

**ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA A PARTIR DE LA
INFORMACIÓN DE ISÓTOPOS ESTABLES EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO
LEBRIJA, ESTACIÓN CAFÉ MADRID.**

LILIANA STELA MOLINA MENESES

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

2010

**ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA A PARTIR DE LA
INFORMACIÓN DE ISÓTOPOS ESTABLES EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO
LEBRIJA, ESTACIÓN CAFÉ MADRID.**

LILIANA STELA MOLINA MENESES

**Trabajo de Grado para optar por el Título de
Ingeniero Civil**

Director:

Sully Gómez Isidro

Ing. Civil, M.sc., PhD

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

2010

AGRADECIMIENTOS

A mi directora de proyecto, la doctora Sully Gómez Isidro, por todo su apoyo, confianza, dedicación, paciencia, aportes y empeño invaluable para la culminación exitosa de este proyecto.

Al Ingeniero Civil David Alonso Barajas Solano su orientación precisa y su incondicional apoyo.

Al Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático, GPH, encabezado por la Dra. Sully Gómez Isidro, por toda la colaboración prestada durante el desarrollo de este proyecto.

A la AIEA, organismo que analiza gratuitamente las muestras de precipitación para el análisis de isótopos estables.

A las entidades : IDEAM, AMB, CDMB Y CENICAFE, por facilitar la información de datos Hidrológicos de precipitación, muestras de lluvias, y caudales en sus estaciones analizadas por la AIEA.

A los encargados de cada una de las estaciones.

DEDICATORIA

Sólo puedo agradecer a Dios por cada uno de los ángeles que ha puesto en mí camino; aquellos que me han apoyado en las diferentes etapas de mi vida solo esperando a cambio una sonrisa y una muestra de felicidad; esas personas maravillosas que desde mi primer movimiento han estado vigilantes para que mis pasos sean firmes, por aquellos que estuvieron acompañando mi caminar siendo mis bastones y mis mas grandes aliados, con quienes hoy somos todos para uno y uno para todos.

A cada personita que ha llegado a aportar esperanzas, sueños, ilusiones, consejos abrazos y risas; nombrarlos sería imposible por la lista de nombres tan extensa, solo sé que cada uno ha llenado de un nuevo color mis días y en especial amarillo.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 GENERALIDADES	12
1.2 LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA	13
2. METODOLOGÍA	16
2.1 RECOPIACION DE DATOS	16
2.2 MODELOS CONCEPTUALES DE FLUJO	19
2.2.1 FLUJO-PISTÓN	21
2.2.2 EXPONENCIAL	21
2.2.3 EXPONENCIAL -PISTÓN	22
2.3 DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO	23
2.4 FUNCIÓN DE ENTRADA	24
2.4.1 INFORMACIÓN DE ENTRADA	25
2.5 CARACTERIZACIÓN ISÓTOPICA DE SALIDA	27
2.5 AJUSTE DE PARÁMETROS	28
3. ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS	31
4. CONCLUSIONES:	35
5. RECOMENDACIONES:	36
6. BIBLIOGRAFIA:	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localización puntos de muestreo.....	264
Figura 2: Localización muestreadores agua lluvia	265
Figura 3: Concentración ^{18}O para pluviómetros de la cuenca	267
Figura 4: Precipitación y ^{18}O para Galvicia y Café Madrid	268
Figura 5: Precipitación y $\delta^{18}\text{O}$ para Galvicia	266
Figura 6: Precipitación y $\delta^{18}\text{O}$ para San Antonio	26
Figura 7: $\delta^{18}\text{O}$ estación Café Madrid	26
Figura 8: Ajuste de Nash.....	30
Figura 9: Ajuste de Mínimos Cuadrados Estadísticos.....	30
Figura 10: MRT Café Madrid.....	33
Figura 11: MRT Conquistador.....	33
Figura 12: MRT Majadas.....	34

RESUMEN

TITULO:

ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA A PARTIR DE LA INFORMACIÓN DE ISÓTOPOS ESTABLES EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA, ESTACIÓN CAFÉ MADRID.*

AUTOR:

Liliana Stela Molina Meneses**

Palabras claves:

Cuenca Superior del Río Lebrija (C.S.R.L); Isotopos Estables; Tiempo de Residencia.

DESCRIPCIÓN:

Este estudio presenta una aplicación de la variación estacional de los isótopos estables para la estimación de el tiempo de residencia medio (MRT) para la Cuenca Superior del Río Lebrija CSRL.

Los isótopos estables (^{18}O y 2H) son trazadores naturales introducidos al ciclo hidrológico por precipitación. La variación estacional de entrada en la concentración de la precipitación, se transforma en la variación de la producción en los acuíferos del subsuelo, que está en función de la mezcla de las partículas de agua de diferentes tiempos de residencia a lo largo de las trayectorias de flujo. Esta propiedad de los isótopos estables los hace útiles para la estimación del tiempo medio de residencia del agua en los acuíferos mediante la aplicación de modelos de flujo conceptual. La recogida de muestras y el almacenamiento de agua para análisis de isótopos estables es simple y de bajo costo en comparación con otros populares isótopos inestables como los CFC o 3H y $3\text{H}/3\text{He}$.

En la CSRL la estimación del tiempo de residencia permitirá un mejor entendimiento de los modelos conceptuales de flujo subterráneo y permitirá tomar las medidas necesarias para minimizar la posible contaminación, o la ya existente, evitar la sobreexplotación y el agotamiento de las fuentes de abasto

* Proyecto de Grado

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

ABSTRACT

TITLE:

ESTIMATION OF THE RESIDENCE TIME FROM THE STABLE ISOTOPE INFORMATION IN THE UPPER OF THE RIVER LEBRIJA SUPERIOR CATCHMENTS, CAFE MADRID STATION.*

AUTHOR:

Liliana Stela Molina Meneses**

KEY WORDS:

River Lebrija Superior Catchments (C.S.R.L); Stable Isotope; Residence Time.

DESCRIPTION:

This study presents an application of the seasonal variation of stable isotopes for the estimation of the mean residence time (MRT) of the River Lebrija Superior Catchments CSRL catchment baseflow.

Stable isotopes (^{18}O and ^2H) are natural conservative tracers introduced to the hydrologic cycle by precipitation, so seasonal input variation of its concentration in precipitation is transformed into the output variation in aquifers depending on subsurface mixing of water particles of different residence times along flow paths). This property of stable isotopes makes them useful for estimation of water mean residence time in aquifers by application of conceptual flow models; also, sample collecting and storage of water for stable isotope analysis is simple and inexpensive compared to other popular unstable isotopes like CFCs or ^3H and $^3\text{H}/^3\text{He}$.

CSRL the estimating the residence time will allow a better understanding of the conceptual models of underground flow and will take steps to minimize potential contamination, or the already existing, to prevent overfishing and depletion of supply sources

* Graduation Project

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

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio presenta la variación estacional de los isótopos estables para la estimación del tiempo de residencia medio (MRT) del flujo base medida en estaciones situadas en los principales ríos de la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL). Los Isótopos estables (^{18}O y ^2H) son trazadores naturales del agua, introducidos al sistema subterráneo, el cual hace parte del ciclo hidrológico, por la precipitación. El río en contacto con los sistemas subterráneos recibe la señal de estos trazadores y con un muestreo continuo en el río puede detectar la variación temporal de esta señal. Este fenómeno es utilizado para obtener el MRT mediante el uso de modelos de flujo que han sido propuestos en la literatura para representar diferentes formas de recarga y alimentación de los sistemas subterráneos.

El tiempo de residencia es un parámetro que da información sobre el tiempo promedio que demora el trazador en salir del sistema, en este caso el agua. Conocer el tiempo de residencia permitirá acercarse a un modelo conceptual del flujo en la cuenca, conocer tiempos de renovación del recurso en la cuenca, tiempos de transporte de un contaminante y otras muchas aplicaciones.

Para la aplicación de estos modelos se utilizará información primaria disponible tanto de isótopos estables, como de precipitación y caudales. Igualmente se utilizará información secundaria obtenida de otros estudios o investigaciones, por ej. de balances hídricos, etc.

En la CSRL la estimación del tiempo de residencia permitirá un mejor entendimiento de los modelos conceptuales de flujo subterráneo y permitirá tomar las medidas necesarias para minimizar la posible contaminación, o la ya existente, evitar la sobreexplotación y el agotamiento de las fuentes de abasto.

Se presentan los resultados de la aplicación de un modelo de dispersión de isótopos estables en la CSLR para establecer los tiempos de residencia medio.

1.1 GENERALIDADES

En la precipitación la variación de entrada de la concentración de las precipitaciones se transforma en la variación de la producción de los acuíferos subterráneos en función de la mezcla de partículas de agua con diferentes tiempos de permanencia a lo largo de las vías de flujo (Vitvar y Balderer, 1997). Los isótopos estables son útiles para la estimación del tiempo medio de permanencia del agua en los acuíferos mediante la aplicación de modelos de flujo conceptual (Maloszewski y Zuber, 1982); también la recogida de muestras y el almacenamiento de agua para el análisis de isótopos estables es simple y de bajo costo en comparación con otros conocidos isótopos inestables como los CFC, ^3H ó $^3\text{H}/^3\text{He}$.

El presente estudio propone la aplicación de un modelo de flujo conceptual por medio de las variaciones estacionales y las concentraciones en aguas subterráneas de isótopos estables (^{18}O) para la estimación de los tiempos de residencia medio MRT, tal como lo proponen Maloszewski y Zuber (1982) y aplicado por McGuire et al., (2002), Ready et al., (2006), y Vitvar & Balderer (1997).

1.2 LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA

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. Está ubicada en la provincia de Soto, al nororiente del departamento de Santander entre las coordenadas geográficas 6°54' y 7°27' de Latitud Norte y 73°15' y 72°15' de Longitud Oeste de Greenwich, aproximadamente.

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: Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Surata, Tona, California, Vetas, Matanza, Charta, que albergan a 1'047.826 habitantes según el último censo registrado en Colombia (DANE, 2005), y representa el 53,52% de la población total de Santander, por tal razón es la cuenca más importante de la región.

Está conformada por cuatro subcuencas: son Río de Oro, Río Frío, Río Tona y Río Surata, las cuales conforman el sistema de captación y drenaje. Las estaciones de análisis están ubicadas sobre dichas subcuencas pueden observarse en la figura N. 1. Café Madrid: ubicada en la corriente del Río Lebrija con latitud 7°17' y -73°8', área de 1200 km², Conquistador: ubicada en la corriente del Río Frío con latitud 6°58' y -73°2', y área de aproximadamente 80 km² y la estación Majadas ubicada en Río Suratá con latitud 7°4' y Longitud -73°27' y área de aproximadamente 502 km².

En la CSRL se encuentran 2 geomorfología predominantes, el macizo rocoso santandereano conformado principalmente por rocas ígneas y metamórficas; y la zona aluvial conformada por rocas sedimentarias, posee una gran variedad de climas y una amplia topografía de alta montaña con elevaciones entre 900 y 2400 msnm. Los suelos en la parte alta tienen un porcentaje importante de materia

orgánica y en la zona de mesetas y terrazas predomina suelos productos de roca sedimentarias, hacia Girón encontramos suelos altamente erosionables (Gómez y Anaya, 2007).

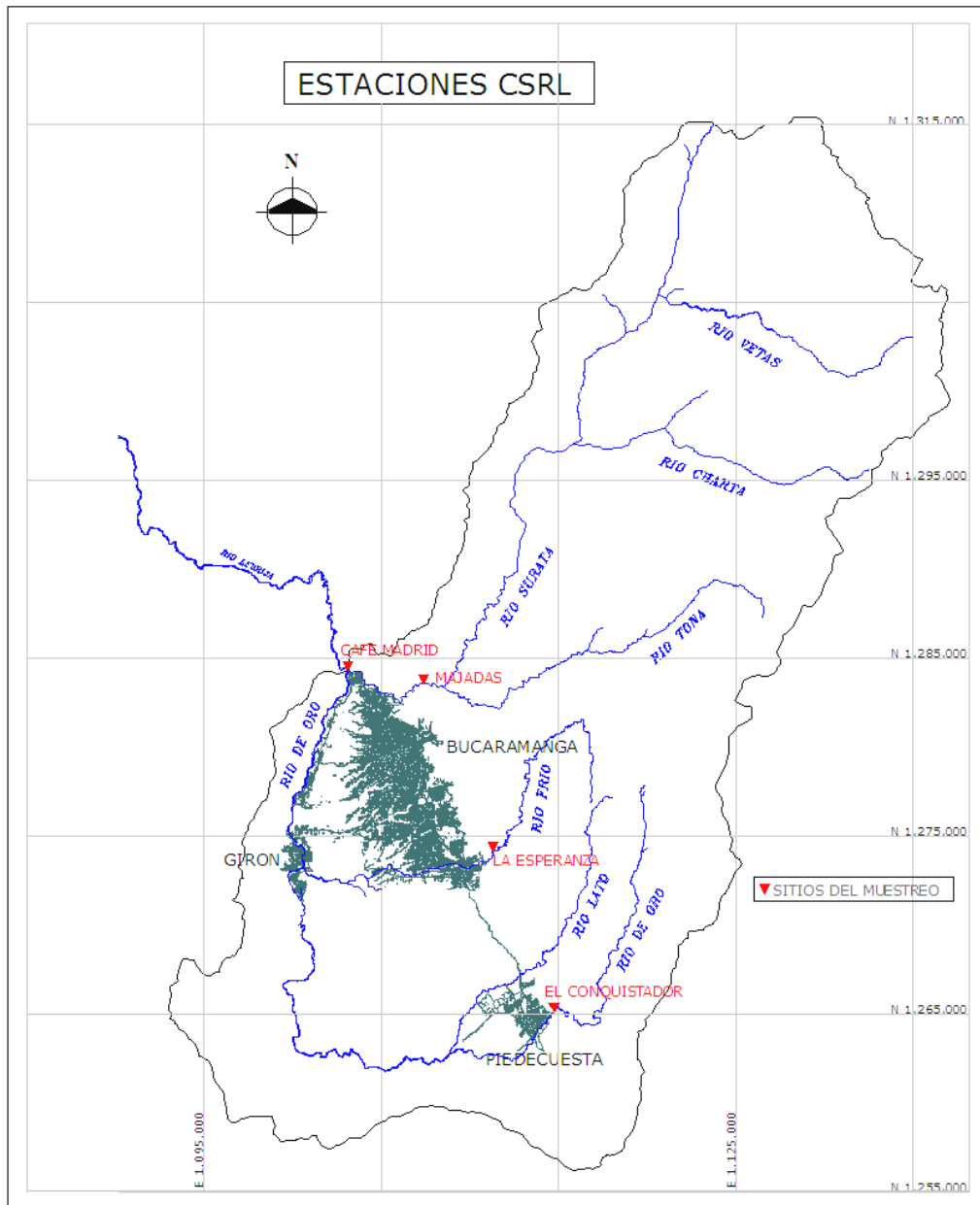


ILUSTRACIÓN 1: LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

Fuente: Adaptado de Barliza & Cristancho, 2007.

La cuenca cuenta con una red de muestreadores de isótopos estables en la precipitación, constituida por 11 estaciones (Gómez, Guzmán, 2006). Las estaciones están localizadas sobre la cuenca superior del río Lebrija, distantes entre sí cada 200 a 400 metros de altura aproximadamente, iniciando en la meseta de Bucaramanga en 993 msnm hasta una altura máxima de 3435 msnm en el Picacho. Ver Figura 2.

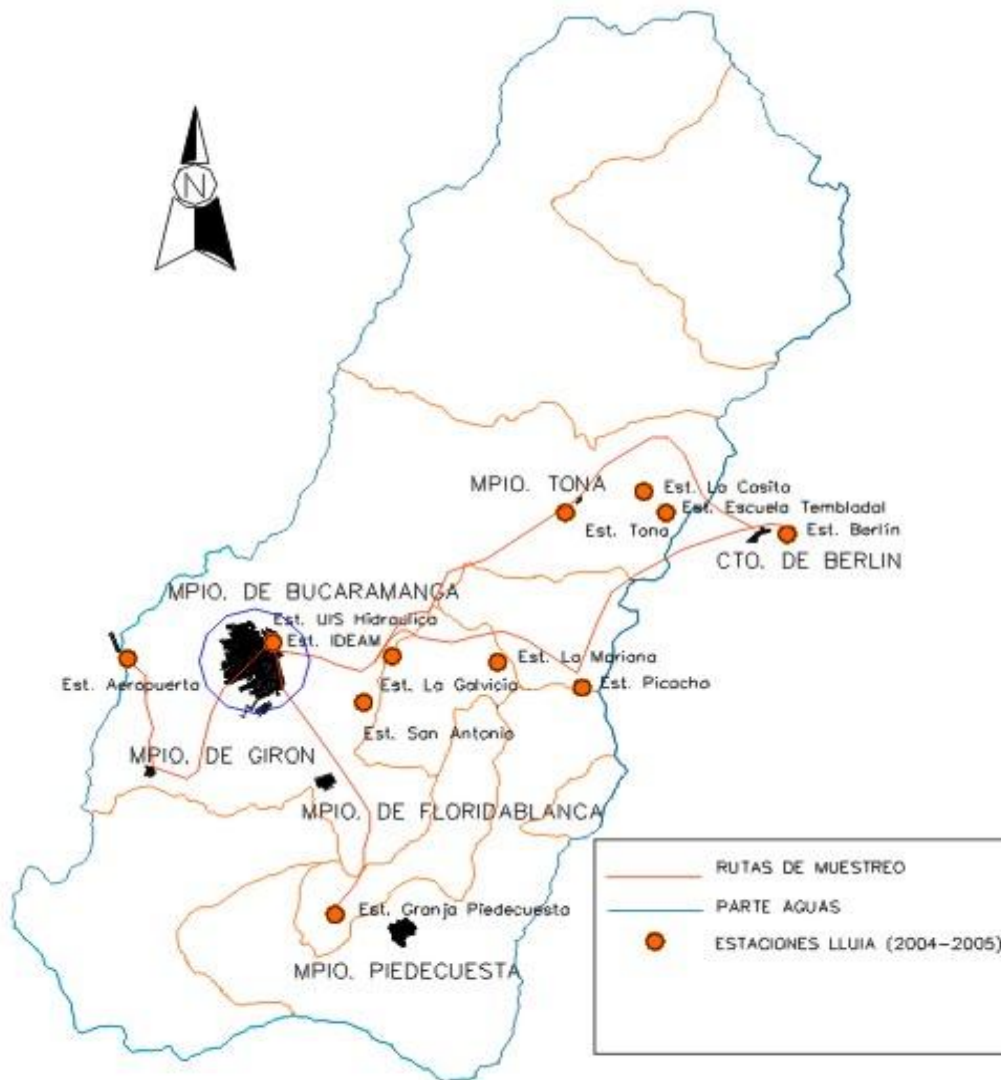


ILUSTRACIÓN 2: LOCALIZACIÓN DE MUESTREADORES DE AGUA LLUVÍA.

Fuente: Adaptado de Barliza & Cristancho, 2007.

2. METODOLOGÍA

Con la información disponible se analizarán los modelos de flujo conceptual que permitirá encontrar la información de entrada el modelo matemático desarrollado; que tiene por función simular la desviación isotópica de salida. Esta información obtenida va a ser comparada aplicando medidas de ajuste con la desviación isotópica medida en la CSRL, con el fin de obtener los parámetros que mejor simulen el comportamiento del flujo de agua en los sistemas de flujo subterráneos de cuenca.

2.1 RECOPIACION DE DATOS

En la Cuenca Superior del Rio Lebrija, se empezaron a tomar medidas de isótopos desde la década de los 90 en forma puntual. Posteriormente se han realizado muestras más continuas y bajo diseños específicos de redes de muestreos tanto en aguas lluvias, como aguas subterráneas y aguas de ríos, que han obedecido a proyectos de investigación con diversas entidades como, Agencia Internacional de energía Atómica, Universidad Industrial de Santander y otras.

La información isotópica en ríos en la cuenca superior del rio Lebrija, fue tomada desde el primero de enero del 2005 hasta diciembre del 2007, para un total de 36 meses en 4 estaciones; en las que se realizaron muestreos semanales durante este tiempo. Se recolectaron 2 muestras cada día (60 mL tomadas en envases en polietileno de alta densidad que permitió la conservación de la muestra por varios meses) y enviadas a los laboratorios de la AIEA en Viena, Austria, donde se realiza el análisis respectivo.

Así mismo, la información de una red de muestreadores de isótopos estables en la precipitación, constituida por 11 estaciones (Gómez et al., 2006); de la cual se obtuvieron muestras mensuales representativas de agua lluvia, que fueron analizadas igualmente en los laboratorio de la AEIA. Este diseño obedeció a la necesidad de medir el efecto orográfico en el fraccionamiento isotópico.

Fueron tomadas muestras de las precipitaciones mensuales acumuladas por 8 estaciones pluviométricas situadas en la Cuenca Superior del Río Lebrija desde octubre del 2004 hasta febrero del 2007 (con datos faltantes en ciertos meses). Las estaciones pluviométricas de muestreo fueron: La Casita, Piedecuesta, San Antonio, Berlín, El Picacho, La Galvicia, Tona y La Mariana (Gómez y Guzmán, 2006)

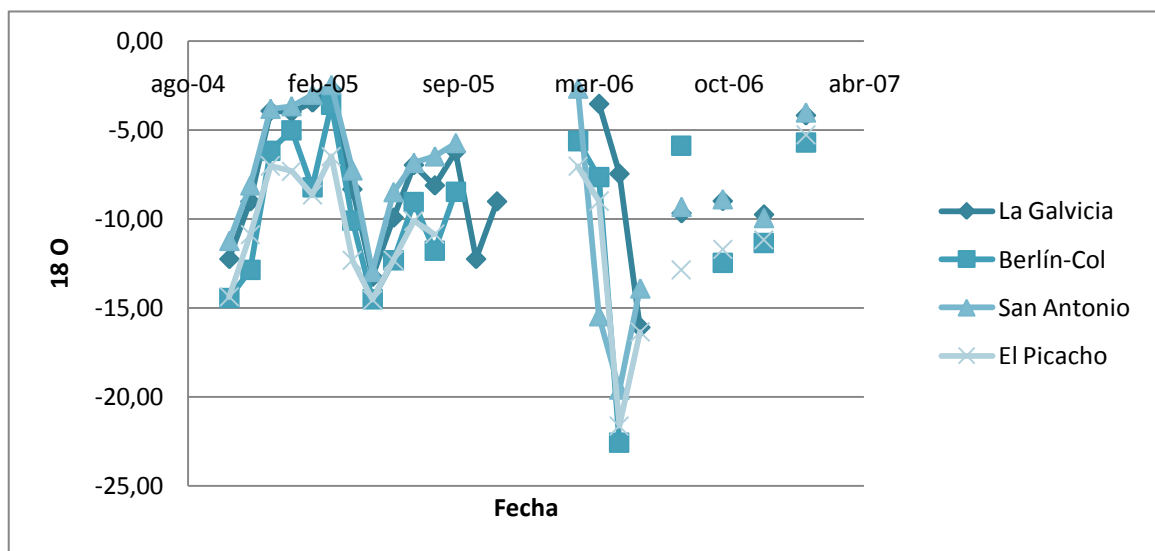


ILUSTRACIÓN 3: VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ^{18}O PARA 4 DE LOS PLUVIÓMETROS UBICADOS EN LA CUENCA

Ilustración 3: Se puede observar que la medida de $\delta^{18}\text{O}$ presenta una clara bimodalidad de variación para el año 2004-2005, presentándose las concentraciones isotópicas más bajas en octubre y mayo, mientras que las mayores concentraciones de los trazadores están en febrero y agosto. Este

comportamiento bi-modal no está presente tan claramente para el periodo 2005-2006.

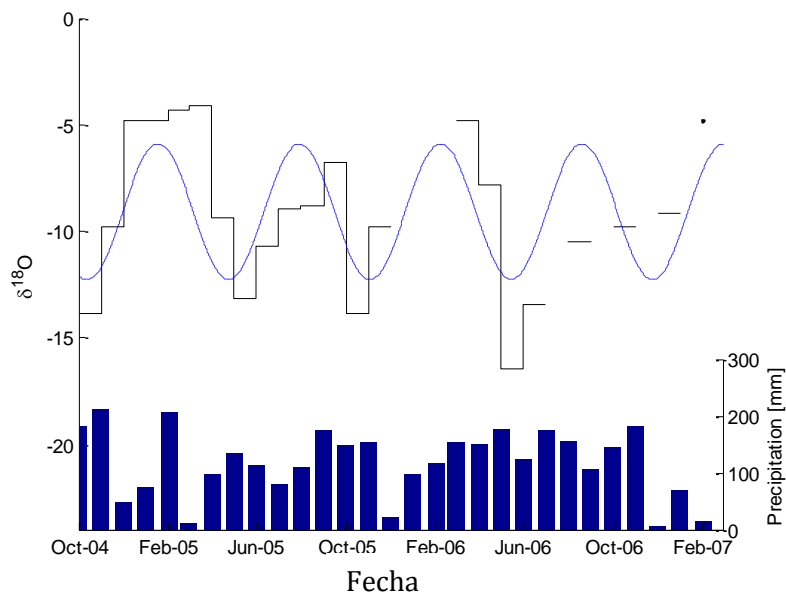
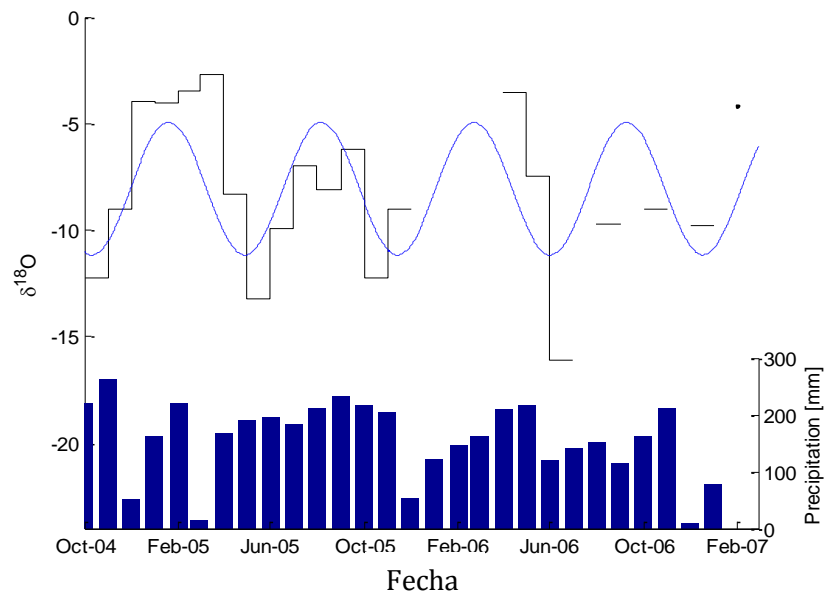


ILUSTRACIÓN 4: : VARIACIÓN DE LA CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN Y CONTENIDO DE 180 , PARA EL PERÍODO COMPRENDIDO ENTRE OCTUBRE 2004 A FEBRERO 2007 EN EL PLUVIÓMETRO LA GALVICIA (ARRIBA) Y PLUVIÓMETRO SAN ANTONIO (ABAJO) SE PUEDE NOTAR LA TENDECIA SINUSOIDAL PARA LA VARIACIÓN ISOTOPICA EN LAS LLUVÍAS (LÍNEA PUNTEADA).

2.2 MODELOS CONCEPTUALES DE FLUJO

Los modelos conceptuales de flujo en acuíferos son usados para la interpretación de cuencas y acuíferos (sistemas subterráneos). Para la aplicación de los modelos, el trazador tiene que entrar al sistema en forma de flujo concentrado. Afortunadamente, los trazadores ambientales entran en los cuerpos de aguas subterráneas a través de la precipitación. Una vez se infiltra el agua, se supone que no vuelve a sufrir fraccionamiento isotópico y por tanto mantiene las mismas características cuando sale del sistema.

Estos modelos se caracterizan por ser analíticos y estacionarios y describen la transformación de la señal de entrada de un trazador dado, en la señal de salida de un sistema de flujo homogéneo mediante la convolución de la siguiente integral (McGuire et al., 2002; Vitvar & Balderer, 1997).

$$\delta_{out}(t) = \int_{-\infty}^t \delta_{in}(T)g(t-T)e^{-\lambda T} dT \quad (1)$$

Aquí, δ_{in} and δ_{out} representan el contenido de la señal de entrada y de salida del trazador. T el tiempo de residencia, t es el tiempo real, λ la tasa de descomposición de los trazadores isotópicos y $g(t-T)$ la función de respuesta del sistema, es la distribución de tiempo de viaje de ponderación para las moléculas del indicador en el sistema (McGuire et al., 2002) y caracteriza el tipo de agua de la mezcla que ocurre en el sistema, o el concepto de modelo en sí (Vitvar & Baldere., 1997); dado que g es una función de ponderación, se deduce que debe satisfacer

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(T)dT = 1 \quad (2)$$

La tasa de decaimiento λ para isótopos estables (como el ^{18}O) es igual a cero debido a que estos son trazadores conservativos, por lo tanto, la ecuación se reduce a la forma más simple.

$$\delta_{out}(t) = \int_{-\infty}^t \delta_{in}(T)g(t-T)dT \quad (3)$$

El tiempo medio de residencia del agua T_m es un importante parámetro de ajuste de todos los modelos. En el caso de medios porosos, la porción de agua llamada inmóvil o estancada es generalmente insignificante y, en consecuencia, se puede igualar el tiempo medio de tránsito del agua al tiempo medio de tránsito del trazador. (Vitvar & Balderer, 1997). Estas hipótesis suponen limitaciones a la capacidad de los modelos para describir procesos más complejos en los acuíferos.

Los modelos se definen particularmente mediante fórmulas que describen una función de ponderación. En forma general, el tipo de función se entiende como modelo.

Para un sistema dado, el tipo de función que se encargue de transformar las diferentes entradas que en una sola entrada (función de ponderación), junto con los valores de sus parámetros forman el modelo de dicho sistema y este modelo se encuentra buscando la función que se ajuste a la ecuación N 3.

La concentración de un trazador en las aguas subterráneas se ve afectada por el transporte a lo largo de una distribución de líneas de flujo subterráneo y la posterior mezcla en la zona de salida (McGuire et al. 2002.). Los tres principales modelos de flujo conceptual fueron presentados por Maloszewski y Zuber (1982, 1996). Teóricamente el modelo del flujo-pistón, el modelo exponencial y el modelo

exponencia-pistón se describen por el modelo de caja negra o modelos de recopilación de parámetros.

A continuación se presentan los modelos de flujos propuestos por Maloszewski y Zuber (1982) y aplicado por McGuire et al., (2002), Reddy et al., (2006), y Vitvar y Balderer (1997).

2.2.1 FLUJO-PISTÓN

El modelo asume que todas las líneas de flujo tienen el mismo tiempo de residencia y que la concentración del trazador solo cambia debido a la descomposición radiactiva; también se considera despreciable la dispersión hidrodinámica.

$$g(t) = \delta(t - \tau) \quad (4)$$

Es por esto que solo es aplicable a los sistemas con entradas constantes de los trazadores. δ es la concentración isotópica que está en función de τ que es el tiempo de residencia.

2.2.2 EXPONENCIAL

La siguiente es la ecuación utilizada para representar el modelo exponencial.

$$g(t) = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5)$$

τ es el tiempo de residencia. Este modelo asume que las líneas de flujo tienen distribución exponencial de los tiempos de residencia; por ejemplo, para la línea más corta el tiempo de residencia es cero y la más larga tiene tiempo de residencia infinito. No hay intercambio de trazadores en las líneas de flujo.

El modelo exponencial es inaplicable a los sistemas en los cuales las líneas de flujo cortas no existen. En otras palabras, el modelo no es aplicable cuando se toman muestras por debajo de la superficie de la tierra, es decir: pozos a grandes profundidades, minas, etc.

2.2.3 EXPONENCIAL -PISTÓN

Este modelo corresponde a las dos situaciones, una distribución aproximada por el flujo pistón y otra con la distribución exponencial de tiempos de residencia y la función de respuesta es independiente de la secuencia en que los modelos son combinados. Comparando con el modelo exponencial es más realista ya que admite un retraso de las líneas de flujo más cortas.

$$g(t) = \frac{\eta}{\tau} \exp\left(-\frac{\eta t}{\tau} + \eta - 1\right) \quad \text{for } t \geq \tau(1 - \eta^{-1}) \quad (6)$$

$$g(t) = 0 \quad \text{for } t < \tau(1 - \eta^{-1}) \quad (7)$$

El modelo exponencial-pistón tiene dos parámetros de ajuste buscados τ y η . El parámetro η es la relación del volumen total entre el volumen con distribución exponencial en los tiempos de tránsitos; para valores bajos de η o iguales a 1 el modelo de flujo es exponencial; mientras que para valores muy grandes que tiendan a ∞ es equivalente al modelo de dispersión con un valor pequeño del parámetro de dispersión aparente. τ es el tiempo de residencia medio del sistema.

Este modelo combinado de exponencial-pistón es el que se utiliza para describir la mezcla del agua en este estudio.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO

Fue preparada una función en MATLAB que calcula una señal de salida en fechas específicas aplicando la convolución con el modelo deseado a una señal de entrada. La integral de convolución se calcula numéricamente utilizando el método del trapecio.

El proceso de ajuste de parámetros se realiza usando simulaciones de Monte-Carlo. Para esto se define un rango de valores posibles para los dos parámetros y una función se encarga de generar valores aleatorios para los parámetros dentro de los rangos especificados, correr simulaciones para cada pareja η , τ y calcular las estadísticas de ajuste (la suma de cuadrados de las diferencias o el coeficiente de Nash- Sutcliffe) de cada simulación. Las decisiones de diseño de escogencia del método integral se toman favoreciendo consideraciones de costo y sacrificando consideraciones de exactitud; esa es la razón por la cual se decidió usar la regla del trapecio y no otro método de Newton-Cotes más sofisticado como Simpson (dado que sería numéricamente más costoso calcular cada integral y aunque esto serviría para mejorar la exactitud, no es crítico contar con excelente exactitud si el resultado es numéricamente muy costoso en tiempo de cálculo).

Las complicaciones que hubo a la hora de hacer las funciones fueron en general a la hora de reducir el tiempo de cálculo y hacer que la integral de convolución fuera calculada bien.

Así mismo, todo el procesamiento de datos, cálculos, graficación, interpretación, etc. se hace en MATLAB. La preparación de las señales se hace previamente en Excel, etc.

2.4 FUNCIÓN DE ENTRADA

Para obtener la desviación isotópica de salida (ecuación N. 8) es necesario tener la información isotópica de entrada ó función de entrada.

Aunque el ^{18}O es introducido al ciclo hidrológico a través de la precipitación la concentración de ^{18}O en la lluvia δ_p no vendría como función de entrada, ya que no toda el agua en la superficie participa en la recarga de los sistemas acuíferos. El valor hidrológico para cada periodo de muestreo debe ser ponderado por la cantidad de P (precipitación) y ajustado a un factor α que es el parámetro de recarga (McGuire et al., 2002). La fórmula básica es, como se presenta en Bergmann et al., (1986):

$$\delta_{in} = \frac{N\alpha_i P_i}{\sum_{j=1}^N \alpha_j P_j} (\delta_{p,i} - \delta_{GW}) + \delta_{GW} \quad (8)$$

En la ecuación P_i es la precipitación, δ_p es la concentración de ^{18}O en la precipitación, α_i es el factor de recarga para el i-ésimo período de muestreo y N es el número de períodos de muestreo. El parámetro $\delta_{GW} = -8.5$ (Arroyave J., Velasquez J., 2009) y es la composición isotópica media de las aguas subterráneas locales originarias de las precipitaciones recientes.

2.4.1 INFORMACIÓN DE ENTRADA

La función de entrada para el presente estudio se elaboró con base en la ecuación 8. El dominio del tiempo se extiende hacia atrás hasta el año 2000, con el fin de satisfacer parcialmente la frontera $-\infty$ inferior de la integral como se indica en la ecuación 3. La precipitación y los registros de las concentraciones isotópicas se obtuvieron para las estaciones pluviométricas La Galvicia y San Antonio. Ver figuras 5 y 6.

Para construir la función de entrada se usó la información de la precipitación mensual disponible a partir del 2000; pero el contenido isotópico $\delta^{18}\text{O}$ solo está disponible, entre Octubre de 2004 a Octubre de 2006 con datos faltantes durante meses. Entonces, el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ fue ampliado artificialmente hacia atrás, asumiendo que el comportamiento observado de Octubre de 2004 a Octubre de 2006 fue el mismo para años anteriores. Esta suposición se hace con el fin de compensar la frontera del tiempo en la integral de convolución.

Los factores de recarga utilizados en la señal de entrada, expresan la relación entre la infiltración y la lluvia total, en épocas secas la infiltración es mínima o nula y el factor de recarga podría llegar a tomar valores muy bajos o cero. En épocas lluviosas la infiltración aumenta y el factor de recarga puede llegar a tomar valores máximos de uno. En la cuenca se tienen zonas localizadas de recarga, las cuales ocurren en alturas entre 1500 y 2000 msnm (Gómez, Anaya, 2003), lo cual coincide con las zonas de mayor precipitación, por lo tanto se considera que la recarga sigue un comportamiento bimodal en frecuencia con el comportamiento de la lluvia. Ver figura. Por lo tanto se definieron factores de recarga que varían entre cero (épocas secas) y 0.8 (épocas húmedas).

Con el fin de obtener información de la recarga para las estaciones de calibre, α fue disminuido en 0.1, 0.2 y 0.3. Con cada uno de estos nuevos factores se realizarán simulaciones buscando el que genere una señal de salida que mejor se ajuste a la señal de calibración.

TABLA 1: VALORES DE COEFICIENTE DE RECARGAS USADOS MENSUALMENTE.

COEFICIENTE DE RECARGA α				
MES	SAN ANTONIO			
	LA GALVICIA	(α -0.1)	(α -0.2)	(α -0.3)
ENERO	0,300	0,200	0,100	0,000
FEBRERO	0,400	0,300	0,200	0,100
MARZO	0,600	0,500	0,400	0,300
ABRIL	0,800	0,700	0,600	0,500
MAYO	0,700	0,600	0,500	0,400
JUNIO	0,600	0,500	0,400	0,300
JULIO	0,500	0,400	0,300	0,200
AGOSTO	0,500	0,400	0,300	0,200
SEPTIEMBRE	0,700	0,600	0,500	0,400
OCTUBRE	0,800	0,700	0,600	0,500
NOVIEMBRE	0,700	0,600	0,500	0,400
DICIEMBRE	0,400	0,300	0,200	0,100

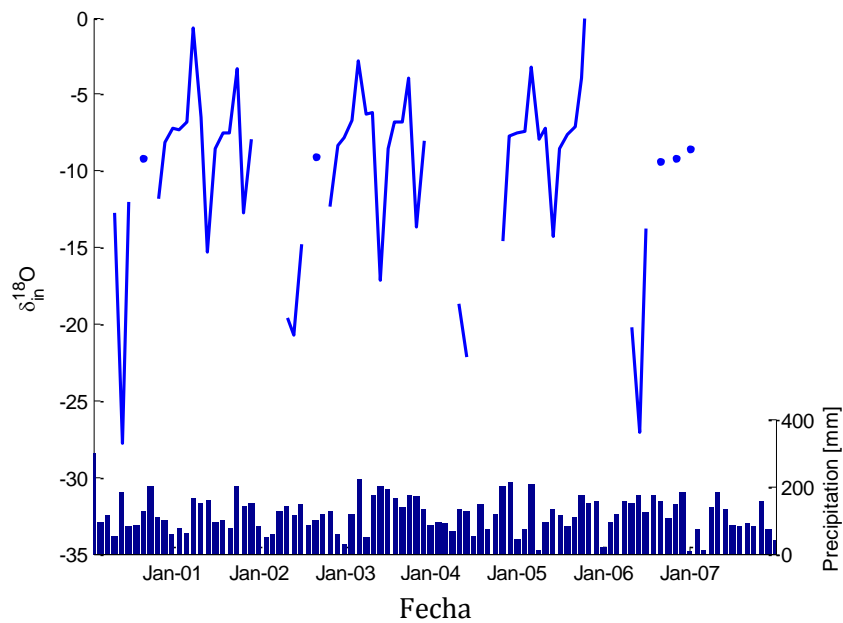


ILUSTRACIÓN 5: VARIACIÓN DE LA CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN Y CONTENIDO DE $\delta^{18}\text{O}$, PARA EL PERÍODO COMPRENDIDO ENTRE OCTUBRE 2000 A FEBRERO 2007 EN EL PLUVIÓMETRO LA GALVICIA

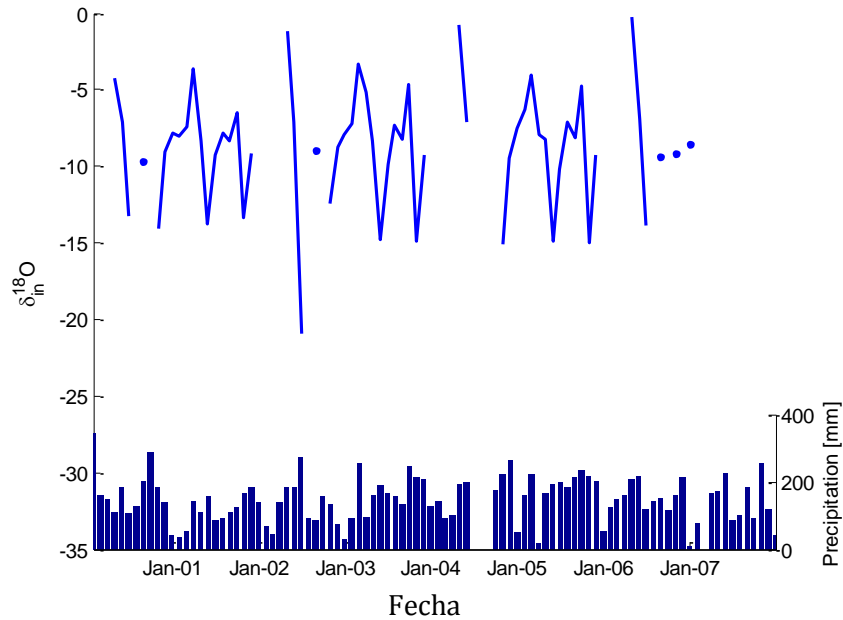


ILUSTRACIÓN 6: VARIACIÓN DE LA CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN Y CONTENIDO DE $\delta^{18}\text{O}$, PARA EL PERÍODO COMPRENDIDO ENTRE OCTUBRE 2000 A FEBRERO 2007 EN EL PLUVIÓMETRO EL SAN ANTONIO

2.5 CARACTERIZACIÓN ISÓTOPICA DE SALIDA

La estación Café Madrid fue elegida como la ubicación de salida para el presente estudio, dado que se encuentra en el cierre de la CSRL.

Se tomaron muestras de agua desde la superficie de la corriente principal de la cuenca cada semana, aproximadamente entre enero de 2005 y diciembre de 2006. Estas muestras también fueron enviadas a los laboratorios de la AIEA para el análisis de ^{18}O (figura 7)

Estos resultados fueron usados como valores observados para el cálculo de error por los mínimos cuadrados estadísticos y para el coeficiente de Nash.

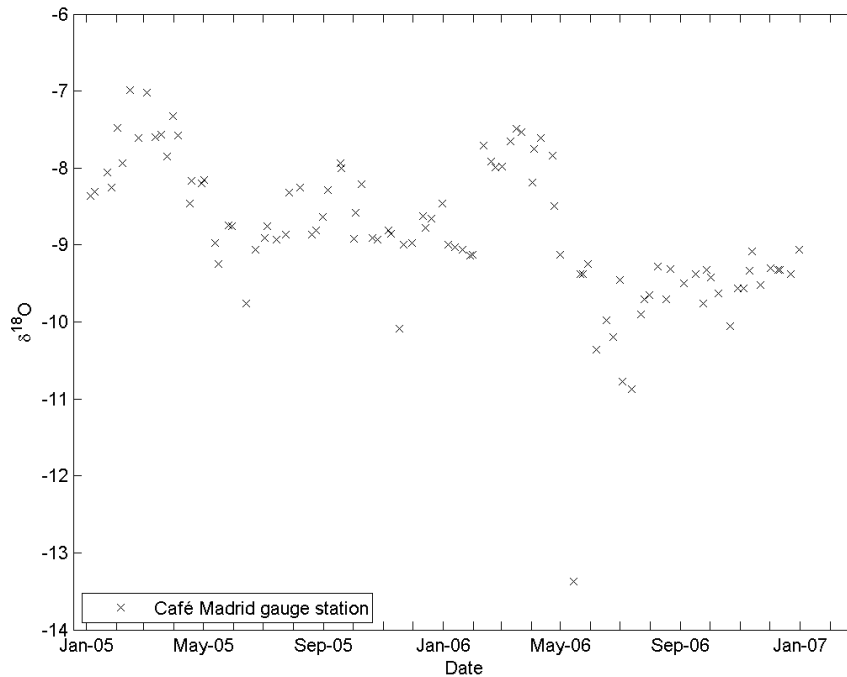


ILUSTRACIÓN 7: VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE 18O EN EL AGUA DEL RÍO EN LA ESTACIÓN DE CAFÉ CALIBRE MADRID, PERÍODO COMPRENDIDO ENTRE ENERO 2004-DICIEMBRE 2006.

2.5 AJUSTE DE PARÁMETROS

Mediante el establecimiento de una función de entrada, es posible simular la señal de salida para un sistema de flujo de un MRT determinadas mediante la ecuación (3). Entonces, si se conoce la función de entrada para un sistema, se puede estimar el MRT del sistema, tomando el valor de τ que reduce al mínimo los siguientes mínimos cuadrados estadísticos (Maloszewski y Zuber, 1996):

$$\Sigma = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (\delta_{in,i} - \delta_{out,i})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

Donde $\bar{\delta}_{out}$ y $\bar{\delta}_{in}$ son los valores observados y simulados valores, respectivamente. Otros parámetros del modelo, como la η en el modelo exponencial de flujo de pistón, son objeto de la optimización.

El coeficiente de eficiencia NSE, también conocido como el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe, es usado para la evaluación de modelos porque involucra estandarización de la varianza residual y su valor esperado no cambia con la longitud del registro o la magnitud de la esorrentía (Kachroo y Natale, 1992; citado en Kothyari y Singh, 1999). Se calcula como:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Q}_I - Q_I)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_I - \bar{Q}_I)^2} \quad (10)$$

Un perfecto ajuste sugiere un valor igual a uno, pero se considera excelente una calibración con un índice de Nash-Sutcliffe superior a 0.8 y aceptable para valores superiores a 0.6. Cuando el modelo es cero significa que el modelo no es mejor si se compara con un modelo de una sola variable y valores negativos indican que el modelo se comporta peor.

El comportamiento de los parámetros de error para numerosas simulaciones permitirá acercarse a los parámetros del modelo. Las gráficas 8 y 9 muestran la aproximación del ajuste que se obtuvo para valores de η entre 1 y 2 y para \bar{U} de 100 y 1000.

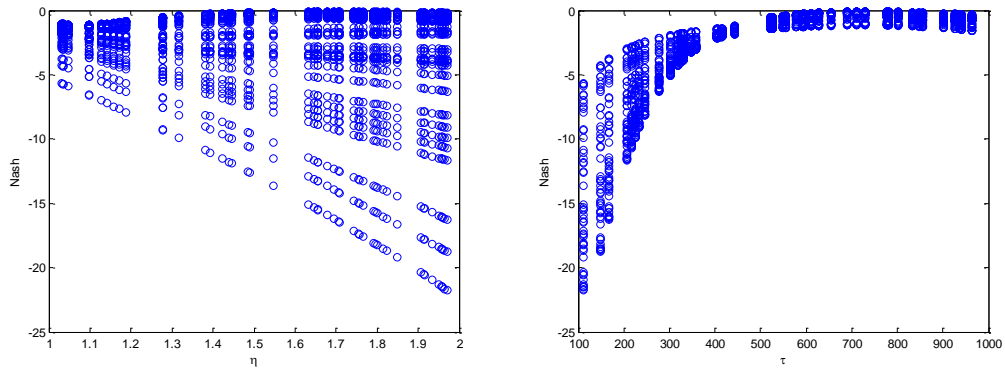


ILUSTRACIÓN 8: AJUSTE DE PARÁMETROS COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE. SE PRESENTAN MEJOR AJUSTE PARA LOS VALORES MÁS PRÓXIMOS A 1.

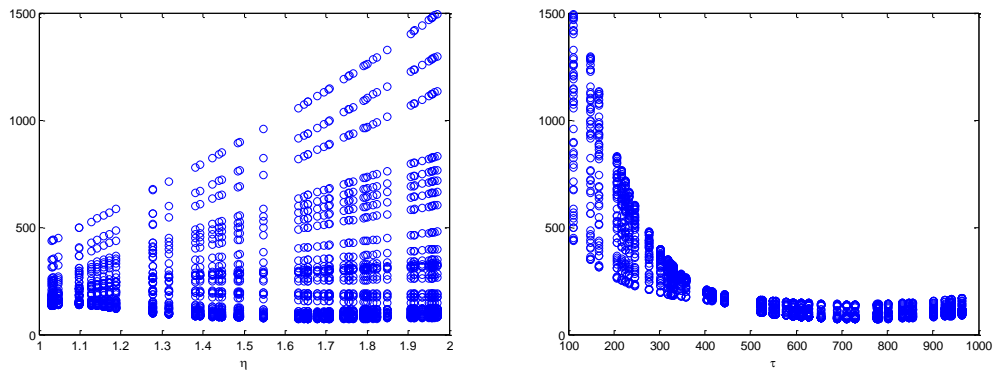


ILUSTRACIÓN 9: AJUSTE DE PARÁMETROS PARA MÍNIMOS CUADRADOS ESTADÍSTICOS. SE PRESENTA MEJOR AJUSTE PARA LOS VALORES MÁS CERCANOS A 0.

Figura 8 y 9: Representan el par de parámetros que mejor ajuste tienen tanto para el coeficiente de Nash-Sutcliffe como para el error de mínimos cuadrados estadísticos.

3. ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Una vez se obtuvo la señal de entrada para las estaciones La Galicia y San Antonio (figura 5 y 6) se calculó la señal de salida en fechas específicas aplicando la convolución de la ecuación 3.

$$\delta_{out}(t) = \int_{-\infty}^t \delta_{in}(T)g(t - T)dT \quad (3)$$

Para la estimación de MRT por medio de ajuste de parámetros se empleó una rutina de optimización de Monte Carlo. Usando una función de entrada calculada anteriormente, es posible inferir 2500 valores de η y τ (por cada simulación), que se ajustan satisfactoriamente a las señales de salida simulada calculado con un valor de η que minimiza el \sum y maximiza el coeficiente de Nash.

Para la rutina de optimización se permitieron diferentes rangos de valores de η y τ para los que las gráficas de ajuste de parámetros estuvieran más próximas. De estas simulaciones se tomó la mejor aproximación. A continuación se presenta la tabla de valores de ajuste para las estaciones en estudio mostrando la calibración obtenida para el coeficiente de Nash- Sutcliffe (1970).

Se realizaron simulaciones con las estaciones pluviométricas con información disponibles en la parte alta de la cuenca (zonas de recarga), Picacho, Berlin, San Antonio, Galicia. Los mejores resultados se obtuvieron con las estaciones de la Galicia (1990 msnm) y San Antonio (1531 msnm). Café Madrid y Majadas se ajustaron muy bien con la estación Galicia, Conquistador tuvo mejor ajuste con la estación de San Antonio.

TABLA 2: VALORES QUE PRESENTARÓN MEJOR AJUSTE PARA LA ESTACIÓN CAFÉ MADRID, PUNTO PLOVIOGRAFICO LA GALVICIA.

CAFÉ MADRID- GALVICIA			
	η .	τ	Nash
1	1,7094	729	0,1014
2	2,32	1065	-0,47

Para la estación Conquistador y Majadas se realizó la rutina de optimización disminuyendo los factores de recarga trabajados en este estudio con el fin de obtener información de la recarga de estas estaciones. En las tablas 3 y 4 se presentan los mejores ajustes obtenidos para estas estaciones:

TABLA 3: VALORES DE AJUSTE PARA LA ESTACIÓN CONQUISTADORES, PLUVIOMETRO SAN ANTONIO

CONQUISTADOR- SAN ANTONIO			
	η .	τ	Nash
α	1,006	1242	-0,455
$\alpha-0.2$	1,04	1312	-0,753
$\alpha-0.3$	1,005	1082	-0,4034

TABLA 4: VALORES DE AJUSTE PARA LA ESTACIÓN MAJADAS, PLUVIOMETRO LA GALVICIA

MAJADAS- GALVICIA			
	η .	τ	Nash
α	1,0098	555	-1,18
$\alpha-0.2$	1,001	583	-1,01
$\alpha-0.3$	1,18	712	-1,06

Las figura 10,11 y 12 muestran la convolución de los parámetros η y τ para los que se presentan el mejor ajuste en las estaciones Café Madrid, Conquistador y Majadas.

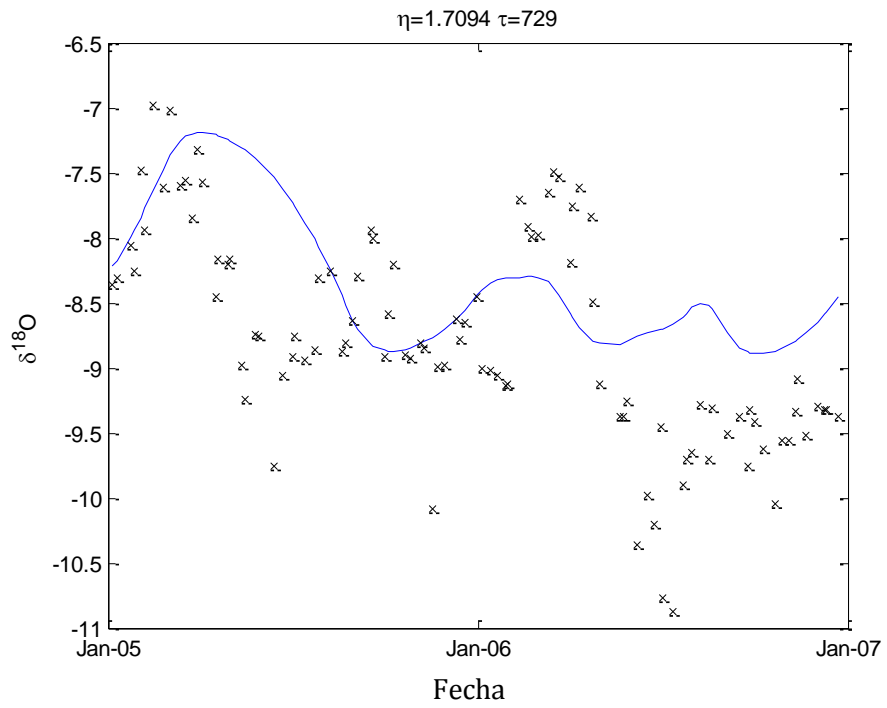


ILUSTRACIÓN 10 : MRT PARA ESTACIÓN CAFÉ MADRID.

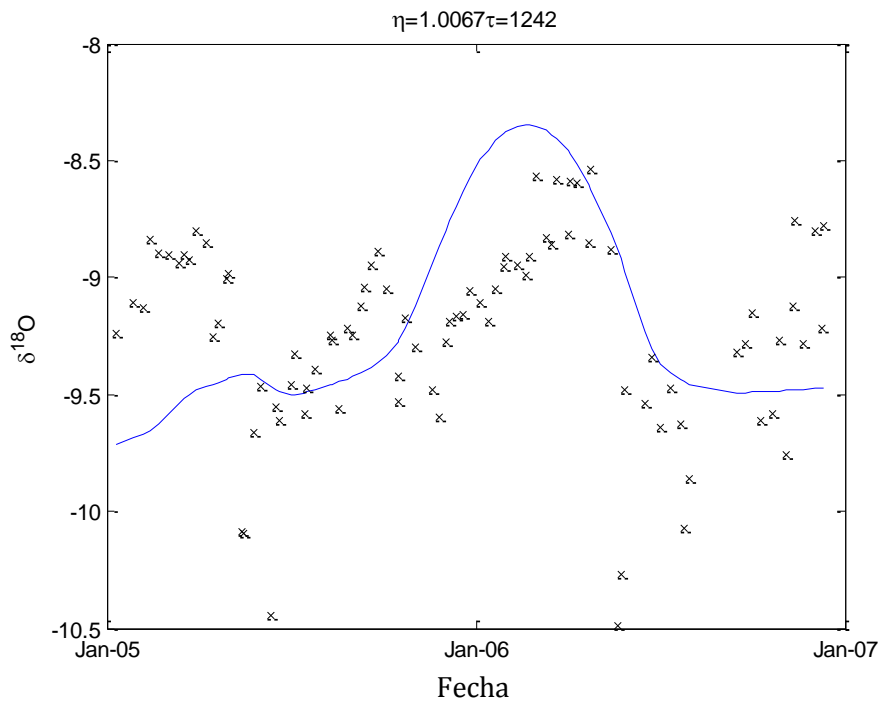


ILUSTRACIÓN 11: MRT PARA ESTACIÓN CONQUISTADOR

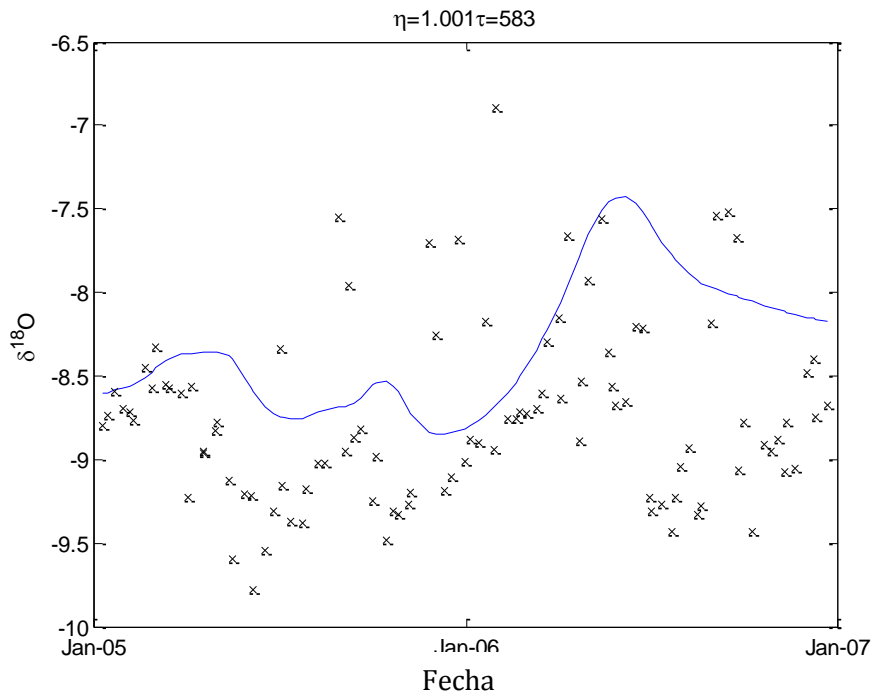


ILUSTRACIÓN 12: MRT PARA ESTACIÓN MAJADAS

A continuación se presenta una tabla de resumen con los valores de ajuste para la estación Café Madrid, San Antonio y Galvicia.

TABLA 5: RESUMEN AJUSTE DE PARÁMETROS

	τ (días)	η	Área aferente (km ²)
Café Madrid	729	1.7	1200
Majadas	583	1.001	500
Conquistador	1240	1.006	80

4. CONCLUSIONES:

- Para la presente investigación se obtuvieron los Tiempos de Residencia Media en la Cuenca Superior del Río Lebrija CSRL mediante el uso de un algoritmo numérico programado en MATLAB, el cual simula algunos modelos de flujo conceptual en agua subterráneas a partir de información tanto de Isótopos Estables del agua tomados en ríos y lluvias, como de parámetros hidrológicos (precipitación, caudales) medidos en la CSRL. Los Tiempos de residencia medio en una cuenca se estudian con el fin de conocer la permanencia de un contaminante inyectado en una zona de recarga, o en general, el tiempo medio que pasa el agua en el sistema subterráneo a partir de la recarga.
- Los resultados obtenidos permiten inferir valores de residencia medios para las estaciones. En el punto de cierre de la CSRL (Café Madrid), se encontró un valor de 729 días, en Majadas sobre el Río Suratá, un valor de 583 días y en Conquistador sobre la parte alta del Río de Oro, 1240 días. En general los valores fluctúan entre 19 y 41 meses. El primer valor corresponde a un área aferente de 1200 km², el segundo valor a un área de 500 km² y el tercero a un área de 80 km². El valor obtenido en la estación Conquistador parece ser alto, si se le compara con el área aferente (la menor). Los otros dos valores se consideran ajustados a sus condiciones de áreas superficiales.
- Se obtuvo el η para cada una de estas estaciones que nos permitió inferir el tipo de modelo que caracteriza el acuífero o condiciones del acuífero. Café Madrid= 1.7. Este valor se aleja del valor teórico del modelo exponencial, y en este caso se propone como una aproximación al modelo

exponencial- pistón. Este modelo generalmente se asocia a presencia de acuíferos confinados a semiconfinados. Los valores de eta obtenidos para los otros dos sitios, se aproximan al valor de uno, el cual representa tiempos de residencia con distribución exponencial, mas relacionados con acuíferos libres.

- Con la variación de los factores de recarga para las estaciones Conquistadores y Majadas se puede deducir que la estación Café Madrid es la estación de la cuenca que recibe mayor recarga, en segundo lugar la estación Majadas y con menor recarga la estación Conquistador, lo cual se observa directamente relacionado con el área aferente.
- Del ajuste que tuvieron las diferentes estaciones pluviométricas con las estaciones de muestreo de la desviación isotópica: Café Madrid y Majadas la estación Galvicia, y Conquistador la estación de San Antonio, se podría inferir que esto se debe a la cercanía de la ubicación geográfica de los puntos de muestreo y a la geografía de la zona.
- Siendo el tiempo de residencia mayor en la estación Conquistadores y por la localización que tiene este punto en la CSRL respecto a la estación pluviométrica relacionada (San Antonio) se podrían pensar que a pesar de su cercanía al punto de toma de muestras este es un acuífero confinado y que es esta la razón que la partícula de agua demora más tiempo que en las otras estaciones en salir del sistema.

5. RECOMENDACIONES:

Los errores obtenidos en el proceso de optimización para la estimación de MRT puede ser posiblemente atribuida a los datos que faltan en la precipitación $\delta^{18}\text{O}$; ya que para no dejar vacíos a lo largo del período de estudio estos datos se extiende en forma arbitraria por interpolación lineal. El procedimiento más preocupante de este procedimiento es que una interpolación lineal simple no refleja la alta variabilidad del valor de la función de entrada sobre periodos de tiempo más cortos.

Se debe estudiar más a fondo la estimación de tiempos de residencia medio en la CSRL ya que para el presente estudio se realizaron bastantes consideraciones como la estacionalidad en la desviación isotópica de las aguas lluvias debido a datos faltantes para parte del periodo de estudio.

Es recomendable realizar las comparaciones obtenidas aquí para otras estaciones pluviométricas ubicadas en las estaciones de estudio con el fin de verificar y corroborar la información obtenida; así como tener mayor control en la toma de estas muestras debido a que se encontró información que no se asimilaba al comportamiento que presentaba en general la estación estudiada.

6. BIBLIOGRAFIA:

- Arroyave J., Vasqu ez J., 2009. Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- 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.
- Barliza, R., Cristancho, E., 2007. muestreo de isotopos estables en la escorrentía total de eventos y otros muestreos complementarios. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- Bergmann, H., Sackl, B., Maloszewski, P., Stichler, W., 1986. Hydrological investigation in a small catchment area using isotope data series. Proceedings of the Fifth International Symposium on Underground Water Tracing. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, pp 255-272.
- 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.
- Clark, I., Fritz, P., 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. En Hydrograph Separation in Cathment Studies. Lewis Publishers. p.99-102.

- Chow, Ven Te., 1994. Hidrología aplicada. Editorial McGraw-Hill.
- Dewalle, D., Edwards, P, Swistock, B., Aravena, R., Drimmie, R., 1997. Seasonal isotope hydrology of three appalachian forest catchments. Hydrological Processes 11, 1895-1906.
- 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.
- Kothyari, U., Singh, V., 1999. Multiple input single output for flow forecasting. Journal of Hydrology 220 (1999), pp. 12–26.
- 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.
- 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.

- Maloszewski and Zuber, 1982. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers. 1. Models and their applicability. *Journal of Hydrology* 57 (1982), pp. 207–231.
- Maloszewski and Zuber, 1993. Principles and practice of calibration and validation of mathematical models for the interpretation of environmental tracer data. *Advances in Water Resources* 16 (1993), pp. 173–190.
- Maloszewski and Zuber, 1996. Lumped Parameter Models for the Interpretation of Environmental Tracer Data Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrogeology, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (1996) pp. 9–58 .
- McGuire, K., DeWalle D., Gburek, W., 2002. Evaluation of mean residence time in subsurface waters using oxygen-18 fluctuations during drought conditions in the mid-Appalachians. *Journal of Hydrology* 261, 132-149.
- Reddy, M., Schuster, P., Kendall, C., Reddy, M., 2006. Characterization of surface and ground water $\delta^{18}\text{O}$ seasonal variation and its use for estimating groundwater residence times. *Hydrological Processes* 20, 1753-1772.
- Vitvar, T., Baderer, W., 1997. Estimation of mean water residence times and runoff generation by ^{18}O measurements in a Pre-Alpine catchment (Rietholzbach, eastern Switzerland). *Applied Geochemistry* 12, 787-796.