apreciarse la Línea Meteórica Local de la Cuenca Superior del Río Lebrija obtenida en el año 2005 (Camacho & Guzman, 2005) comparada con la línea de Craig.

Si existiera un equilibrio termodinámico entre las fases líquida-vapor en el agua de mar, las desviaciones de ^{18}O y ^2H se modificarían en cualquiera de las fases a lo largo de una línea que obedecería a la ecuación:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} \quad (3)$$

Donde no existe exceso de Deuterio, sin embargo, el proceso de evaporación del agua del océano no tiene lugar en condiciones de equilibrio debido al déficit de

humedad de la atmósfera con respecto al valor de saturación; contrario a la condensación, la cuál ocurre en la naturaleza en condiciones muy próximas al equilibrio. Por lo tanto una vez formada la nube, el valor de la pendiente igual a 8, se mantiene constante. La mayor parte de las precipitaciones en el mundo se sitúan alrededor de la Línea meteórica, $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ (Rozanski & Froehlich, 2002).

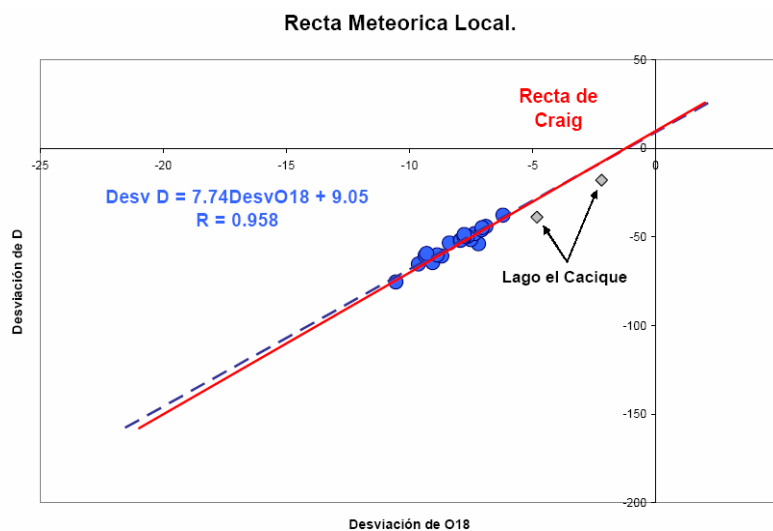


Figura 2. Línea de Craig y Línea Meteórica Local de la Cuenca Superior del Río Lebrija
Fuente: Camacho & Guzman, 2005.

1.2 EL HIDROGRAMA

El hidrograma se debe considerar como una curva integrada de eventos complejos de los componentes del flujo, los cuales se agotan con características de recesión diferentes. Es el registro del caudal de un río en función del tiempo y sirve para:

- Estudiar aportes de agua:
 - Componente escorrentía
 - Componente agua subterránea

- Relacionar lluvia-caudal
- Deducir avenidas máximas y caudales mínimos
-

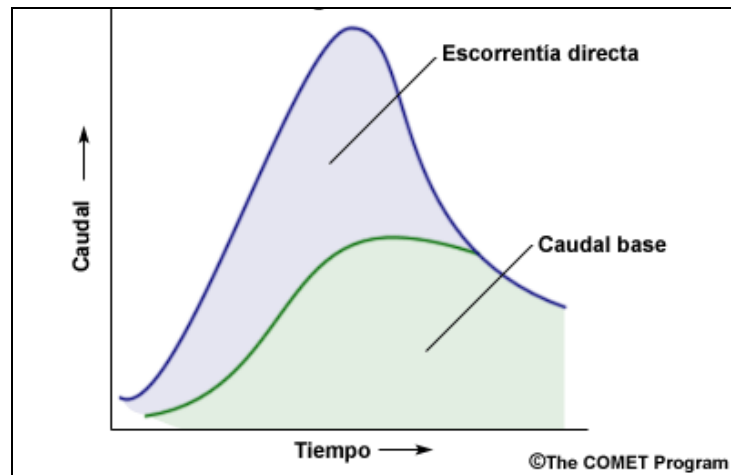


Figura 3. Componentes básicos del hidrograma
Fuente: The COMET Program (2006)

La forma del hidrograma depende de:

- Variabilidad espacial y temporal de la lluvia
- Forma de la cuenca (T. de concentración)
- Características superficiales del terreno
- Tipos y formas de cultivo (terrazas, bancales, etc.)
- Estado inicial de la cuenca.

1.2.1 Componentes del Hidrograma

1.2.1.1 Escorrentía

Se denomina escorrentía superficial al agua procedente de la lluvia que circula por la superficie y se concentra en los cauces. La escorrentía superficial es función de

las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación de la cuenca y está íntimamente ligada a la relación entre aguas superficiales y subterráneas de la cuenca.

Descripción del proceso de escorrentía.

Cuando en una cuenca se inicia un proceso de lluvia, las primeras gotas de lluvia son retenidas y almacenadas por las hojas y tallos de la cubierta vegetal, a partir de un cierto límite, las gotas comienzan a alcanzar el suelo y después de un breve período de tiempo, casi todas las gotas alcanzan el suelo. En un segundo proceso, el suelo a través de sus capas orgánicas y sobre todo en sus depresiones, almacena una cierta cantidad de agua, dando inicio al proceso de percolación del agua a las capas inferiores del suelo, fenómeno llamado infiltración.

Cuando la capacidad de almacenamiento del suelo, ya descontada la infiltración, está en el límite, se inicia el proceso de circulación superficial del agua. En esta circulación superficial se pueden distinguir dos partes:

- una correspondiente al **flujo subsuperficial**, que corresponde a la capa de agua que circula próxima al suelo;
- y otra al **flujo superficial** propiamente dicho, que circula con mayor velocidad.

Es este último el que genera realmente lo que se entiende en ingeniería como escorrentía propiamente dicha.

1.2.1.2 Flujo Base

El caudal base se define como el escurrimiento subterráneo que se produce bajo el nivel freático, que de manera mas lenta llega hasta la salida de la cuenca alimentando las corrientes cuando no se presentan eventos de lluvias; en otras

palabras, es el caudal que se presenta antes, durante y después de la incorporación del volumen precipitado (escorrentía superficial) al hidrograma, esto obedece al agua que se introduce a la corriente por precipitaciones anteriores (escorrentía subsuperficial) o bien por la infiltración de agua desde los acuíferos a la corriente (flujo subterráneo).

Entonces el flujo base es considerado como el resultado de la descarga del agua subterránea en la corriente del río. (Chapman, 1999).

1.2.2 Separación del Flujo Base

La escorrentía directa proviene de la precipitación, y el flujo base está formado normalmente por agua proveniente de varias tormentas que ocurrieron antes de la considerada y es muy difícil determinar a cuáles eventos de precipitación pertenece. Para poder correlacionar la precipitación con los hidrogramas que genera, es necesario antes separar el flujo base de la escorrentía. En vista de que rara vez es posible conocer con precisión la evolución de los niveles freáticos durante una tormenta y que el punto de inflexión o punto final del escurrimiento directo (véase Figura 4.), es generalmente difícil de distinguir, la tarea de separar el flujo base del directo no es sencilla en la mayoría de los casos (Aparicio, 1987).

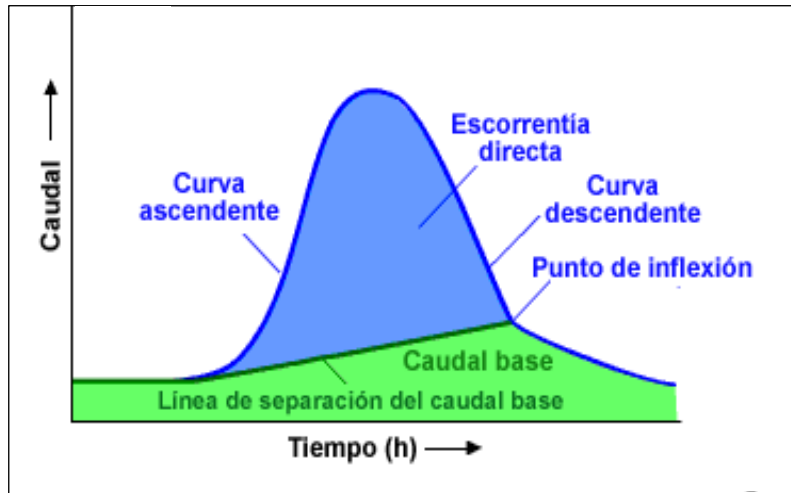


Figura 4. Terminología Importante del Hidrograma
Fuente: The COMET Program (2006)

Según las primeras estimaciones de flujo base, se determinó que la escorrentía directa casi siempre aporta un componente del caudal total en el hidrograma mucho mayor que el que genera el flujo base (Aparicio, 1987), sin embargo, algunos métodos más sofisticados (por ejemplo de algoritmos Chapman, 1999) al considerar el comportamiento del flujo base similar al del hidrograma, en donde el flujo base aumenta a medida que aumenta la escorrentía total, arrojan en algunos casos porcentajes de flujo base mayores al porcentaje correspondiente a escorrentía directa.

1.2.2.1 Métodos de Separación del Flujo Base

En la literatura se encuentran desarrollados varios métodos de separación de flujo base, entre los cuales se hallan los métodos gráficos y los métodos de algoritmo. Entre los gráficos se encuentran: el método de la línea recta, el método de las dos líneas rectas, el método de la línea curva, etc. (Aparicio, 1987), en los cuales no

se tiene en cuenta los parámetros físicos de la cuenca y en general subestiman el volumen del flujo base. No obstante, los resultados obtenidos a través de dichos métodos le permite al ingeniero diseñar y construir sus obras con un holgado factor de seguridad a partir de en una estimación sencilla, valida y suficiente para ciertos propósitos.

Los métodos de intervalo (método de Intervalo fijo, método del intervalo desplazado, método del mínimo local) presentados por USGS en el programa HYSEP (Sloto y Croase, 1996), tienen en cuenta algunos parámetros de la cuenca tales como el área pero solo son aplicables si se cuenta con datos históricos del nivel del río, ya que trabaja con hidrogramas diarios.

Los métodos de algoritmo permiten la separación de cualquier tipo de evento, por medio de algoritmos numéricos que generan un comportamiento del flujo base similar al hidrograma. Por ejemplo: Algoritmo de un parámetro (Chapman y Maxwell, 1996); el algoritmo de dos parámetros desarrollado por Boughton en 1993 (Boughton, 1993); algoritmo de tres parámetros (Jakeman & Hornberger, 1993), Algoritmo de Smakhtin (Smakhtin, 2001).

1.2.2.2 Separación del Flujo Base Mediante Técnicas Isotópicas

El principio de la separación de flujo base mediante isótopos estables está fundamentado en el contraste de la composición isotópica de los componentes del hidrograma. Si no existe una diferencia entre la concentración isotópica de la precipitación y del agua subterránea, la separación utilizando isótopos estables es imposible. Otros componentes que se pueden esperar que varíen entre la precipitación y el flujo base, son los sólidos disueltos, usualmente representados por la conductividad eléctrica o los cloruros.

Los primeros estudios de separación de flujo base mediante técnicas isotópicas asumieron la participación única de los dos componentes más importantes del hidrograma: El flujo base y la escorrentía superficial. Actualmente se ha demostrado que dicha aproximación es correcta y que es posible involucrar mas componentes mediante la utilización de trazadores químicos (Clark, I. & Fritz, P., 1997). La separación de flujo base en dos componentes (véase Figura 5) puede ser descrita así:

$$Q_T = Q_s + Q_0 \quad (3)$$

La ecuación (3) se basa en la ecuación de continuidad, es decir: “la razón con la cual un fluido entra en un volumen de control debe ser igual a la razón con la que el fluido sale del mismo volumen”. Donde Q_T representa la escorrentía total, Q_s la componente de escorrentía superficial y Q_0 la componente del flujo base.

Si se supone una mínima variabilidad de la composición isotópica del agua subterránea y se tiene en cuenta la conservación del flujo de masa, suponiendo que no hay pérdidas, se considera que la densidad del sistema representado por la ecuación 3 es constante Entonces se le aplica este principio a la ecuación 3, denominado balance de masas, que relaciona cada componente con su respectiva concentración isotópica. La ecuación 3 se convierte en:

$$Q_T \delta_t = Q_s \delta_s + Q_0 \delta_0 \quad (4)$$

Donde Q_T , Q_0 , Q_s , son la escorrentía total, flujo base y escorrentía superficial respectivamente y δ_T , δ_0 , δ_s , corresponden a las desviaciones isotópicas de la escorrentía total, del flujo base y de la escorrentía superficial respectivamente.

Despejando Q_s en (3) y Q_0 en (4):

$$Q_s = Q_T - Q_0 \quad (5)$$

$$Q_0 = \frac{Q_T \delta_T - Q_s \delta_s}{\delta_0} \quad (6)$$

finalmente se obtiene:

$$Q_0 = Q_T \left(\frac{\delta_T - \delta_s}{\delta_0 - \delta_s} \right) \quad (7)$$

Las desviaciones isotópicas requeridas por la ecuación (7) (δ_T = desviación isotópica de la escorrentía total; δ_0 =desviación isotópica del flujo base, compuesta por el agua subterránea y el agua subsuperficial y δ_s =desviación isotópica de la escorrentía superficial), demandan la realización de muestreos que permitan la caracterización de los tres componentes involucrados.

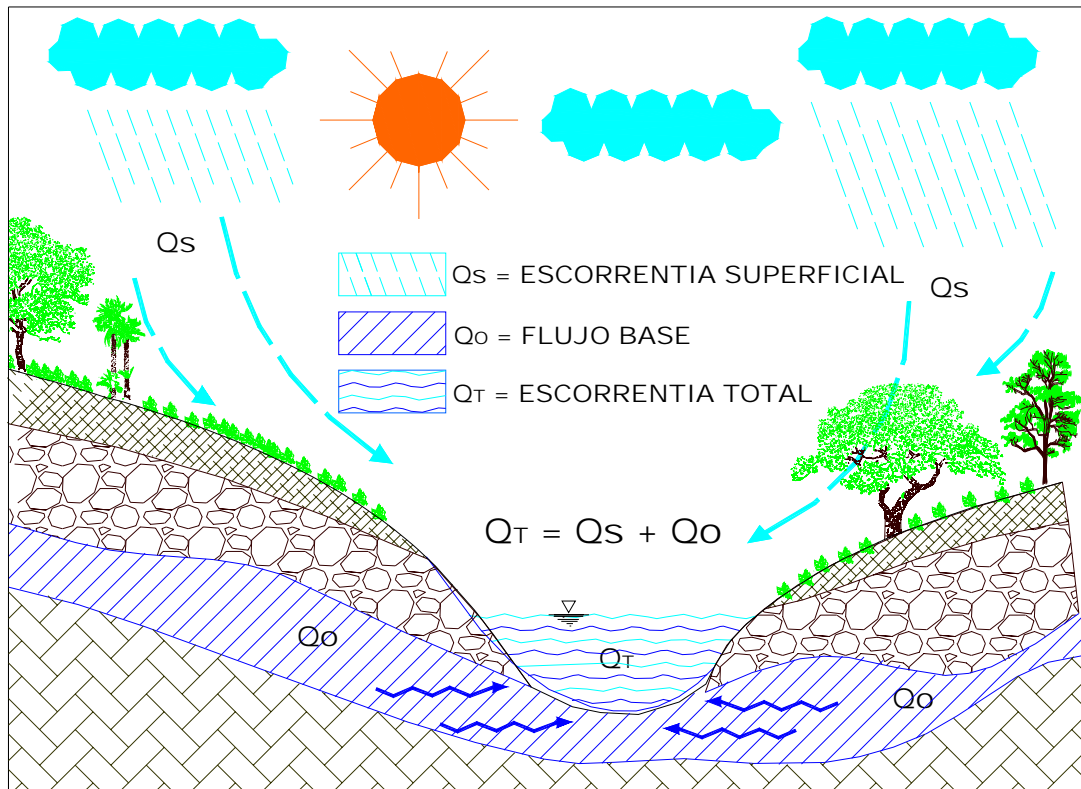


Figura 5. Fundamento conceptual de los elementos del hidrograma expresado en la ecuación 3.

Determinación de las Concentraciones de los Componentes del Hidrograma

A continuación se presentan los diferentes muestreos que deben realizarse para determinar las concentraciones isotópicas de cada uno de los componentes del hidrograma.

- **Precipitación.** En la mayoría de las separaciones isotópicas, la mayor parte de la precipitación se recoge y se analiza para rendir un solo valor isotópico al mes. Por esta razón, no es representativo de la precipitación efectiva. Puede ser más realista recoger más de una muestra de la precipitación durante un período del

acontecimiento y obtener el promedio ponderado de las concentraciones isotópicas, este valor será calculado como:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (8)$$

Donde P_i es el valor de la precipitación en mm y δ_i es la desviación isotópica recogida de la precipitación. Este valor representa la composición isotópica media del agua nueva que entra a la cuenca, pero no se toma dentro de la variabilidad isotópica de la tormenta (McDonnell J.J y Bonell M, 1991).

- **Flujo Base.** Para la determinación de la concentración isotópica del flujo base se tendrán que muestrear la corriente del río, en varios veranos o épocas de estiaje; con una regularidad de una a dos semanas. Para luego poder determinar su comportamiento promedio mensual o estacional y así poder conocer la concentración isotópica en cualquier época del año.
- **Agua Subterránea.** En cambio para la firma isotópica del agua subterránea se muestrea mensualmente durante todo el año en los piezómetros de los acuíferos alrededor de la zona de estudio los cuales aportan agua al río, para así obtener el comportamiento mensual del agua subterránea.
- **Agua Subsuperficial.** Para la determinación de la composición isotópica del agua subsuperficial se tendrá que hacer el muestreo con un limnómetro a diferentes profundidades, para así poder conocer su comportamiento isotópico promedio mensual. (Laudon H & Hemond H, 2002).
- **Escorrentía Total.** Para determinar la concentración isotópica de la escorrentía total se debe hacer el muestreo durante el evento con intervalos pequeños, dependiendo de la duración de la precipitación y del comportamiento

de la cuenca, se recomienda intervalos de una hora o más cortos, donde debe hacerse el mayor número de muestreo en intervalos mas cortos en la rama ascendente del hidrograma, disminuyendo el número de muestreos durante la curva de recesión (Tekeli Y. & Sorman A, 2003).

Si se utilizan mas trazadores (isotópicos y químicos) y si se involucran mas componentes del hidrograma pueden obtenerse más ecuaciones de separación de flujo base, como la que se muestra a continuación.

$$Q_{GW} = \frac{Q_T(Si_T - Si_S) - Q_{SB}(Si_{SB} - Si_S)}{Si_{GW} - Si_S} \quad (9)$$

Donde QT, QSB, QGW, QS, es la escorrentía total, subsuperficial, subterránea y superficial respectivamente, δT, δS, δSB, δGW, es la desviación de isótopos de ¹⁸O para la escorrentía total, superficial (la cual está representada por la desviación isotópica de la precipitación), subsuperficial y subterránea respectivamente, SiT, SiS, SiSB, SiGW, son las concentraciones de sílice de la escorrentía total, superficial, subsuperficial y subterránea respectivamente (Clark y Fritz, 1997).

CAPITULO 2

ANTECEDENTES, MUESTREOS E INFORMACIÓN ISOTÓPICA EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA

Con el ánimo de recopilar los datos existentes; documentarlos y en cierto modo buscar complementarlos, el presente capítulo se refiere a los estudios hidrológicos e hidrogeológicos efectuados sobre la Cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L.) basados en técnicas isotópicas. Ya que uno de los objetivos del presente proyecto de grado es realizar la separación de flujo base de la C.S.R.L., teniendo en cuenta la información disponible de isótopos estables, resultado de los muestreos.

2.1 GENERALIDADES DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA

La cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L.), constituye en la actualidad la principal fuente de abastecimiento de agua para Bucaramanga y toda su área metropolitana. Su superficie alcanza los 1280 km² lo que equivale a una cuenca hidrológica de tamaño medio y abarca alrededor de diez municipios del departamento de Santander. La Figura 6. muestra la localización de la CSRL en el departamento de Santander, Colombia.

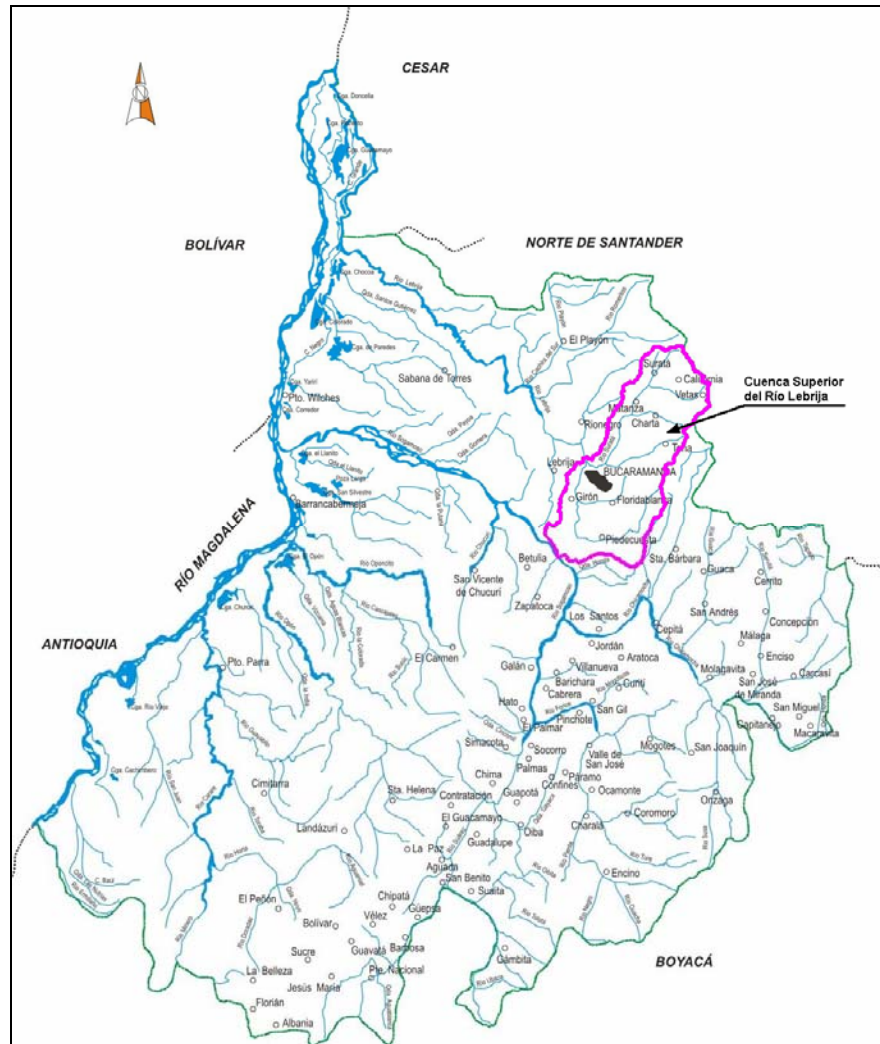


Figura 6. Localización regional de la C.S.R.L.

Fuente: Secretaria de plantación del departamento de Santander, 1995

La C.S.R.L. abarca alrededor de 10 municipios del departamento de Santander (Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Surata, Tona, California, Vetás, Matanza, Charta); conformada por cuatro subcuencas: son Río de Oro, Río Frío, Río Tona y Río Surata como se muestra en la Figura 7.

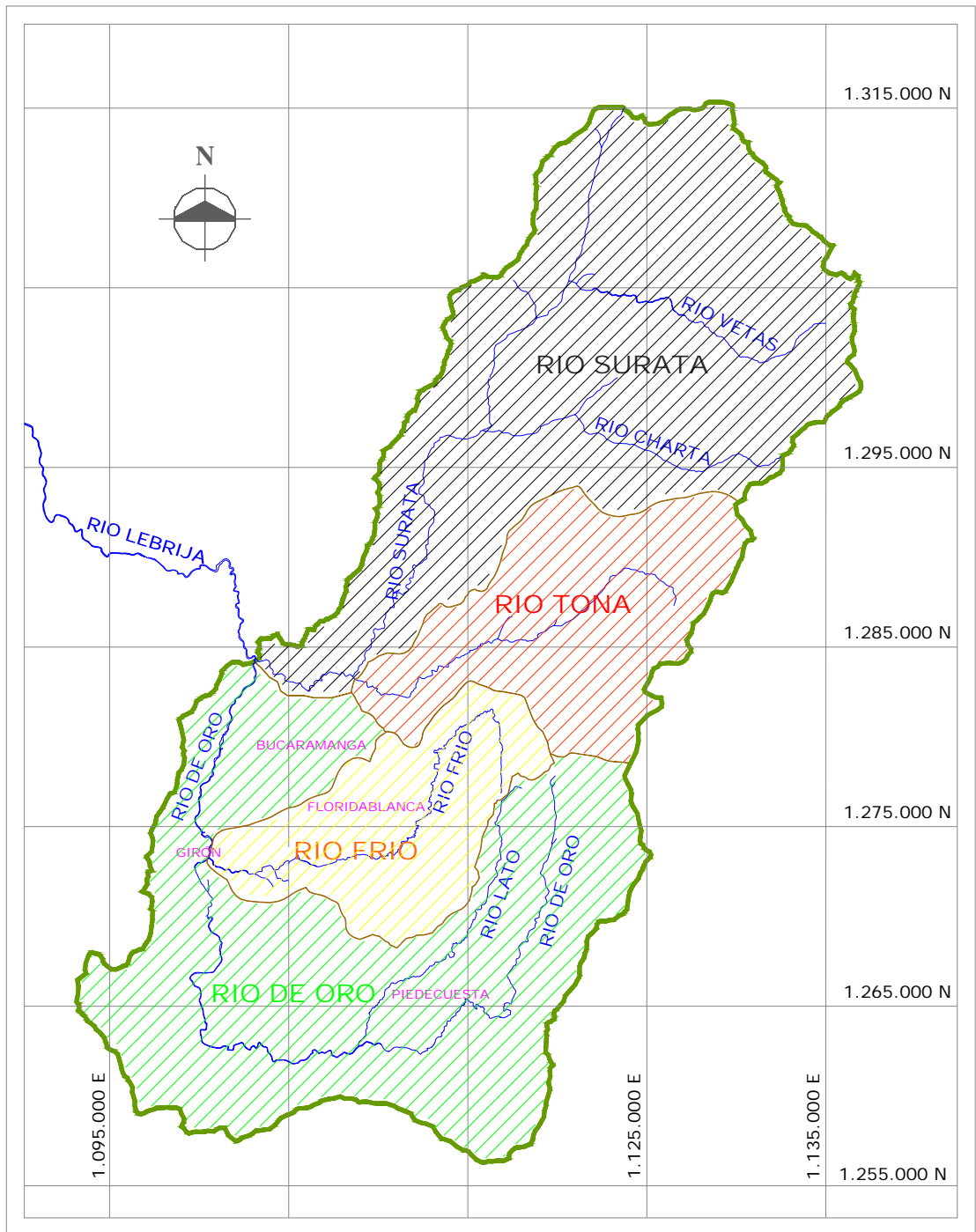


Figura 7. Subcuencas de la C.S.R.L.
Fuente: Adaptado de Balaguera & Serrano, 2006

2.2 PERSPECTIVA GENERAL DE LAS INVESTIGACIONES EXISTENTES

El uso de herramientas isotópicas y técnicas nucleares en el estudio del Ciclo Hidrológico, se han ido utilizando de manera progresiva sobre la C.S.R.L. Los primeros estudios de la región basados en técnicas isotópicas se tienen lugar hacia 1992 con Navia y Suárez a través de su proyecto de grado, donde se trabajó en un modelo hidrogeológico del flujo de aguas en el acuífero de Bucaramanga.

A partir de esa iniciativa, el GPH de la UIS, ha jugado un papel muy importante en los muestreos de isótopos estables del agua sobre la CSRL, a través de informes de investigación, publicaciones en revistas y proyectos de grado.

2.3 DATOS ISOTÓPICOS DISPONIBLES DE AGUA SUBTERRÁNEA

Gómez, Anaya y Colegial, a través de publicaciones en revistas e informes de investigación (Gómez , Colegial, 2003 y Gómez, Anaya 2004) realizaron estudios de isótopos estables del agua subterránea (drenes, piezómetros y pozos) de la C.S.R.L., con el fin de identificar acuíferos de Bucaramanga y estudiar el fenómeno de recarga en el macizo de Santander.

Los resultados de dichos estudios fueron considerados en la separación de flujo de la C.S.R.L. que serán presentados en el Capítulo 3.

2.4 DATOS ISOTÓPICOS DISPONIBLES DE PRECIPITACIÓN

En el estudio realizado por Navia y Suarez (1994), se tomaron muestras de 9 corrientes superficiales de agua, en la zona del macizo de Santander, mientras que en el estudio de 2002-2003 desarrollado por Gomez y Colegial las corrientes muestreadas fueron 7, tomados tanto en verano como en invierno. Los datos isotópicos de dichos estudios pueden verse en Navia y Suarez, 1994 y Gomez y Anaya, 2004. Las muestras extraídas de las corrientes superficiales fueron consideradas representativas de la precipitación de la zona, ya que fueron recolectadas cerca de los nacimientos donde el fraccionamiento isotópico no ha alterado la composición del agua y en las zonas altas en donde la temperatura es favorable para evitar la evaporación.

Entre Octubre de 2004 y Marzo de 2005 se llevó a cabo un muestreo de isótopos estables en precipitación, para el proyecto de grado: “Implementación de una Red de Muestreadores de isótopos Estables en la Precipitación para Obtener la Recta Meteorológica Local” (Camacho & Guzmán, 2005) y se realizó una revisión de la información de isótopos de precipitación. Dicha recta fue presentada en el capítulo 1 y hace referencia a la figura 2. Los resultados isotópicos obtenidos a partir del muestreo realizado por Camacho y Guzmán fueron adoptados para a la metodología de separación de flujo base de la C.S.R.L. desarrollada en el capítulo 3 del presente trabajo.

Mediante los proyectos de grado: “Uso de los Trazadores Ambientales y Estudio de Recarga” (Duarte & Sánchez, 2005) y “Estimación de la Recarga de la CSRL Mediante el Ion-Cloruro” (Barrera B., 2006); se continuó con el muestreo de isótopos estables de precipitación; sin embargo, a la fecha no se cuenta aún con los resultados de análisis isotópicos.

2.5 DATOS ISOTOPICOS DISPONIBLES DE ESCORRENTIA

A partir del año 2004 se realiza un muestreo de escorrentía con el proyecto de grado: “Implementación de una Metodología para el Muestreo de Isótopos Estables y Aplicación a la Separación de Flujo Base” (Maldonado & Velasco, 2005); quienes consideraron en ese tiempo imposible implementar el método de separación del hidrograma por medio de isótopos estables en nuestro país, por no contar con datos históricos de escorrentía total y de desviaciones isotópicas en forma simultanea. Por este motivo aplicaron la separación del flujo base a datos existentes de dos cuencas diferentes fuera del país: Kentucky (USA) y la de Brugga (Alemania).

Además, realizaron los preparativos y mejoras necesarias para la implementación de este método en Colombia en un futuro. Se elaboró un protocolo de muestreo de isótopos estables del flujo base, el cual fue implementado sobre cuatro puntos de la Cuenca Superior del Río Lebrija durante seis meses en los sitios que se pueden observar en la figura 8.

El protocolo desarrollado en el proyecto de grado de Maldonado & Velasco se ha seguido utilizando en los muestreos realizados en el presente trabajo, se le dio continuidad al muestreo de isótopos estables de flujo base y sus resultados isotópicos se aplicarán a la Separación de Flujo Base de la CSRL

En el capítulo 3 se realizará una separación del flujo base de la C.S.R.L., considerando los datos de isótopos estables obtenidos de los muestreos expuestos en el presente capítulo.

2.6 MUESTREO DE ISOTOPOS ESTABLES EN EL FLUJO BASE

La continuación del muestreo isotópico de flujo base en la cuenca superior del Río Lebrija además de ser uno de los objetivos del presente proyecto, permite caracterizar durante un mayor periodo de tiempo el comportamiento isotópico de flujo base. El propósito del estudio del flujo base es conocer el comportamiento de los ríos, la relación entre el flujo base y la respuesta de los acuíferos.

2.6.1 Localización de los Puntos de Muestreo

Los principales criterios que dieron origen a la selección de los sitios y condiciones de muestreo para caracterizar isotópicamente flujo base en la CSRL fueron:

- Lograr una caracterización de las diferentes zonas de aporte de flujo base (Macizo de Santander y Zona Aluvial).
- Cubrimiento de las principales corrientes de la CSRL y cierre de la misma
- Seguridad del personal de campo encargado del muestreo.
- Elección de secciones apropiadas del río con características específicas para tomar muestras representativas.
- Estar localizadas cerca de una estación de medición de caudal

De acuerdo al Protocolo de Muestreo de Isótopos estables de Flujo Base (Maldonado & Velasco, 2005).

De esta manera se seleccionaron 4 sitios de muestreo que involucran a su vez a los ríos: río Lebrija, río de Oro, río Frío y río Suratá. La localización de dichos puntos pueden observarse en la figura 8.

A continuación se presenta una tabla con algunas características generales de cada una de las estaciones de muestreo.

Tabla 3. Información General de los sitios de Muestreo.

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

Código	Ciudad	Nombre de la Estacion	Corriente	Latitud	Longitud	Este*	Norte*	Altitud	Tipo de la Estación
LG01CM	Bucaramanga	Café Madrid	Río Lebrija	7° 17'	-73° 8'	1104647.798	1296958.54	600	LG
LM02RO	Piedecuesta	Conquistador	Río de Oro	6° 58'	-73° 2'	1115772.034	1261956.207	1000	LM
LM03RF	Florida	La Esperanza	Río Frío	7° 4'	-73° 5'	1110222.275	1273005.092	1050	LM
LM04MA	Bucaramanga	Majadas	Río Suratá	7° 9'	-73° 9'	1102837.133	1282207.072	760	LM

* Cordenadas Referenciadas en la ciudad de Bogota, Co.

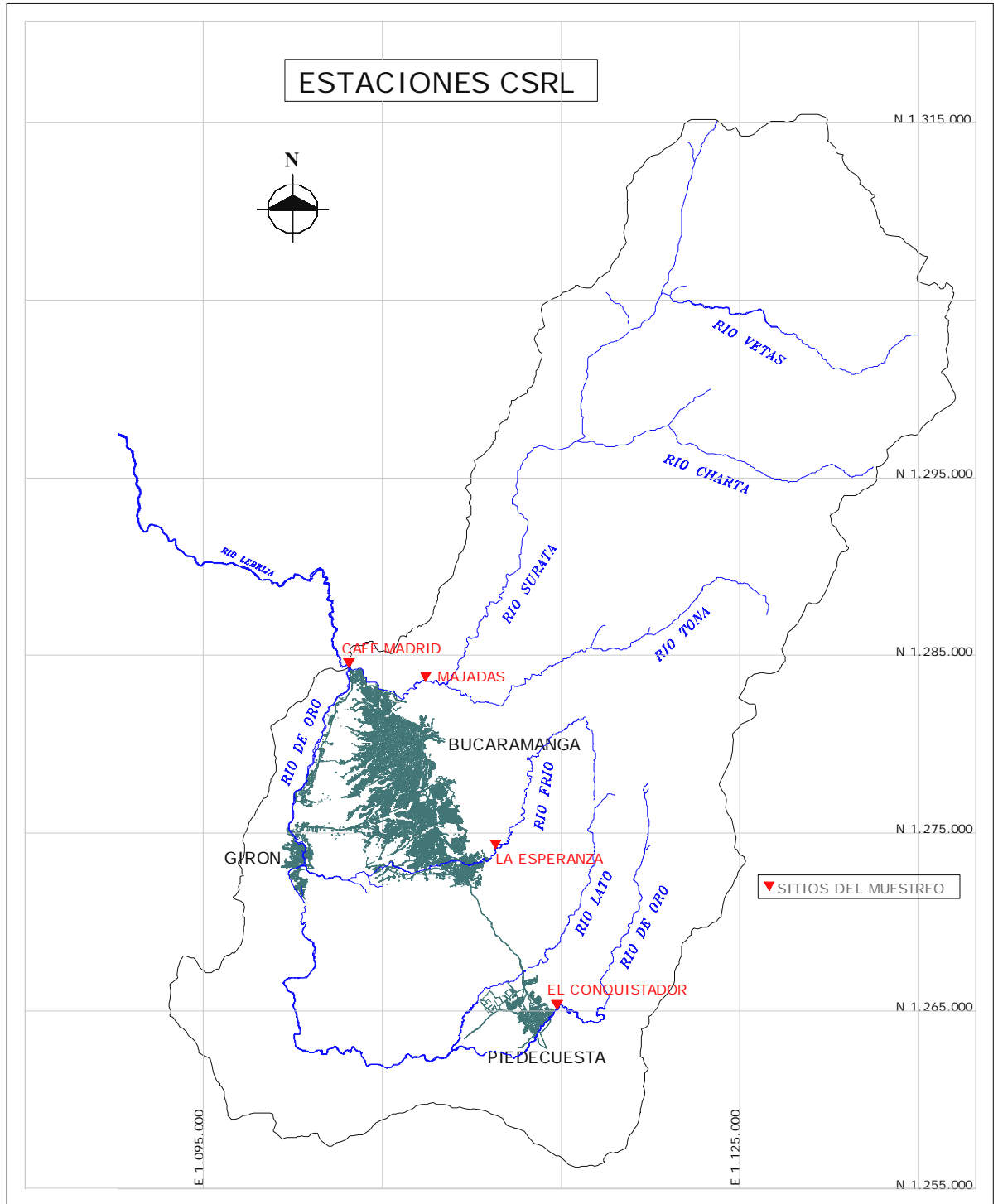


Figura 8. Localización de los cuatro puntos de muestreo

2.6.1.1 El Conquistador

Estación situada a 20 metros aguas arriba de la bocatoma del acueducto de Piedecuesta, La Piedecuestana en el barrio El Mirador, esta estación representa geológicamente la zona oriental de la C.S.R.L. El procedimiento para la toma de la muestra en este punto se hace directamente sobre el río.

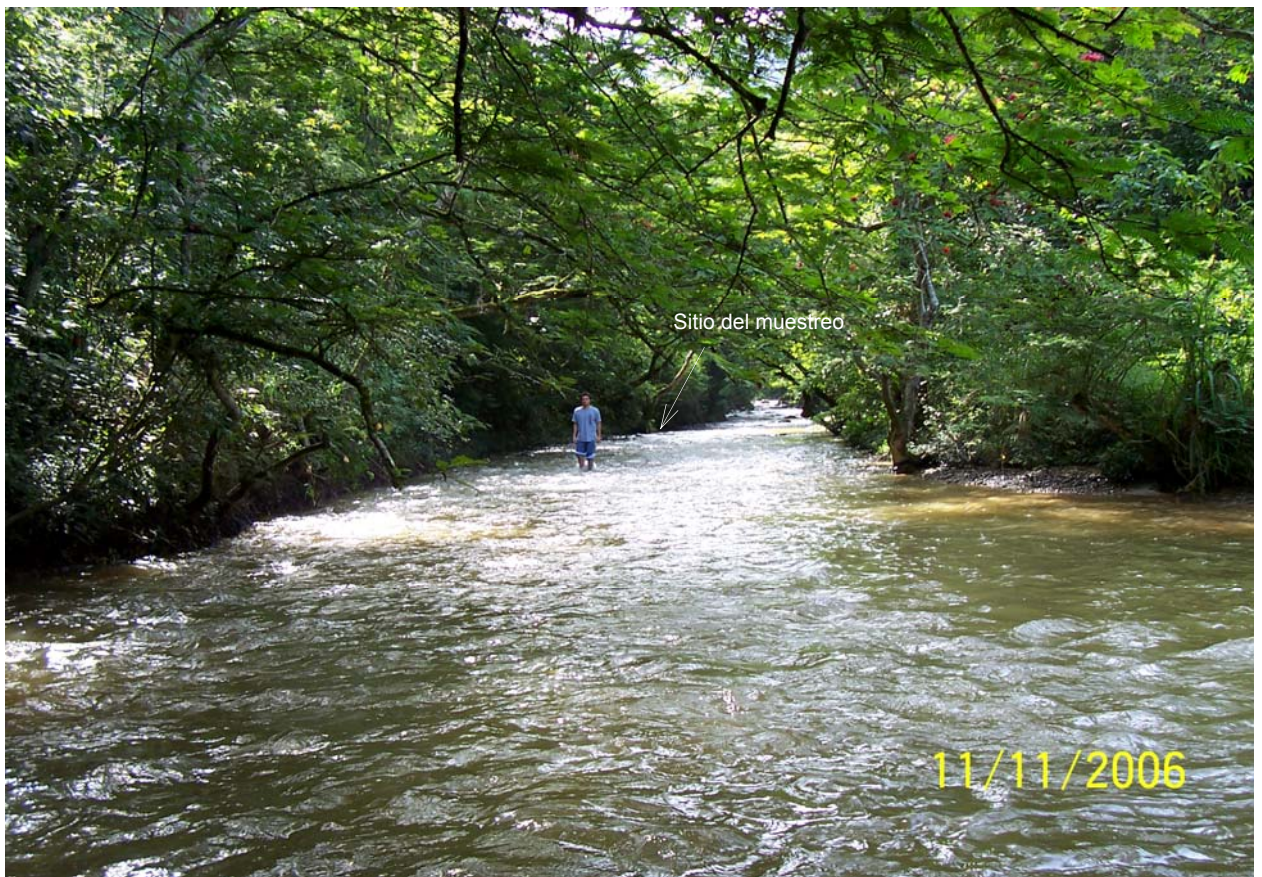


Foto 1. El Conquistador. Ubicación del sitio de muestreo. 11 Nov. 2006

2.6.1.2 La Esperanza

La estación la esperanza representa la geológicamente la zona oriental de la CSRL, en el límite de la zona Oriental y Occidental; está ubicada en la bocatoma del acueducto de Floridablanca sobre el Río Frío y se cuenta con una mira que es registrada a diario por operadores del acueducto. En este punto la muestra se toma directamente del río.

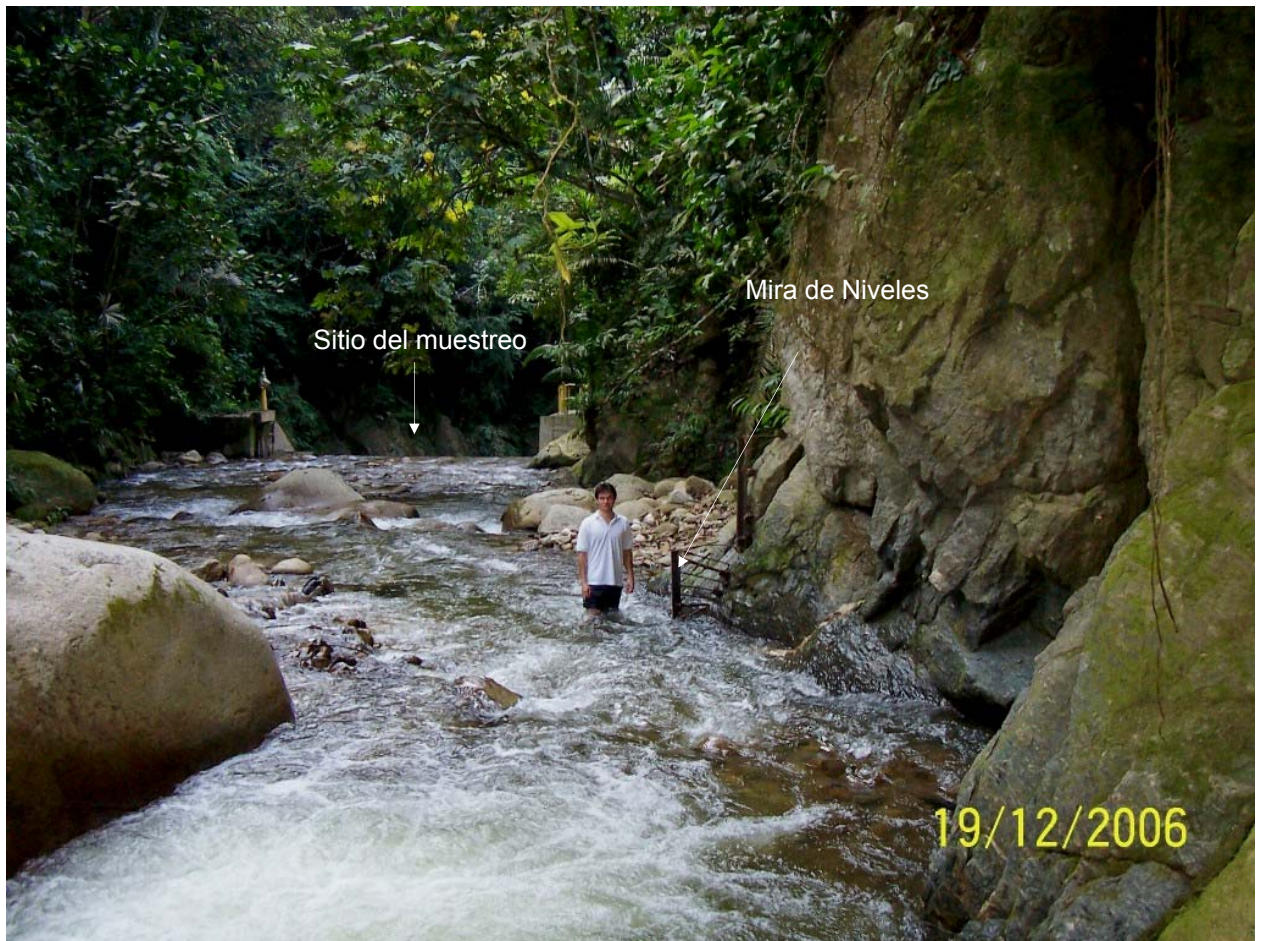


Foto 2. La Esperanza. Ubicación del sitio del muestreo. Aguas abajo. Dic. 2006.

2.6.1.3 Majadas

La estación de Majadas está localizada al Nor-Este de la ciudad de Bucaramanga; geológicamente está entre la zona Oriental y Occidental, representando la zona oriental de la CSRL; se encuentra localizada sobre el río Suratá en la estación Limnimetrica del IDEAM. En este punto la muestra se toma con ayuda del marco y botella desde el puente.



Foto 3. Majadas. Ubicación del sitio de Muestro. Oct. 2006.

2.6.1.4 Café Madrid

La estación de Café Madrid es uno de los sitios claves en el muestreo de isótopos de flujo base no solamente por estar ubicada en cierre de la cuenca, si no por contar con un limnógrafo que ofrece valores confiables de caudal en función del tiempo. Se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Bucaramanga en el barrio El Túnel a la altura del Río Lebrija.



Foto 4. Estación Limnigráfica Café Madrid. Abril de 2006.

2.6.2 Práctica del Muestreo

El trabajo de campo del presente proyecto comprende el periodo de tiempo desde Agosto del 2005 hasta Junio del 2006. Se muestrearon cuatro estaciones (ver figura 8) que involucran a su vez las corrientes en los ríos: Río Lebrija, Río de Oro, Río Frío y Río Suratá, con el propósito de caracterizar el comportamiento del flujo base en la Cuenca Superior del Río Lebrija.

Durante el periodo de muestreo correspondiente al desarrollo del presente proyecto de grado, fueron tomadas dos muestras diarias en cada una de las estaciones, una destinada para la obtención de los parámetros fisicoquímicos (ver anexo 1) y la otra muestra de agua fue enviada a Viena (Austria), donde se les realizarán los estudios correspondientes para la obtención de la concentración isotópica de ^2H y ^{18}O .

2.6.2.1 Toma de Las Muestras para el Flujo Base

Este trabajo hace referencia al momento en el cual el investigador dispone de todos los procedimientos, técnicas y logísticas para buscar la información requerida en el tema de estudio. La habilidad del operador encargado de la recolección de las muestras cuenta mucho en este proceso, ya que los buenos resultados del muestreo dependen de la calidad con este se realice y del cuidado en el almacenamiento y envío de las muestras.

Se realizaron visitas mensuales a cada una de las estaciones en estudio con una duración total aproximada del recorrido de 8 horas. Además, se empleó un diario

de notas donde se registró el proceder de las personas encargadas de la recolección, los inconvenientes encontrados y el estado del tiempo.

Instrumentos de Recolección

Marco Metálico: Este equipo se puede usar desde varios sitios, como por ejemplo desde un puente colgante como en el caso de la estación Café Madrid, tal como lo muestra la foto 5 y la figura 9.



Foto 5 . Utilización del marco metálico

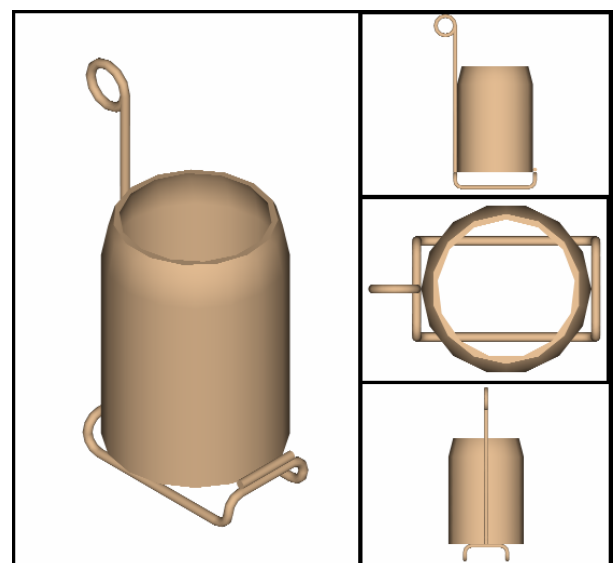


Figura 9. Diseño de marco metálico para la recolección de muestras.

Envases: Consta de una botella y una tapa de seguridad, elaborado en polietileno de alta densidad que permite la conservación inalterada de la muestra por varios meses. La capacidad de cada uno de los envases utilizados para el muestreo fue de 60 mL. Se recomienda para transporte aéreo de muestras, ajustar

adecuadamente la tapa y sellar la boquilla con cinta de teflón, para evitar los efectos del cambio de presión en el contenido.



Foto 6. Envase de polietileno para almacenamiento de las muestras.

ELJKELKAMP: Es una sonda de multiparametros, que mide y cuantifica elementos químicos como pH, redox, electro-conductividad, oxígeno disuelto, % de oxígeno disuelto, salinidad, % de salinidad y temperatura.



Foto 7. Sonda multiparametros ELJKELKAMP

2.6.3 Resultados Obtenidos

En el anexo 1 se presenta una tabla con los parámetros fisicoquímicos obtenidos a partir del muestreo de isótopos estables en el flujo base.

Se encontró una Conductividad Eléctrica promedio de 174.38 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que puede corroborar la turbiedad innata del río en los sitios de muestreo, y la presencia de sales disueltas producto del contacto continuo con rocas ricas en minerales. Un pH promedio de 5.56 que hace referencia a un líquido ácido, con presencia de iones.

Los parámetros fisicoquímicos se obtuvieron en el laboratorio de hidráulica en el GPH de la UIS, por medio de la sonda ELJKELKAMP, a una temperatura promedio de 23.64°C, que no corresponde a la temperatura real en el instante en que fueron tomadas las muestras. Se recomienda que para una mayor certeza de estos parámetros, sean realizadas dichas mediciones in-situ.

2.7 MUESTREO DE ISOTOPOS ESTABLES EN LA ESCORRENTÍA TOTAL

La necesidad de contar con las desviaciones isotópicas (δ_T , δ_S y δ_O) contenidas en la ecuación (7) demanda la realización de muestreos que permitan su caracterización mediante protocolos que garanticen la obtención de resultados confiables.

La obtención de la desviación isotópica de la escorrentía total δ_T , debe ser realizada sobre el río a estudiar, se debe contar con una estación automática cercana al sitio del muestreo que registre el caudal del río en intervalos cortos de

tiempo, como por ejemplo un limnógrafo o un diver (Tekeli Y. y Sorman A, 2003). El procedimiento del muestreo consiste en tomar una serie de muestras del río durante el evento particular que se vaya estudiar.

Para dicho muestreo, se seleccionó la estación de Café Madrid en el Río Lebrija, ya que cumple con las condiciones requeridas para la correcta realización de este estudio, como son: contar con una estación limnográfica (propiedad del IDEAM) y estar ubicada un punto estratégico en el cierre de la cuenca.

Teniendo en cuenta el comportamiento bimodal definido por las oscilaciones de la zona de convergencia intertropical (Hoffman, 1992), como lo demuestra el histograma típico anual de la CSRL que se puede apreciar en la figura 10 , se seleccionó el mes de Abril como un mes favorable por su época invernal. Con el propósito de hacer coincidir la fecha del muestreo con un evento de precipitación, se debieron tener en cuenta los siguientes aspectos: antecedentes de precipitaciones nocturnas con frecuencia diaria, el aparente estado del tiempo durante el día y el pronóstico suministrado por el IDEAM.

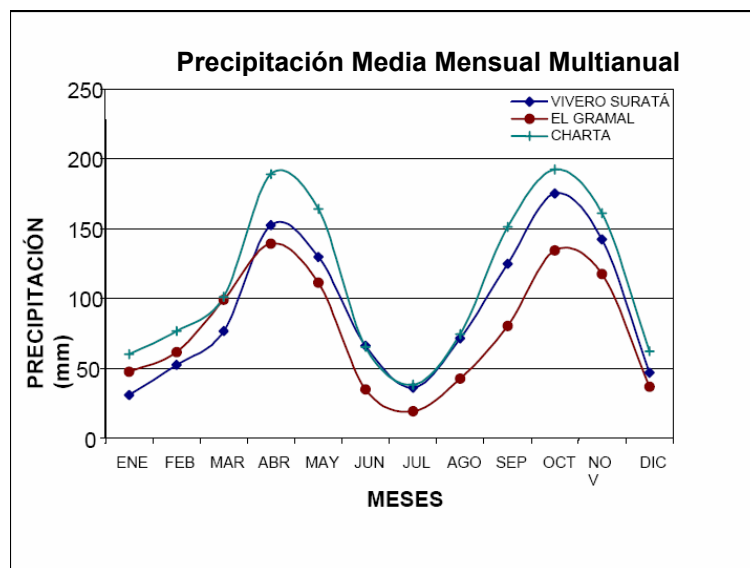


Figura 10. Comportamiento Bimodal de la precipitación

Por lo tanto se decidió programar el muestreo para el día 29 de Abril, desde las 09:00 a.m. hasta las 08:00 a.m. del día 30 de Abril de 2006, presentándose efectivamente en este intervalo el evento esperado. En el anexo 2 se presentan los niveles del río registrados por el limnigrafo de Café Madrid, junto con los parámetros fisicoquímicos correspondientes de cada una de las muestras.

Siguiendo las recomendaciones de Tekeli Y. y Sorman A, se realizó el muestreo en intervalos de 30 minutos, mientras que en el limnimetro se registraron aumentos importantes en el nivel del río y luego en intervalos de 1 hora a medida que el nivel del río disminuía progresivamente.

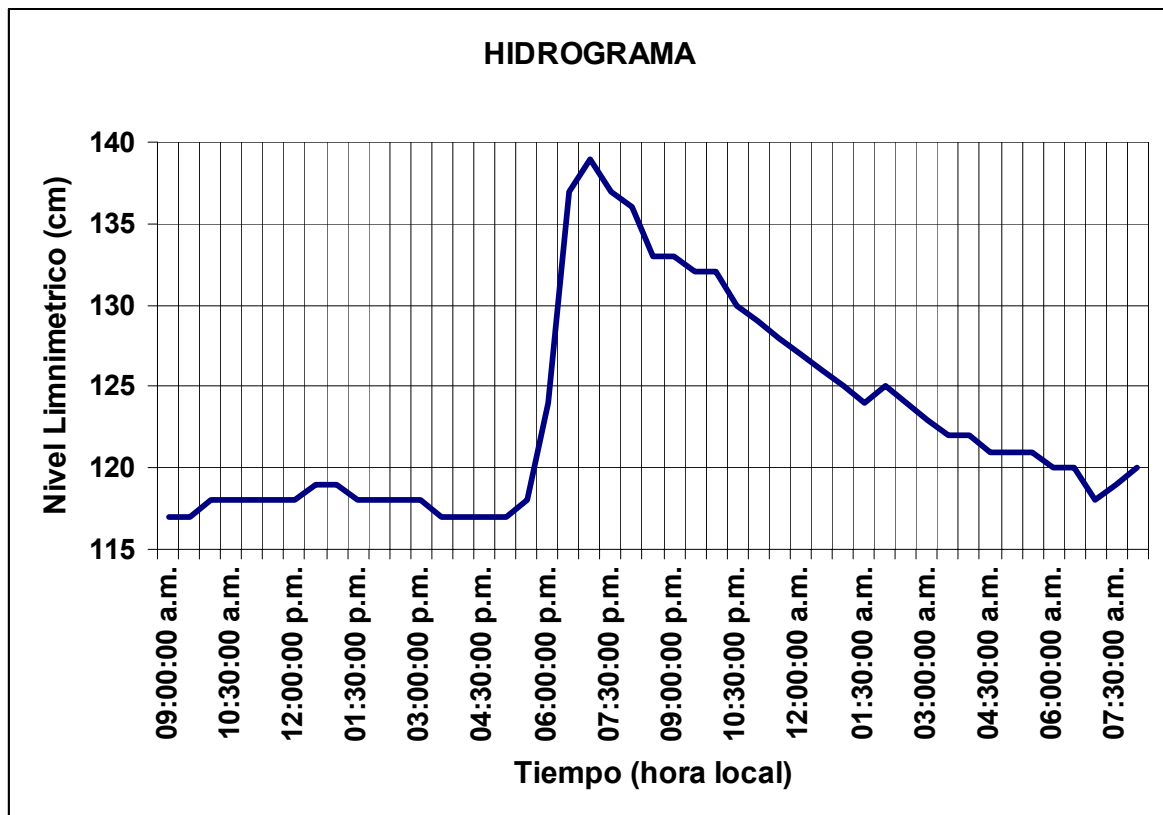


Figura 11. Hidrograma (Nivel Limnimetrico vs. Tiempo) del evento de precipitación 29 y 30 de Abril 2006, punto de estación Café Madrid

El trabajo de campo se inició el día 29 de Abril en la estación de Café Madrid con la primera toma de muestra del río Lebrija a las 09:00 a.m., hora local y su correspondiente registro de nivel proporcionado por la mira existente, con un estado de tiempo soleado. Sin embargo, aproximadamente a las 12:00 m. el clima se torno nublado y se continuó con la recolección de muestras del río cada 30 minutos., con el ánimo de ser partícipes de un evento de precipitación, que efectivamente se produjo a partir de las 05:00 p.m.del 29 de Abril, prolongándose aproximadamente hasta las 10:00 p.m., periodo de tiempo en el cual empezó la recesión del nivel, como se observa en el hidrograma de la figura 11.

El caudal promedio para el Río Lebrija según datos históricos es de $27\text{m}^3/\text{s}$, sin embargo, la obtención de los valores elevados del caudal durante el muestreo realizado, corresponden a la época invernal en la que se tomaron las muestras. Considerando que el caudal mínimo registrado durante el evento fue de $39.50\text{m}^3/\text{s}$ y que el caudal máximo registrado fue de $53.57\text{m}^3/\text{s}$, es decir, una diferencia de 22cm en el nivel limnimetrico del río, se considera un evento de precipitación es significativo.

Los parámetros químicos obtenidos en el muestreo corresponden a líquidos en su mayoría bajos en pH, lo cual demuestra la presencia de iones de hidrogeno, originados por las constantes precipitaciones y la presencia de lluvia ácida en la zona. También se encontró un alto porcentaje de oxigeno disuelto, proveniente de los bruscos contactos con la atmósfera debido el aumento en la turbiedad del río durante la precipitación.

Las muestras recolectadas junto con la tabla de parámetros fisicoquímicos serán enviadas a la ciudad de Viena, Austria para su correspondiente análisis isotópico. Con los resultados obtenidos, mediante futuras investigaciones podrá realizarse la separación de flujo base del evento estudiado.

CAPITULO 3

APLICACIÓN DE TÉCNICAS ISOTÓPICAS EN LA SEPARACIÓN DE FLUJO BASE DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO LEBRIJA

La técnica de separación de flujo base en dos componentes (ecuación 7), se aplica eventos continuos cuyo hidrograma se desee separar. Sin embargo, aprovechando las relaciones descritas por esta ecuación, es posible obtener el porcentaje de la escorrentía total que corresponde al flujo base representado por la relación Q_o/Q_T . De acuerdo con estas suposiciones, se consigue como se verá en el presente capítulo, una estimación en porcentaje correspondiente al flujo base en la Cuenca Superior del Río Lebrija.

$$Q_o = Q_T \left(\frac{\delta_T - \delta_s}{\delta_o - \delta_s} \right) \quad (7)$$

3.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS EXISTENTES Y OBTENCIÓN DE LAS DESVIACIONES ISOTÓPICAS PROMEDIO ($\bar{\delta}_o$, $\bar{\delta}_s$, $\bar{\delta}_T$)

La estimación de flujo base mediante isótopos estables, metodología expresada en la ecuación (7), requiere contar con valores de desviación isotópica ($\bar{\delta}_T$, $\bar{\delta}_s$ y $\bar{\delta}_o$) que caractericen de manera confiable y verídica los componentes del hidrograma (escorrentía total, escorrentía superficial, flujo base), teniendo en cuenta que las diferencias isotópicas de estos componentes son apenas evidentes en la CSRL, motivo por el cual es necesario hacer una revisión y depuración de los datos isotópicos disponibles expuestos en el capítulo 2.

3.1.1 Depuración de los datos:

Componente de Escorrentía Total, δ_T .

Los datos isotópicos tenidos en cuenta para caracterizar la escorrentía en la Cuenca Superior del Río Lebrija, hacen referencia a los resultados obtenidos del muestreo realizado entre Enero y Julio de 2005, (Maldonado J. & Velasco W., 2005), correspondientes a muestras de los ríos: Suratá, Río de Oro, Río Frió y Lebrija

La variabilidad isotópica de las muestras presentada en la en la figura 12, sugiere un comportamiento estacional específico en cada una de las corrientes de los ríos muestreados.

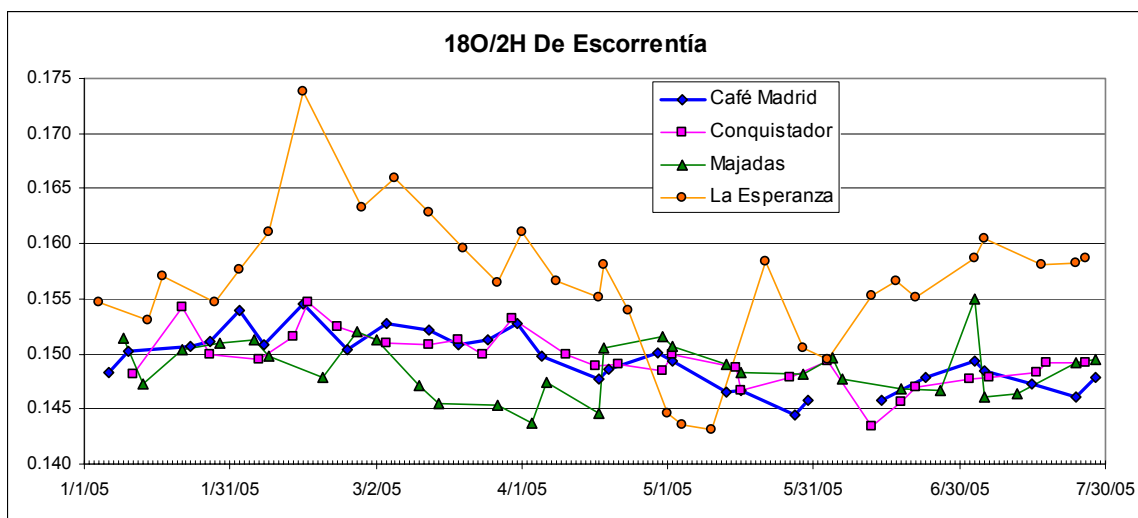


Figura 12. Efecto estacional en la Escorrentía. Periodo de muestreo: Enero-Julio de 2005

Sin embargo, al graficar $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ (véase figura 13 y figura 14) se encontraron los datos contenidos dentro de una tendencia lineal, criterio por el cual se consideraron confiables. La ecuación de la recta $^2\text{H}=8.3383^{18}\text{O}+14.684$ en la figura 14 muestra un comportamiento similar a la recta meteórica local presentada

en la figura 2 en la sección 1.1.8. No obstante, el componente 14.684 representa un exceso de deuterio mayor.

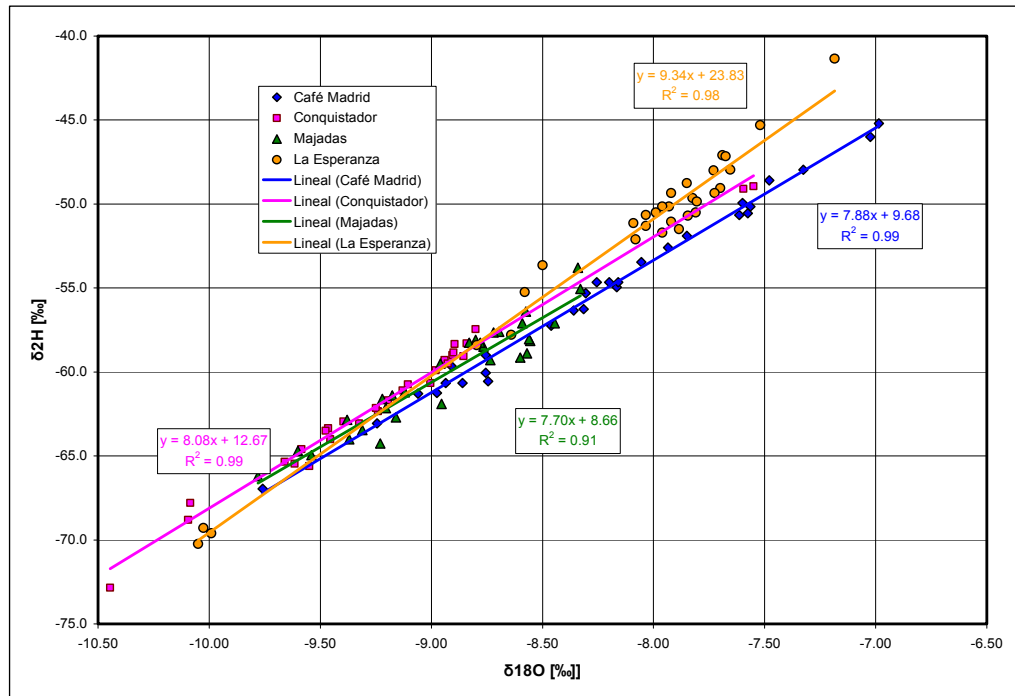


Figura 13. Tendencia Lineal de datos isotópicos en corrientes de la cuenca. Periodo de muestreo: Enero-Julio de 2005

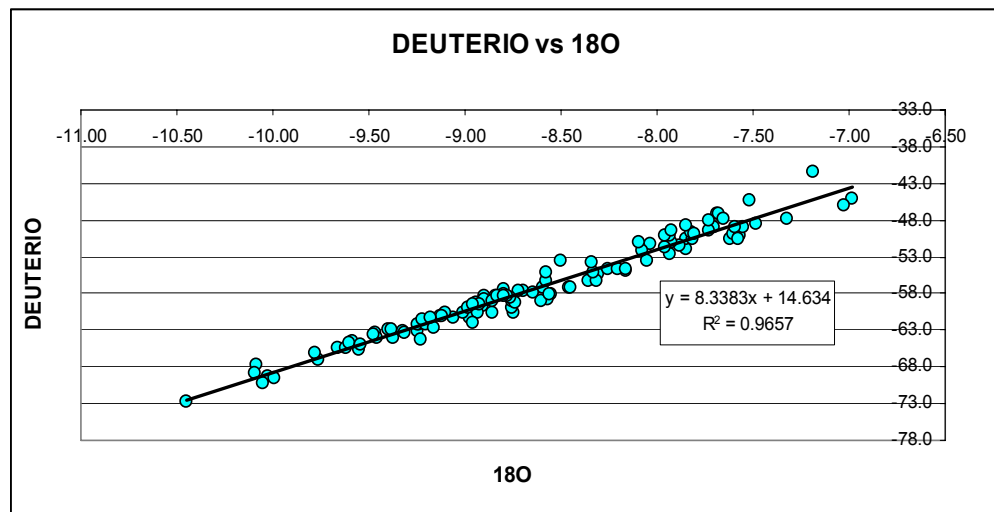


Figura 14. Tendencia general de los datos isotópicos en algunos ríos de la CSRL. Periodo de muestreo: Enero-Julio de 2005

Escorrentía superficial, δ_s

En este caso se supone que la precipitación puede ser representativa de la escorrentía superficial. En el análisis de los datos de precipitación se obtuvo un promedio ponderado de su desviación isotópica correspondiente a cada uno de los sitios muestreados mediante la ecuación 8.

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (8)$$

Donde P_i es el valor de la precipitación en mm y δ_i es la desviación isotópica recogida de la precipitación. Este medio cargado representa la composición isotópica media del agua (McDonnell J.J y Bonell M, 1991).

Además se trazó la relación Deuterio vs. ^{18}O con los datos isotópicos de precipitación obtenidos a partir del muestreo realizado por Camacho y Guzman, entre Octubre de 2004 y marzo de 2005, tal como muestra la figura 15. A simple vista se aprecia el comportamiento lineal típico del agua de lluvia, sugiriendo que las técnicas de muestreo y que los resultados del mismo se pueden considerar verídicos, representativos y confiables.

Para la obtención del valor representativo de precipitación (δ_s), se utilizaron también los datos obtenidos en el muestreo de Navia y Suárez en 1994, con el propósito de contar con información isotópica de la zona alta de la cuenca. Dichos datos isotópicos están consignados en Navia & Suarez, 1994 y fueron revisados por Camacho y Guzmán, 2005.

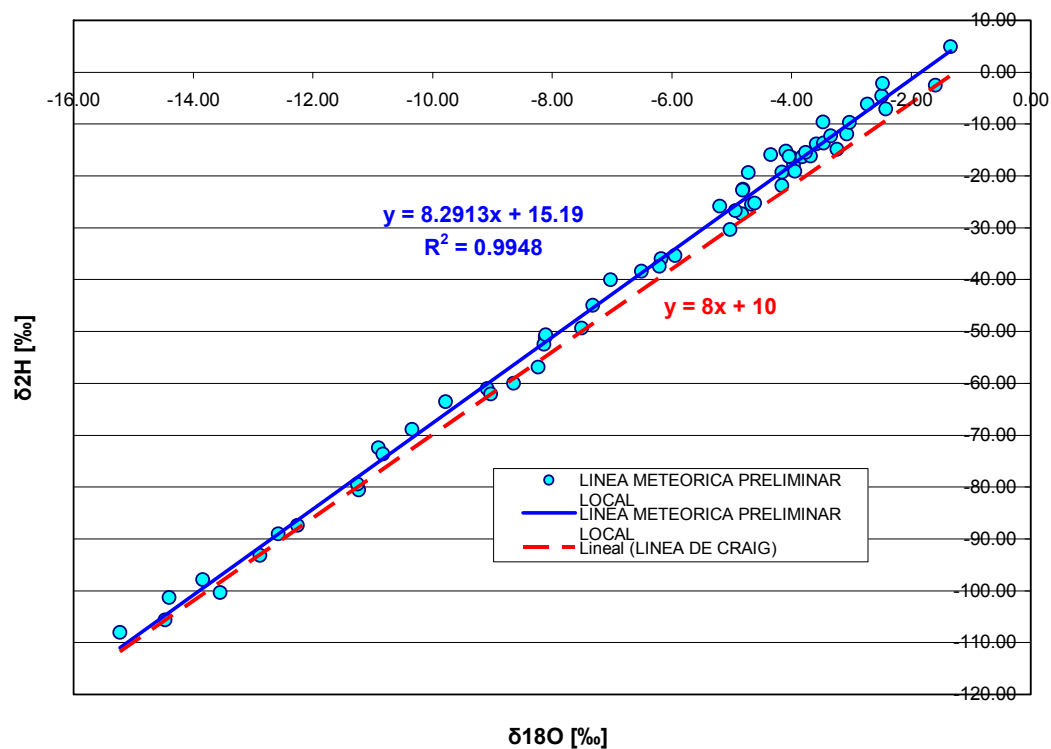


Figura 15. Relación meteórica en muestras isotópicas de lluvia, CSRL. 2005.
Fuente: Los Autores. Datos Obtenidos del Muestreo de aguas Lluvias Realizado en 2005.
(Camacho, H., y Guzmán, D., 2005)

Componente Subterráneo, δ_o

La información de isotópica correspondiente al componente subterráneo descrita en el numeral 2.3, como pozos de inspección, cisternas, manantiales, pozos de bombeo,..etc., fue analizada a través de relaciones isotópicas. En el proyecto de grado de Camacho y Guzmán se descartaron algunos datos cuyos valores obedecen a muestras alteradas.

3.1.2 Obtención de las Desviaciones Isotópicas Promedio

Los datos de isótopos en precipitación, agua subterránea, y escorrentía total presentados en el numeral 2.1; 2.2 y 2.3 se espacializaron a lo largo de la cuenca para obtener valores promedios de desviaciones isotópicas.

A efecto de determinar los parámetros contenidos en la ecuación 7 (δ_o , δ_s y δ_T) como valores promedios característicos de la cuenca se utilizaron varios algoritmos de espacialización: Radial Basis Function (RBF), Inverse Distance to Power (IDQ) y Kriging. La desviación isotópica de escorrentía total δ_T se obtiene del promedio aritmético de los datos isotópicos recopilados en la estación café Madrid, punto de cierre de la cuenca.

Estudios realizados por Gómez y Colegial, 2003, demuestran que la recarga de los acuíferos muestreados, proviene del agua de precipitación originada en la zonas altas de la CSRL, razón por lo cual se decidió espacializar los datos de desviaciones isotópicas de precipitación en la zona correspondiente al macizo de Santander, área comprendida entre la falla de Bucaramanga y la divisoria oriental de la C.S.R.L. Ver figura 17.

A su vez, los datos de desviaciones isotópicas de aguas subterráneas se espacializaron en el área correspondiente a la zona de los depósitos aluviales de la cuenca, comprendida entre la falla de Bucaramanga y la divisoria occidental de la Cuenca Superior del Río Lebrija. Ver figura 21.

En cuanto a los métodos de interpolación se sabe que Kriging arrojó en estudios anteriores resultados aceptables en la distribución de la precipitación, estudio que se llevó a cabo en 28 estaciones desde 1988 hasta 2000 (Maradei, Rojas, 2002),

donde se observó menos continuidad en la zona de mayor pluviosidad, pudiéndose mejorar contando con mayor información y aplicando más métodos de interpolación. En 2003 Gómez y Colegial proponen un intervalo de precipitación media mensual multianual (1207, 1288mm). Mediante la espacialización de datos de precipitación por el método IDQ se obtuvo un valor de 1280 (contenido en dicho intervalo), método traído a consideración en la espacialización de los datos isotópicos de precipitación y agua subterránea. A pesar de considerar la precipitación distribuida radialmente a partir de los datos existentes, el método RBF resultó ser una buena alternativa en la espacialización de los datos isotópicos existentes de la cuenca. Por lo tanto se seleccionaron como métodos apropiados para la espacialización de los datos isotópicos de la cuenca: Radial Basis Funcion (RBF), Inverse Distance to Power (IDQ) y Kriging.

Cada uno de los promedios obtenidos a partir de los tres métodos de interpolación serán considerados para el cálculo de separación de flujo base.

3.1.2.1 Espacialización de la Precipitación.

Los datos isotópicos de precipitación corresponden al muestreo realizado en el año 2005 mediante una red de muestreadores que generaron información mensual durante 6 meses, como se describió en la sección 2.4. Los resultados arrojaron una marcada variabilidad mensual de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de los sitios muestreados, seguramente resultado de la variación en cantidad y contenido de la precipitación; ya que además de los efectos producidos por la zona de convergencia intertropical, existe una influencia de vientos aislados, de la orografía regional, así como también frentes húmedos provenientes del océano Atlántico, Pacífico y la región amazónica, además de la variación de la temperatura (efecto estacional) que interviene en los procesos de fraccionamiento

isotópico del agua. Por lo tanto, para el análisis y espacialización de los datos de precipitación se debió obtener un promedio de la desviación isotópica con la información de los sitios muestreados mediante la ecuación 9.

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (9)$$

Donde P_i es el valor de la precipitación en mm y δ_i es la desviación isotópica recogida de la precipitación. Este promedio ponderado representa la composición isotópica media del agua (McDonnell J.J y Bonell M, 1991).

Se espacializaron los datos isotópicos de precipitación descritos en el numeral 2.4 mediante el Software SURFER a partir de archivos de extensión *.txt, generando archivos *.GRID, visualizados y operados mediante la herramienta de Software SPELL-Map (Guzmán J, 2003), utilizando celdas de 50 x 50 metros contenidos dentro de las coordenadas: 1090000 - 1150000 Este y 1250000 - 1320000 Norte. Se creó una máscara que permitiera separar el área de interés en la espacialización a partir de la generada por Balaguera y Serrano (2006), (véase figura 16) y archivos digitales de curvas de nivel de la cuenca con extensión *.dwg suministrados por el GPH, con el propósito de obtener un área que corresponda a la zona del macizo de Santander con cotas superiores a 1500 msnm como se puede observar en la figura 27. Otra consideración válida al carecer de información de las zonas altas de la cuenca, podría haber sido, no considerar la zona correspondiente a la subcuenca del río Suratá (vease la figura 7) y definir una nueva máscara limitada al nororiente por la divisoria de la subcuenca del río Suratá y al Suroeste por la falla de Bucaramanga.

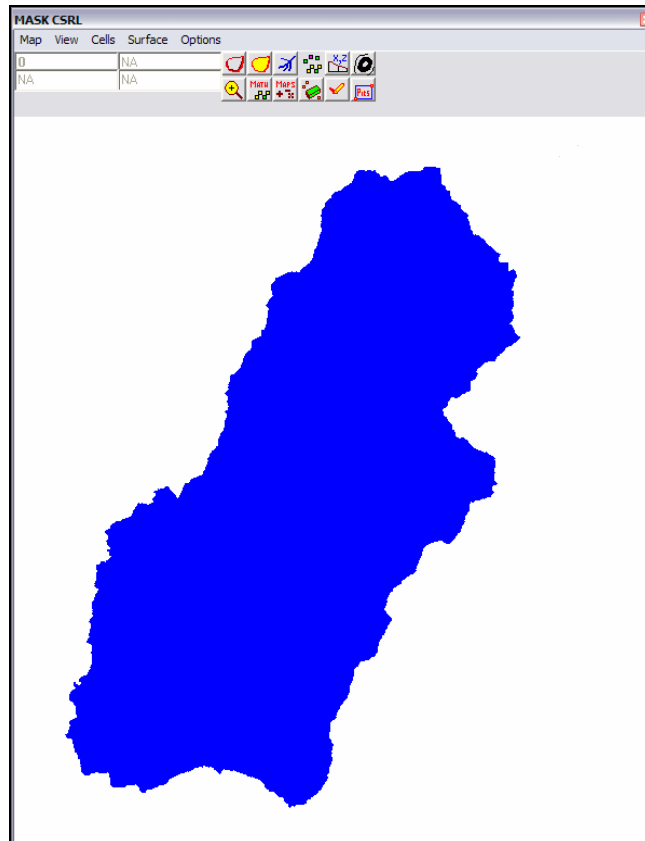


Figura 16. Mascara de la CSRL generada por SPELL-Map. El área azul contiene celdas con valor unitario y el área blanca con celdas en blanco.
Fuente: Balaguera G. y Serrano A.

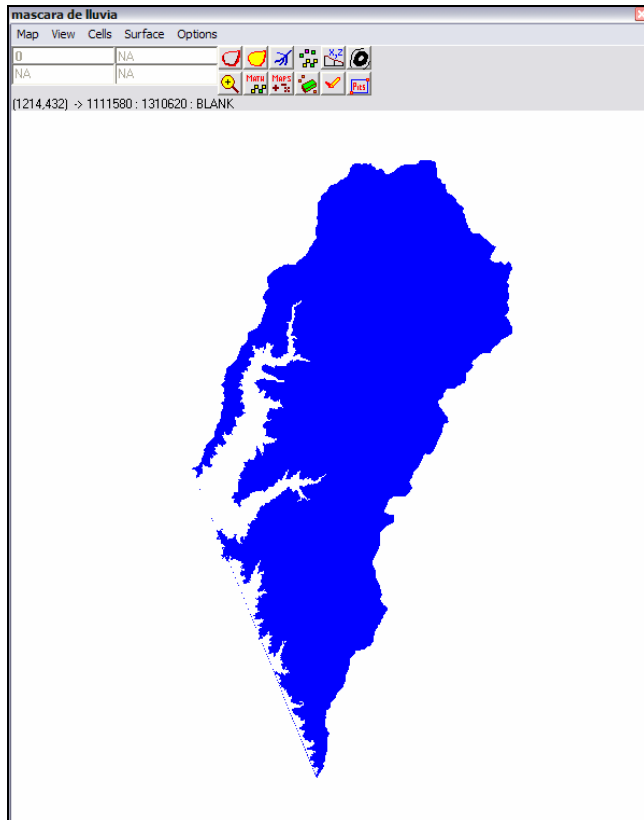


Figura 17. Mascara de la zona alta de la CSRL generada por SPELL-Map

Los datos espacializados con diferentes métodos de interpolación por SURFER y luego importados a SPELL- Map, fueron visualizados y separados por medio de la mascara de la figura 17, tal como se ve en el ejemplo de la figura 18; obteniéndose con las herramientas operacionales de SPELL- Map cada uno de los promedios isotópicos y de cantidad de precipitación que se muestran en la tabla 4. Se debe tener en cuenta que los productos $P_i \times \delta_i$ son obtenidos mediante herramientas operacionales de SPELL-Map, herramientas que permiten multiplicar celda a celda los mapas generados tanto de P_i como de δ_i como puede apreciarse en la figura 19.

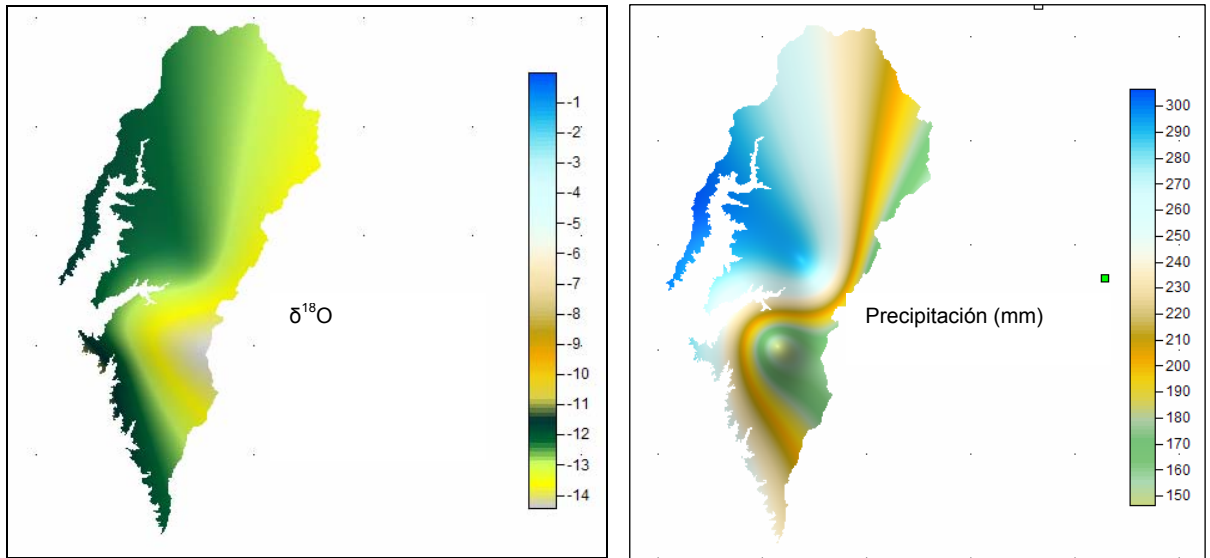


Figura 18. Izquierda: Datos isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ del mes de Octubre de 2004 espacializados mediante el método RBF. Derecha: Datos isotópicos de mm de Precipitación del mes de Octubre de 2004 espacializados mediante el método RBF

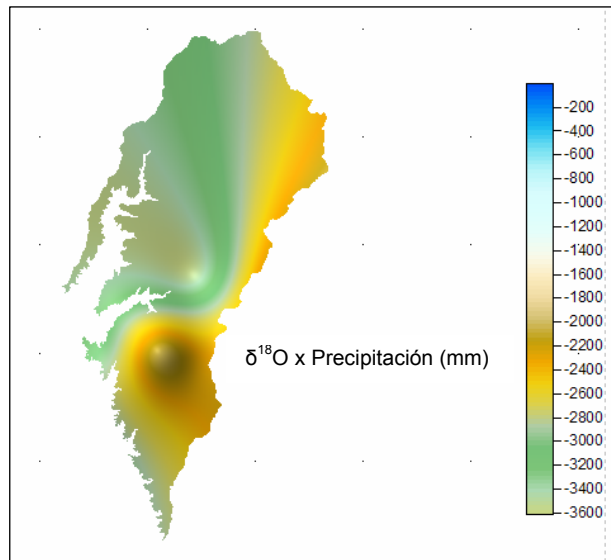


Figura 19. Resultado de la multiplicación de los mapas $\delta^{18}\text{O}$ y Precipitación del mes de Octubre de 2004 mediante el método de interpolación RBF.

Tabla 4. Valores promedio y productos resultantes de la espacialización de los datos de disponibles de precipitación

Método de Interpolación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Precipitación (mm)	(Precip.) x ($\delta^{18}\text{O}$)	(Precip.) * ($\delta^2\text{H}$)
OCTUBRE					
RBF	-12.80818503	-91.54149376	232.3675447	-2952.12951	-21114.53162
IDQ	-13.03460007	-92.52147513	211.0355618	-2742.532922	-19462.96728
KRIGING	-12.91962352	-92.32273049	222.2388623	-2854.78239	-20397.33659
NOVIEMBRE					
RBF	-9.379518726	-62.98853638	122.088988	-1120.430289	-7492.658993
IDQ	-9.571207776	-63.56715168	120.7169989	-1148.901258	-7620.248212
KRIGING	-9.536456077	-64.02900223	117.2995178	-1099.789949	-7352.495282
DICIEMBRE					
RBF	-4.568602521	-22.30996196	134.4141217	-577.4744585	-2717.83374
IDQ	-4.86936732	-24.22848304	93.81887764	-449.612596	-2210.114106
KRIGING	-4.745082879	-23.62842945	119.6959739	-544.3681857	-2655.367795
ENERO					
RBF	-4.523012042	-23.90482479	118.6750803	-531.0288549	-2764.557364
IDQ	-4.739303071	-24.61708394	113.2459752	-534.5646129	-2766.470824
KRIGING	-4.645492046	-24.8343132	110.23791	-508.714426	-2689.797005
FEBRERO					
RBF	-4.641917924	-23.34770303	85.3872067	-380.8396537	-1855.982197
IDQ	-5.01364438	-26.0010802	110.578811	-539.9889382	-2742.299112
KRIGING	-4.928557051	-25.84493331	85.94067321	-406.7232327	-2068.892042
MARZO					
RBF	-3.55493398	-15.00411555	25.41137246	-85.10689797	-337.7734609
IDQ	-3.871828044	-16.83135299	21.96179122	-83.75047029	-358.7216778
KRIGING	-3.856878948	-16.83135299	25.37163094	-89.61314048	-369.6302864

Con los valores obtenidos y consignados en la tabla 4, se obtuvieron las desviaciones características de ^{18}O y ^2H de precipitación en la CSRL mediante las relaciones descritas en la ecuación 9, como se aprecia en la tabla 5.

Tabla 5. Obtención de las desviaciones isotópicas promedio de precipitación de la CSRL, según muestreo 2004-2005

VALORES TOTALES DE OCTUBRE A MARZO					
Método de Interpolación	$\Sigma [(Precip.) x (\delta^{18}\text{O})]$	$\Sigma [(Precip.) x (\delta^2\text{H})]$	$\Sigma Precip.=P_{TOTAL}$	$(\delta^{18}\text{O})_{Prom} = \Sigma [(Precip.) x (\delta^{18}\text{O})] / P_{Total}$	$(\delta^2\text{H})_{Prom} = \Sigma [(Precip.) x (\delta^2\text{H})] / P_{Total}$
RBF	-5647.009664	-36283.33738	718.3443138	-7.861146188	-50.50967437
IDQ	-5499.350797	-35160.82121	671.3580158	-8.191383239	-52.372684
KRIGING	-5503.991324	-35533.519	680.7845682	-8.08477686	-52.19495367

De la misma manera, se espacializaron los datos isotópicos existentes de algunas corrientes superficiales del macizo, descritos en el numeral 2.4 (véase el ejemplo de la figura 20), con el propósito de involucrar esta importante zona en la caracterización del agua de precipitación, obteniéndose así los siguientes resultados:

Tabla 6. Obtención de desviaciones isotópicas promedio de precipitación de la CSRL según muestreo de pequeñas corrientes superficiales en la zona del macizo, 1994.

Método de Interpolación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
RBF	-10.01900149	-69.36463277
IDQ	-8.928099048	-62.98291419
KRIGING	-9.3598805	-65.80450704

Los resultados parciales correspondientes a cada uno de los métodos de interpolación, tanto del muestreo de 2005 (tabla 5), como del muestreo de algunas corrientes superficiales tomadas en 1994 (tabla 6) fueron promediados. Dichos valores promedios se muestran a continuación en la tabla 7.

Tabla 7. Promedio de datos de isótopos de precipitación (20005) y corrientes superficiales (1994)

Método de Interpolación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
RBF	-8.940073838	-59.93715357
IDQ	-8.559741143	-57.67779909
KRIGING	-8.72232868	-58.99973035

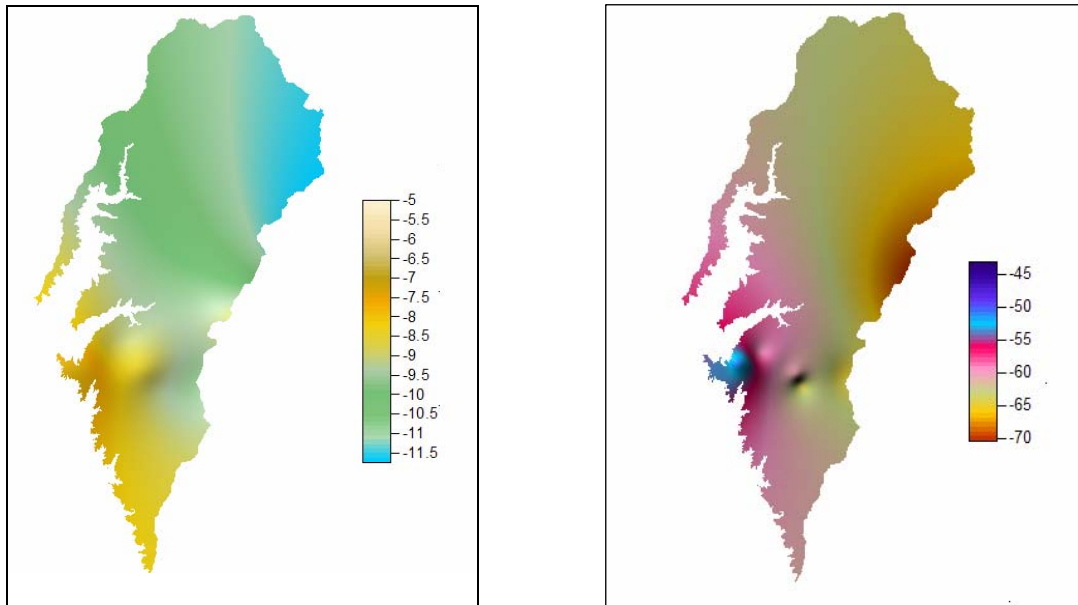


Figura 20. Izquierda: Datos isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ de algunas corrientes superficiales tomados en el año 1994 espacializados mediante método de interpolación RBF. Derecha: Datos isotópicos de 2H de algunas corrientes superficiales en 1994, espacializados mediante el método de interpolación IDQ

3.1.3 Espacialización de Agua Subterránea

Para la espacialización de los datos existentes de agua subterránea expuestos en el numeral 2.2. fue necesario organizarlos por temporadas (invierno y verano) con el propósito de obtener un valor promedio de cada estación.

Se seleccionaron los datos espacializables involucrando por los menos un valor que caracterizara cada uno de los acuíferos (y litología) muestreados.

El proceso de espacialización y obtención del valor promedio de agua subterránea se desarrolló de manera similar al de precipitación, mediante espacialización en SURFER a partir de datos *.txt, operados y visualizados en SPELL-Map mediante

una máscara que contiene la zona de la cuenca correspondiente a los depósitos aluviales, con curvas de nivel menores de 1500m. Esta máscara fue implementada teniendo en cuenta el área de la zona muestreada de aguas subterráneas. Dicha máscara puede verse en la figura 21.

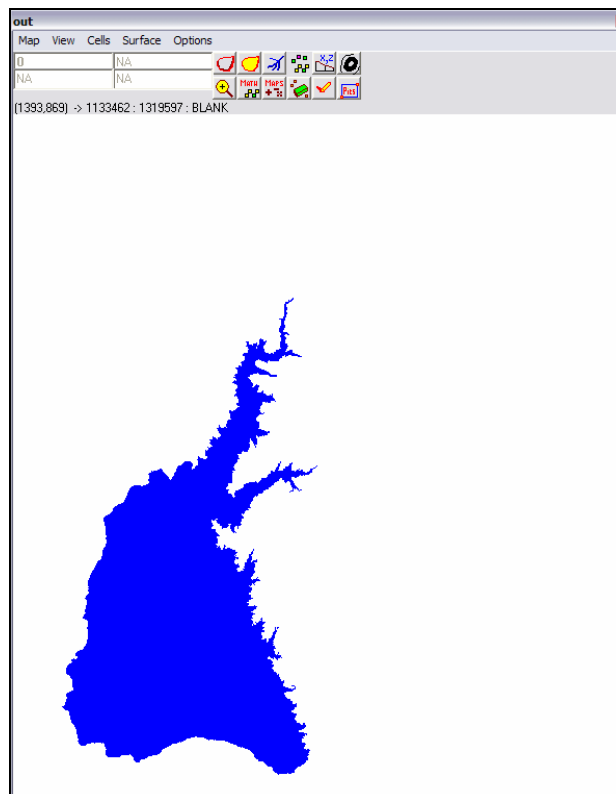


Figura 21. Máscara del área de la CSRL con cotas menores a 1500 m generada por SPELL-Map. El área azul contiene celdas con valor unitario y el área blanca con celdas en blanco.

Al igual que los datos de precipitación, los datos de agua subterránea se espacializaron mediante los métodos de interpolación: RBF, IDQ y Kriging. En la figura 22, puede observarse algunos ejemplos gráficos de dichos resultados. Así, se obtuvieron los valores promedio tanto de ^{18}O como de ^2H , mediante herramientas de SPELL-Map. Los datos promedio, resultantes de la espacialización correspondientes a invierno y verano se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Desviaciones isotópicas promedio de Agua subterránea de la CSRL, según muestreo 2002-2003 y 2004

Invierno		
Método de Interpolación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
RBF	-6.68019347	-44.43399997
IDQ	-8.365138295	-55.03866046
KRIGING	-7.69609672	-50.69229899
Verano		
Método de Interpolación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
RBF	-7.163894328	-47.70219314
IDQ	-8.019267606	-53.31076331
KRIGING	-7.534933233	-50.60378896

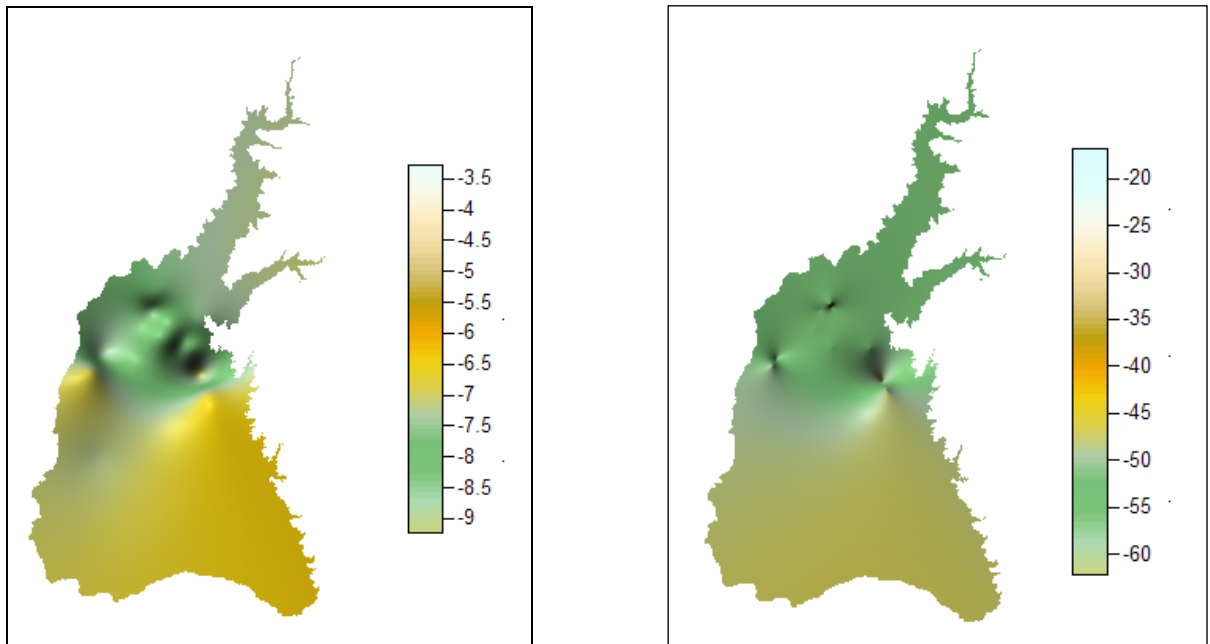


Figura 22. Izquierda: Espacialización de $\delta^{18}\text{O}$ datos recopilados en verano mediante RBF. Derecha: Espacialización de $\delta^2\text{H}$ datos recopilados en invierno mediante IDQ.

Finalmente, en la tabla 9 se presentan los valores correspondientes de aguas subterráneas, obtenidos del promedio de datos correspondientes de invierno y de verano, mostrados en la tabla 8.

Tabla 9. Valores promedio de información isotópica de agua subterránea en la CSRL

	$\bar{\delta}^{18}\text{O}$	$\bar{\delta}^2\text{H}$
RBF	-6.922043899	-46.06809656
IDQ	-8.19220295	-54.17471189
KRIGING	-7.615514976	-50.64804398

3.1.4 Obtención de $\bar{\delta}_T$

El valor isotópico promedio de esorrentía total ($\bar{\delta}_T$), simplemente es el resultado de la media aritmética de los datos de concentración isotópica descritos en el numeral 2.5 correspondientes a la estación de Café Madrid, es decir:

Tabla 10. Valores promedio de información isotópica de esorrentía total del río Lebrija

$\bar{\delta}^{18}\text{O}$ [‰]	$\bar{\delta}^2\text{H}$ [‰]
-8.25000	-55.32000

CAPITULO 4

ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

Obtenidas las desviaciones isotópicas de δ_T , δ_s y δ_o promedio características de la C.S.R.L., desarrolladas en el capítulo 3, se evalúan en la ecuación número 7, presentada en el numeral 1.2.2.2., correspondiente a la separación en dos componentes del hidrograma mediante técnicas isotópicas. Dada la incertidumbre en cuanto a la selección del método más apropiado de interpolación, se decidió hacer la separación del flujo base para cada uno de los métodos de interpolación utilizados.

El cálculo tipo mediante ^{18}O , con los valores correspondientes al método RBF es:

$$\frac{Q_o}{Q_T} = \left(\frac{\delta_T - \delta_s}{\delta_o - \delta_s} \right) = \left(\frac{(-8.25) - (-8.940073838)}{(-6.922043899) - (-8.940073838)} \right) = 0.341954212 \approx 34\%$$

El cálculo tipo mediante ^2H , con los valores correspondientes al método RBF es:

$$\frac{Q_o}{Q_T} = \left(\frac{\delta_T - \delta_s}{\delta_o - \delta_s} \right) = \left(\frac{(-55.32) - (-59.93715357)}{(-46.06809656) - (-59.93715357)} \right) = 0.332910418 \approx 33\%$$

Así se obtuvo para cada uno de los métodos de interpolación un valor porcentual correspondiente a flujo base, como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Separación de flujo base mediante promedios obtenidos con diferentes métodos de interpolación a partir de información isotópica disponible de la CSRL.

Metodo de interpolación	%Q _T	
	δ ¹⁸ O [‰]	δ ² H [‰]
RBF	0.341954212	0.332910418
IDQ	0.842745459	0.673063203
KRIGING	0.426746325	0.440597286

De esta manera se estima que a partir de la información disponible de isótopos estables del agua en la CSRL, el flujo base se encuentra dentro de valores que varían entre el 33 y el 84%.de la escorrentía total del Río Lebrija.

Sin embargo, deben tenerse en cuenta algunas consideraciones que dieron origen a la estimación de flujo base de la CSRL:

- La técnica isotópica de separación de flujo base en dos componentes (ecuación 7), fue propuesta para ser aplicada a eventos individuales cuyo hidrograma se desee separar; sin embargo, aprovechando las relaciones descritas por esta ecuación, se obtuvo el porcentaje de la escorrentía total que corresponde al flujo base representado por la relación Q_O/Q_T .
- Teniendo en cuenta que las diferencias isotópicas de los componentes del hidrograma son apenas evidentes en la CSRL, se deben disponer de valores de desviación isotópica (δ_T , δ_S , δ_O) que caractericen de manera confiable y verídica los componentes del hidrograma.
- La caracterización isotópica de una cuenca con dimensiones de la estudiada, exige la implementación de una red de muestreadores lo suficientemente densa que permita lograr una adecuada distribución

espacial; reduciendo así los posibles errores dados al hacer excesivas simplificaciones. No obstante, el estudio isotópico de la Cuenca Superior del Río Lebrija al encontrarse en sus etapas iniciales no cubre grandes zonas de la cuenca.

- El componente subterráneo de la cuenca se obtuvo a partir promedio resultante de la espacialización de los datos existentes de agua subterránea que involucran a su vez diferentes acuíferos y profundidades, criterio que se tuvo en cuenta en la selección de los datos utilizados con el fin de caracterizar los acuíferos existentes. En general el método no toma en cuenta el funcionamiento hidrogeológico del agua subterránea, lo que pudiera, de otra manera, explicar muchas de las interrogantes respecto al flujo base y otras que a menudo se reconocieron en los trabajos consultados. Es evidente la falta de incorporar la fenomenología del agua subterránea al método, así como de su posible influencia en la respuesta de la cuenca dada por el tipo particular de geología, donde se incorpore la clase de roca o material geológico y espesor de las unidades involucradas. Desde el punto de vista hídrico es de apuntar que tampoco se hace mención de las condiciones que permitan que existan, o no, continuidad hídrica con (sub-) cuencas vecinas. En conclusión la metodología isotópica debe a su vez incorporar las condiciones particulares del agua subterránea como cuál es la parte del sistema de flujo que influye en la CSRL.
- Obtener un valor isotópico característico de la precipitación no es una tarea sencilla, ya que se deben tener en cuenta factores tales como el factor orográfico, origen y cantidad de precipitación, variaciones estacionales... etc. Por lo tanto, optar por obtener un valor mediante la espacialización de los datos existentes promediados de acuerdo a las relaciones expresadas

en la ecuación 9 es una buena alternativa, ya que involucra las variables estacionales, origen, tipo de precipitación y altura.

- Debe tenerse en cuenta que los muestreos que dieron lugar a los datos isotópicos existentes, no corresponden al mismo periodo de tiempo, es decir, no fueron tomados de manera simultánea a través de la cuenca.

Identificar y separar el flujo base es incierto ya que depende de la compleja interacción de la cuenca que genera la respuesta subsuperficial y de superficie. Además, dada la incertidumbre en la selección del método más apropiado de interpolación para espacializar la información existente de isótopos estables, en este momento solo se puede presentar el valor porcentual de flujo base en términos de un intervalo.

La estimación del flujo base en la estación de Café Madrid ha sido objeto de estudio desarrollado en algunos proyectos de grado. Las metodologías utilizadas junto con sus resultados son mostrados a continuación en la tabla 12.

Tabla 12. Comparación de diferentes métodos de separación de flujo base aplicados en la estación de Café Madrid.

Metodología Empleada		Flujo Base (%Q _T)	Fuente
M. Grafico	M. de la Pendiente Constante	68	Rueda & Sarmiento, 2003
M. de Intervalo	M. del Intervalo Fijo	78	Rueda & Sarmiento, 2003
M. de Intervalo	M. del Intervalo Desplazado	83	Rueda & Sarmiento, 2003
M. de Intervalo	M. del Minimo Local	77	Rueda & Sarmiento, 2003
M. de Algoritmo	Algoritmo de 1 Parametro (Line y Hollick)	50	Balaguera & Serrano, 2006
M. de Algoritmo	Algoritmo de 2 Parametros (Boughton)	69	Balaguera & Serrano, 2006
M. de Algoritmo	Algoritmo de 3 Parametros (IHACRES)	71	Balaguera & Serrano, 2006
M. de Algoritmo	Algoritmo de Smakhtin	72	Balaguera & Serrano, 2006
M. Isotópico	Técnica isotópica	entre 33 y 84%	Barliza & Cristancho, 2005

Independientemente del método al que se refiera, es evidente que el aporte de flujo base es muy importante en la CSRL en la mayoría de los casos el aporte de flujo base es mayor que el aporte por agua superficial.

A pesar de que los métodos gráficos no son la mejor herramienta para separar el flujo base, ya que no tienen en cuenta los parámetros físicos de la cuenca, se puede apreciar que el valor obtenido puede tomarse como una buena aproximación para algunos casos prácticos, teniendo en cuenta que no se aleja drásticamente de la tendencia general de los demás métodos.

Los métodos de intervalo tienen en cuenta algunos parámetros físicos de la cuenca como por ejemplo el área, se fundamentan en formulas empíricas que definen un tiempo de vaciado que representa el número de días después del pico del hidrograma, donde los efectos de la precipitación ya no tienen importancia, además asigna la descarga más baja de intervalos generados por estos métodos; no obstante, no proporcionan una comprensión real de los procesos implicados al considerar hipótesis empíricas.

Los métodos de algoritmo se presentan como una buena alternativa para la separación del flujo base, son desarrollados por medio de algoritmos numéricos, los cuales permiten una buena estimación del flujo base, dado que asumen un comportamiento del flujo base similar al del hidrograma. Donde el único inconveniente es que se debe contar con datos históricos de la esorrentía total, sin embargo este método no proporciona una comprensión real del comportamiento de cada uno de los componentes del hidrograma.

La separación de los dos componentes del hidrograma mediante técnicas isotópicas genera un intervalo porcentual que contiene las estimaciones obtenidas a partir de otros métodos. En terminos practicos, dada la calidad de los isótopos

como trazadores del ciclo hidrológico, el método isotópico puede proporcionar una comprensión más real del comportamiento de cada uno de los componentes del hidrograma. En este sentido los estudios de isótopos estables del agua en la CSRL deben continuar para que en un futuro pueda ser definido un intervalo porcentual de flujo base más reducido.

5 CONCLUSIONES

Con la información de isótopos estables disponible de la CSRL y utilizando las diferencias en concentración isotópica entre los componentes del hidrograma (escorrentía superficial, agua subterránea y escorrentía total), se encontró que el flujo base corresponde valores que varían entre 33 y 84% de la escorrentía total de la cuenca.

Al comparar los resultados obtenidos de la separación de flujo base mediante isótopos estables con los resultados obtenidos mediante otras metodologías aplicadas anteriormente al río Lebrija (50 a 72%); se puede concluir que con la información existente de isótopos estables de la CSRL se genera un intervalo con mayor fluctuación. Sin embargo, se espera que al involucrar mayor información disponible de isótopos estables se generen resultados más certeros.

Resultados anteriores del estudio de la zona de recarga y conocimientos de geología, sugirieron separar la zona del macizo de Santander como zona de recarga y la zona de depósitos aluviales como zona de acuíferos muestreados. Sobre la primera zona se realizó la espacialización y promedio del contenido isotópico de la precipitación y sobre la segunda zona se realizó la espacialización y promedio del contenido isotópico del agua subterránea. Los resultados obtenidos de esta forma presentaron valores racionales de flujo base.

Debe tenerse en cuenta que los muestreos que dieron origen a los datos isotópicos utilizados para la separación de flujo base de la Cuenca Superior del Río Lebrija, no corresponden al mismo periodo de tiempo. La información de isótopos estables de precipitación fue tomada de muestreos realizados entre

Octubre de 2004 y Marzo de 2005; La información isotópica de escorrentía fue obtenida del muestreo realizado entre Enero y Julio de 2005 y la información de agua subterránea fue obtenida de muestreos realizados en 2003 y 2004. Además se tuvieron en cuenta algunos resultados obtenidos en el año 1994. Como puede verse la información isotópica existente no fue tomada de manera simultánea a través de la cuenca.

Teniendo en cuenta que las diferencias isotópicas de los componentes del hidrograma son apenas evidentes en la Cuenca Superior del Río Lebrija, se deben disponer de valores de desviación isotópica que caractericen de manera confiable y verídica los diferentes componentes del hidrograma. Se considera entonces, que la adopción de protocolos de muestreo ofrece la técnica requerida para obtener muestras inalteradas y resultados confiables.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar sistemas de control que permitan evaluar el desempeño de los operadores de las estaciones a fin de mejorar los procedimientos de muestreo.

Las instituciones deben concentrar sus esfuerzos en obtener la información primaria necesaria para poder empezar a proponer modelos conceptuales y posteriormente calibrarlos mediante técnicas isotópicas en la Cuenca Superior del Río Lebrija.

Es necesaria la construcción de piezómetros a lo largo de toda la cuenca y realizar en ellos un mantenimiento que permita confiar en los datos suministrados. Además, se deberá implementar sistemas que permitan mediciones diarias de nivel.

Debe estudiarse la variabilidad espacio-temporal de la concentración isotópica en las principales corrientes de la Cuenca Superior del Río Lebrija, con el propósito de lograr una correcta distribución espacial; reduciendo así los posibles errores generados al hacer excesivas simplificaciones.

Se recomienda la implementación de muestreadores automáticos en las corrientes de los ríos, muestreadores de precipitación (sobre todo en la zona alta de la cuenca) y muestreadores de agua subterránea; distribuidos a lo largo de la cuenca, con una densidad suficiente que permita identificar factores de variación de los valores isotópicos.

Se recomienda implementar programas de capacitación dirigidos a granjas cuyas actividades afecten el agua subterránea localizada en las riveras de los ríos, para evitar que sean contaminadas, considerando que dichos cuerpos de agua se convierten en un aporte importante del cauce de los ríos.

BIBLIOGRAFIA

Aparicio, F., 1987. Fundamentos de hidrología de superficie., Noriega editores Limusa. p.27-35.

Baertschi, P., 1976. Absolute ¹⁸O content of Standard Mean Ocean Water. Earth and Planetary Science Letters, 31:341-344.

Balaguera, G., Serrano, A., 2006. Separación del Flujo base en la estación Café Madrid. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Boughton, W., 1993. Hydrograph-Based model for estimating the water yield of ungauged catchments. Hydrological Processes, p.317-324.

Camacho, H., Guzman, D., 2005. Implementación de una red de muestreadores de isótopos estables para obtener la recta meteórica local. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Chapman, T., Maxwell, A. , 1996. Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments. Hydrol. and Water Resour. Symp. Institution of Engineers Australia, Hobart. p.539-545.

Chapman, T., 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*. 13:701-714.

Clark, I., Fritz, P., 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. En *Hydrograph Separation in Catchment Studies*. Lewis Publishers. p.99-102.

Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16:438-468.

Epstein, S., 1956. Variations of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio in natural water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 4, p.213-220.

Friedman, I., 1953. Deuterium content of natural waters and other substances. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 4, N.1-2, p.83-103.

Ghere, M., Strauch, G., 2003. High temperature elemental analysis and pyrolysis techniques for stable isotope analysis. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 17:1497-1503.

Gilfillan, E., Jr., 1934. The Isotopic Composition of Seawater. *J. Am. Chem. Soc.* p.56,406.

Gómez, S., Colegial, J., 2003. Interacción entre sistemas hidrogeológicos para el estudio del fenómeno de recarga en el macizo de Santander e identificación de acuíferos. Informe de Investigación.

Gómez, S., Anaya, A., 2004 Acercamiento a un modelo Conceptual de Recarga de los Acuíferos de la Región de Bucaramanga. En *Revista Avances en Recursos Hídricos*. Número 11. p.37-50. ISSN 0121-5701.

Gómez, S., Anaya, A., 2004. Interpretación Entre Sistemas hidrogeológicos para el Estudio del fenómeno de Recarga en el Macizo de Santander e Identificación de Acuíferos. Bucaramanga. p.39.

Guzmán, J., Chu, M, 2002, SPELL Stat. No publicado.

Guzmán, J., 2006, SPELL SDM. No publicado.

Guzmán, J., 2003, SPELL Map. No publicado.

Guzmán, J., 2006, SPELL AMO. No publicado.

Guzmán, J, Gómez, S., Colegial, D., Anaya, A., Niño E., 2005. Cuenca Experimental de Río Sucio (CERS). Sin publicar.

Hageman, R., Nief, G., Roth, E., 1970. Absolute isotopic scale for deuterium analysis of natural waters. Absolute D/H ratio for SMOW. Tellus, 22:712-715.

Hughes, D., Hannant, P., Watkins, D., 2003. Continuous baseflow separation from time series of daily and monthly streamflow data. Water SA, Vol. 29 N° 1.

Jakeman, A. J., Hornberger, G. M., 1993. How much complexity is warranted in rainfall-runoff facility. Hydrology Paper 25. Colorado State University, Fort Collins.

Laudon H., Hemond H., 2002. Oxygen 18 fractionation during snowmelt: Implications for spring flood hydrograph separation. En: Water Resources Research, VOL. 38, NO. 11, ISSN: 10.1029/2002WR001510.

Mcdonnell, J.J., Bonell, M., 1991. Deuterium Variations in Storm Rainfall: Implications for Stream Hydrograph Separation. En: Water Resources Research. p. 455-458.

Maldonado, J., Velasco, W. 2005. Implementación de una Metodología para el Muestreo de Isótopos Estables y Aplicación a la Separación de Flujo Base. Bucaramanga, 141p. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero civil. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Área de Hidrología Isotópica.

Maradei, Z., Rojas, J., 2002. Distribución espacial de variables hidrológicas en la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL) utilizando geoestadística. Trabajo de Pregrado.

Navia, M., Suárez, M., 1994. Aplicación de isótopos en Hidrología. Bucaramanga, 140p. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero civil. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Área de Hidrología Isotópica.

Rankama, K., 1954. Isotope Geology. Pergamon Press, Oxford, 490p.

Rozanski, C., Froehlich, K., Mook, W., 2002. Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico, Principios y Aplicaciones. Sección III, Agua Superficial, Madrid.

Rozanski, C., Froehlich, K., Mook, W., 2002. Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico, Principios y Aplicaciones. Sección I Capítulo 10 Muestreo en el Agua y su Tratamiento en el laboratorio, isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico, Madrid.

Rueda, I., Sarmiento, M., 2003. Revisión de Metodologías para la Estimación de la Recarga en Acuíferos Mediante Balances de Agua. Tesis de grado para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Sloto, R., Croase, M., 1996. Hysep: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. En: U.S. Geological Survey Water Resources, p.1-7.

Smakhtin, V., 2001. Low flow hydrology: a review. Elsevier Science B.V Journal of hydrology 240, 147- 186.

Tekeli, Y., Sorman, A., 2003. Separation of Hydrograph Components Using Stable Isotopes Case Study: The Guvenc Basin Ankara. Journals Tubitak.

Werner, R.A., 2003. The online $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ analysis: development and application. Isotopes Environ. Health Stud. 39, 2, 85-104.

Werner, R., Brand, W., 2001. Referencing strategies and technologies in stable ratio analysis. Rapid Commun. Mass Spectrom. 15,501-519.

ANEXOS

Anexo 1

Parámetros Fisicoquímicos del Muestreo de Isótopos Estables en el Flujo Base. (Agosto de 2005-Abril de 2006).

Codigo Local	Fecha del Muestreo	Tipo	Coordenadas		Altura msnm	Datos de Campo		
			Norte	Este		Cond. $\mu\text{S/cm}$	Temp. $^{\circ}\text{C}$	pH. units
Conquistador	12/08/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	136	24.6	6.07
Conquistador	19/08/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	142	24.3	6.14
Conquistador	27/08/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	129	24.3	6.14
Conquistador	01/09/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	130	24	4.78
Conquistador	10/09/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	115	24	4.79
Conquistador	13/09/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	123	23.9	4.78
Conquistador	19/09/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	107	23.9	4.76
Conquistador	26/09/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	125	23.9	4.74
Conquistador	04/10/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	151	24.3	5.74
Conquistador	16/10/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	136	24.3	5.92
Conquistador	17/10/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	126	24.4	6.02
Conquistador	24/10/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	126	24.4	6.04
Conquistador	03/11/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	142	24.5	5.96
Conquistador	11/08/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	138	24.2	5.94
Conquistador	19/11/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	123	24.6	5.96
Conquistador	26/11/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	129	24.6	5.95
Conquistador	02/12/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	123	24.2	5.82
Conquistador	06/12/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	144	24.5	5.96
Conquistador	12/12/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	135	24.5	5.92
Conquistador	19/12/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	118	24.5	5.92
Conquistador	26/12/2005	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	128	24.5	5.85
Conquistador	6/01/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	133	24.6	
Conquistador	13/01/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	128	24.3	
Conquistador	21/01/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	119	24.3	
Conquistador	29/01/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	122	24	
Conquistador	31/01/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	130	24	
Conquistador	11/02/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	121	23.9	
Conquistador	19/02/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	115	23.9	
Conquistador	23/02/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	117	23.9	

Conquistador	02/03/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	124	24.3	
Conquistador	11/03/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	128	24.3	
Conquistador	17/03/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	118	24.4	
Conquistador	22/03/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	114	24.4	
Conquistador	02/04/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	126	24.5	
Conquistador	04/04/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	125	24.2	
Conquistador	11/04/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	128	24.6	
Conquistador	23/04/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	124	24.6	
Conquistador	25/04/2006	Flujo Base	1261956.207	1115772.034	1000	120	24.6	
Majadas	09/08/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	199	23.8	4.86
Majadas	15/08/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	206	23.9	4.84
Majadas	28/08/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	387	23.9	4.88
Majadas	04/09/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	216	23.9	4.89
Majadas	07/09/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	224	23.6	4.84
Majadas	12/09/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	238	23.9	4.84
Majadas	19/09/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	388	23.9	4.87
Majadas	02/10/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	185	23.9	4.86
Majadas	04/10/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	170	23.9	4.8
Majadas	14/10/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	177	23.9	4.84
Majadas	21/10/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	174	23.8	4.87
Majadas	26/10/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	193	23.9	4.76
Majadas	05/11/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	191	23.8	4.78
Majadas	07/11/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	182	23.6	4.83
Majadas	14/11/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	262	23.8	4.78
Majadas	25/11/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	370	23.7	4.73
Majadas	03/12/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	207	24.1	6.06
Majadas	11/12/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	214	24.5	6.04
Majadas	18/12/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	218	24.6	6.02
Majadas	25/12/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	239	24.6	5.93
Majadas	31/12/2005	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	282	24.6	5.86
Majadas	06/01/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	214	23.8	
Majadas	13/01/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	205	23.9	
Majadas	21/01/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	230	23.9	
Majadas	29/01/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	222	23.9	
Majadas	31/01/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	211	23.6	
Majadas	11/02/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	234	23.9	
Majadas	19/02/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	241	23.9	
Majadas	23/02/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	229	23.9	
Majadas	02/03/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	174	23.9	
Majadas	11/03/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	171	23.9	
Majadas	17/03/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	170	23.8	
Majadas	22/03/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	182	23.9	
Majadas	02/04/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	195	23.8	
Majadas	04/04/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	162	23.6	

Majadas	11/04/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	148	23.8	
Majadas	23/04/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	156	23.7	
Majadas	25/04/2006	Flujo Base	1282207.072	1102837.133	760	184	23.7	
Café Madrid	08/08/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	257	23.8	4.75
Café Madrid	20/08/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	275	23.9	4.76
Café Madrid	24/08/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	271	23.9	4.75
Café Madrid	31/08/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	290	23.9	4.74
Café Madrid	05-09-2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	667	23.9	5.33
Café Madrid	18/09/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	358	23.7	5.03
Café Madrid	19/09/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	325	23.8	4.95
Café Madrid	02/10/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	236	23.8	4.64
Café Madrid	04/10/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	234	23.9	4.67
Café Madrid	10/10/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	187	23.9	4.65
Café Madrid	21/10/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	220	23.9	4.66
Café Madrid	26/10/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	185	23.9	4.66
Café Madrid	06/11/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	220	23.9	4.76
Café Madrid	09/11/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	236	23.7	4.76
Café Madrid	17/11/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	219	23.7	4.74
Café Madrid	22/11/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	233	23.7	4.66
Café Madrid	30/11/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	218	23.7	4.71
Café Madrid	11/12/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	282	24.3	5.82
Café Madrid	14/12/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	272	24.3	5.8
Café Madrid	20/12/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	264	24.5	5.87
Café Madrid	31/12/2005	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	326	24.3	5.85
Café Madrid	06/01/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	250	23.8	
Café Madrid	13/01/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	248	23.9	
Café Madrid	21/01/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	261	23.9	
Café Madrid	29/01/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	253	23.9	
Café Madrid	31/01/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	265	23.9	
Café Madrid	11/02/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	326	23.7	
Café Madrid	19/02/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	329	23.8	
Café Madrid	23/02/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	340	23.8	
Café Madrid	02/03/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	196	23.9	
Café Madrid	11/03/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	201	23.9	
Café Madrid	17/03/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	192	23.9	
Café Madrid	22/03/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	214	23.9	
Café Madrid	02/04/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	237	23.9	
Café Madrid	04/04/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	225	23.7	
Café Madrid	11/04/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	221	23.7	
Café Madrid	23/04/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	236	23.7	
Café Madrid	25/04/2006	Flujo Base	1296958.54	1104647.798	600	220	23.7	
La Esperanza	08/10/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	86	22.9	6.63
La Esperanza	16/10/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	91.3	22.9	6.55
La Esperanza	23/10/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	83.1	22.8	6.62

La Esperanza	28/10/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	87.3	22.9	6.63
La Esperanza	03/11/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	96.8	22.8	5.97
La Esperanza	13/11/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	73.8	22.8	6.25
La Esperanza	20/11/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	65.7	22.8	6.14
La Esperanza	23/11/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	79.8	22.9	6.21
La Esperanza	30/11/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	80.1	23.1	6.37
La Esperanza	11/12/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	87.2	22.9	6.25
La Esperanza	17/12/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	90.8	22.8	6.25
La Esperanza	20/12/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	102	22.8	6.38
La Esperanza	25/12/2005	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	99.4	22.9	6.25
La Esperanza	05/01/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	102	23.3	5.89
La Esperanza	15/01/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	95.1	23.4	6.31
La Esperanza	22/01/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	104	23.8	6.27
La Esperanza	26/01/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	103	23.9	6.1
La Esperanza	05/02/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	98.6	23.8	6.07
La Esperanza	07/02/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	95.4	23.7	6.09
La Esperanza	19/02/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	99.8	23.3	6.11
La Esperanza	26/02/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	1050	103	23.3	6.13
La Esperanza	02/03/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	600	85.4	22.9	
La Esperanza	11/03/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	600	92.1	22.9	
La Esperanza	17/03/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	600	84.8	22.8	
La Esperanza	22/03/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	600	98.3	22.9	
La Esperanza	02/04/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	600	81.9	22.8	
La Esperanza	04/04/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	600	68.2	22.8	
La Esperanza	11/04/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	600	74.5	22.8	
La Esperanza	23/04/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	600	79	22.9	
La Esperanza	25/04/2006	Flujo Base	1273005.092	1110222.275	600	81.6	23.1	
Café Madrid	06-01-2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	250	23.8	
Café Madrid	13/01/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	248	23.9	
Café Madrid	21/01/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	261	23.9	
Café Madrid	29/01/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	253	23.9	
Café Madrid	31/01/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	265	23.9	
Café Madrid	11/02/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	326	23.7	
Café Madrid	19/02/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	329	23.8	
Café Madrid	23/02/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	340	23.8	
Café Madrid	02/03/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	196	23.9	
Café Madrid	11/03/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	201	23.9	
Café Madrid	17/03/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	192	23.9	
Café Madrid	22/03/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	214	23.9	
Café Madrid	02/04/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	237	23.9	
Café Madrid	04/04/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	225	23.7	
Café Madrid	11/04/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	221	23.7	
Café Madrid	23/04/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	236	23.7	
Café Madrid	25/04/2006	Flujo Base	1104647.798	1296958.54	600	220	23.7	

ANEXO 2

Datos de Niveles y Parámetros Fisicoquímicos del Muestreo de Escorrentía Total en la estación de Café Madrid. 29 y 30 de Abril de 2006.

Fecha	Hora	Nivel (cm)	Caudal	Conductividad	Temperatura	pH
aa/mm/aa	Actual	Limnimitrico	(m3/s)	µs/cm	°C	
29/04/06	9:00:00 a.m.	117	39.50	185	23.8	6.24
	9:30:00 a.m.	117	39.50	195	23.7	6.13
	10:00:00 a.m.	118	39.94	206	23.8	6.2
	10:30:00 a.m.	118	39.94	222	24	6.05
	11:00:00 a.m.	118	39.94	197	23.9	5.84
	11:30:00 a.m.	118	39.94	168	23.9	5.93
	12:00:00 p.m.	118	39.94	200	23.8	5.87
	12:30:00 p.m.	119	40.48	213	24.1	6.08
	1:00:00 p.m.	119	40.48	208	23.9	5.98
	1:30:00 p.m.	118	39.94	187	24.2	6.11
	2:00:00 p.m.	118	39.94	220	23.7	6.06
	2:30:00 p.m.	118	39.94	198	23.8	6.04
	3:00:00 p.m.	118	39.94	221	23.7	5.96
	3:30:00 p.m.	117	39.50	199	23.9	5.94
	4:00:00 p.m.	117	39.50	217	23.9	5.96
	4:30:00 p.m.	117	39.50	203	24	5.84
	5:00:00 p.m.	117	39.50	218	24.2	5.72
	5:30:00 p.m.	118	39.94	235	24.4	5.79
	6:00:00 p.m.	124	47.16	272	24.2	5.62
	6:30:00 p.m.	137	52.93	326	24.1	5.48
	7:00:00 p.m.	139	53.57	451	24.2	5.29
	7:30:00 p.m.	137	52.93	428	24	5.01
	8:00:00 p.m.	136	52.35	482	23.8	4.84
	8:30:00 p.m.	133	51.69	409	23.9	4.88
	9:00:00 p.m.	133	51.69	385	23.8	4.85
	9:30:00 p.m.	132	51.14	364	23.8	4.79
	10:00:00 p.m.	132	51.14	376	23.7	4.83
	10:30:00 p.m.	130	50.34	391	23.9	4.87
11:00:00 p.m.	129	50.11	365	24	4.88	
11:30:00 p.m.	128	49.78	324	24.2	4.86	
30/04/06	12:00:00 a.m.	127	49.27	362	24.2	4.9
	12:30:00 a.m.	126	48.93	315	24.3	4.91
	1:00:00 a.m.	125	48.02	347	24.1	4.87

1:30:00 a.m.	124	47.16	358	24.1	4.86
2:00:00 a.m.	125	48.02	340	24	4.79
2:30:00 a.m.	124	47.16	329	23.9	4.72
3:00:00 a.m.	123	45.56	324	23.9	4.8
3:30:00 a.m.	122	44.04	328	23.8	4.82
4:00:00 a.m.	122	44.04	312	23.9	4.74
4:30:00 a.m.	121	43.81	305	23.7	4.76
5:00:00 a.m.	121	43.81	284	23.9	4.8
5:30:00 a.m.	121	43.81	296	24	4.76
6:00:00 a.m.	120	41.75	301	23.9	4.75
6:30:00 a.m.	120	41.75	283	23.9	4.78
7:00:00 a.m.	118	39.94	294	24	4.81
7:30:00 a.m.	119	40.48	286	24.2	4.79
8:00:00 a.m.	120	41.75	279	24.2	4.73