

**IMPLEMENTACION DE UNA RED DE MUESTREADORES DE ISOTOPOS
ESTABLES EN LA PRECIPITACION PARA OBTENER LA RECTA METEORICA
LOCAL**

**HERNAN ALONSO CAMACHO MARTINEZ
DIEGO ALEJANDRO GUZMAN ARIAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2005

**IMPLEMENTACION DE UNA RED DE MUESTREADORES DE ISOTOPOS
ESTABLES EN LA PRECIPITACION PARA OBTENER LA RECTA METEORICA
LOCAL**

**HERNAN ALONSO CAMACHO MARTINEZ
DIEGO ALEJANDRO GUZMAN ARIAS**

**Tesis de Grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
Ing. Msc. PhD Sully Gómez Isidro**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2005

A la humanidad.

Diego Alejandro Guzmán Arias.

A Dios, a mi Patria y a la Bandera de Guerra.

“Que el estudio sea tan fuerte, para que la vida sea un descanso”

Hernán Alonso Camacho Martínez.

AGRADECIMIENTOS

A nuestra directora de tesis, la doctora Sully Gómez Isidro, por su dedicación y entrega en la dirección de este trabajo.

A los ingenieros, Msc. Jorge Alberto Guzmán, Ángel Anaya y Edward Niño, por sus aportes y opiniones.

A las siguientes entidades: IDEAM, AMB y CENICAFE, las cuales prestaron sus estaciones para la implementación de la red de muestreo y a la CDMB, quien nos facilitó el transporte hasta las estaciones durante los seis meses de muestreo.

Al OIEA, organismo que analiza gratuitamente las muestras de precipitación para el análisis de isótopos estables.

A los encargados de cada una de las estaciones.

A toda la gente que siempre confió en nuestras capacidades y nunca nos dio la espalda.

Y muy especialmente, a nuestros padres, quienes nos colaboraron moral y económicamente, en la consecución de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. ISOTOPOS ESTABLES EN LA PRECIPITACION Y APLICACIONES EN LA HIDROLOGIA	3
1.1 CONCEPTOS BASICOS	3
1.1.1 Estructura del átomo	3
1.1.2 Isótopos	4
1.1.3 Isótopos Estables	5
1.1.4 Isótopos estables del Hidrógeno	5
1.1.5 Isótopos estables del Oxígeno	6
1.1.6 Composición isotópica del agua	6
1.2 LOS ISOTOPOS EN EL CICLO HIDROLOGICO	7
1.3 FRACCIONAMIENTO DE LOS ISOTOPOS ESTABLES	9
1.3.1 Fraccionamiento isotópico	9
1.3.2 Expresión del grado de fraccionamiento isotópico	11
1.3.3 Técnicas de medida	13
1.4 VARIACIONES ISOTOPICAS EN LA PRECIPITACION	15
1.4.1 Variación debido al efecto continental	15
1.4.2 Variación debido al efecto de latitud	16
1.4.3 Variación debido al efecto de altitud u orográfico	17
1.4.4 Variación debido al efecto de cantidad	18
1.4.5 Variación debido a efectos estacionales	18
1.4.6 Variación debido al efecto de temperatura	19
1.5 APLICACIONES GENERALES DE LOS ISOTOPOS ESTABLES	19
1.6 DETERMINACION DE LA ZONA DE RECARGA	19

1.6.1 Recta de Craig o Recta meteórica	20
1.6.2 Desviación isotópica (^{18}O , D) vs. Elevación	23
2. PROTOCOLO Y PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE AGUAS LLUVIAS	
LLUVIAS	26
2.1 TIPO DE MUESTRA	26
2.2 NÚMERO Y UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS	27
2.3 EQUIPO DE MUESTREO	27
2.4 MÉTODO EMPLEADO PARA EVITAR LA EVAPORACION	32
2.5 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	41
2.6 PRECAUCIONES EN EL ALMACENAMIENTO Y ENVÍO DE LAS MUESTRAS AL LABORATORIO	42
3. LOCALIZACION DE LA RED DE MUESTREO DE AGUAS LLUVIAS	44
3.1 DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO	44
3.1.1 Cuenca Superior del Río Lebrija	45
3.1.2 Topografía	45
3.1.3 Clima	45
3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LA LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES	47
3.2.1 Aspectos generales	47
3.2.2 Variaciones isotópicas involucradas en la localización	47
3.3 ESTACIONES SELECCIONADAS	48
4. TOMA Y RECOPIACION DE DATOS	61
4.1 DATOS DE CAMPO (Muestreo de precipitación)	61
4.2 DATOS DE ESTUDIOS EXISTENTES EN LA REGION (Bucaramanga)	66
4.2.1 Datos de Precipitación	66
4.2.2 Datos de Aguas Subterráneas	68

4.3 DATOS DISPONIBLES EN COLOMBIA	69
4.3.1 Rectas meteóricas en Colombia	70
4.3.2 Rectas Meteóricas Nacionales	75
4.3.3 Tabla de información general de los estudios isotópicos en Colombia	78
5. ANALISIS DE DATOS	80
5.1 ANALISIS DE LA INFORMACION TOMADA EN CAMPO (Muestreo de Precipitación)	80
5.1.1 Volúmenes de precipitación en la zona de estudio	80
5.1.2 Parámetros Físico-Químicos en la precipitación	82
5.2 RECTA METEORICA LOCAL Y COMPARACIONES CON OTRAS RECTAS EN COLOMBIA	85
5.2.1 Obtención de la recta meteórica local	85
5.2.2 Comparación de la recta meteórica local con las rectas meteóricas en Colombia	92
5.3 IDENTIFICACION DE ZONAS DE RECARGA	100
6. CONCLUSIONES	105
7. RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFIA	108
ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Funcionamiento del Espectrómetro de masas	14
Figura 2. Efecto continental	15
Figura 3. Efecto de latitud	16
Figura 4. Efecto de altitud	17
Figura 5. Línea Meteórica Mundial (LMM)	21
Figura 6. LMM y Línea de Evaporación	22
Figura 7. Desviación D vs. Elevación (Ejemplo)	23
Figura 8. Identificación de la zona de recarga de acuíferos (Ejemplo)	24
Figura 9. Esquema del depósito colector de agua lluvia	28
Figura 10. Esquema del muestreador (Alto Riesgo de Evaporación), sin N.F	36
Figura 11. Esquema del muestreador (Alto Riesgo de Evaporación), con N.F	37
Figura 12. Mapa de Santander y ubicación de la zona de estudio	44
Figura 13. Mapa de la Provincia de Soto	45
Figura 14. Comportamiento Bimodal de la precipitación en la cuenca	46
Figura 15. Localización de las estaciones de muestreo de isótopos estables (D y ^{18}O)	57
Figura 16. Localización de puntos de muestreo de isótopos estables en aguas subterráneas	58
Figura 17. Perfil de las estaciones, siguiendo la ruta Piedecuesta-UIS-IDEAM-S.Antonio-La Galvicia-Tona-La Casita-Esc. Tembladal-Berlín	59
Figura 18. Perfil de las estaciones, siguiendo la ruta Piedecuesta-UIS-A.Palonegro-S.Antonio-La Galvicia-La Mariana-El Picacho-Berlín	60
Figura 19. Variación de la precipitación durante el período de muestreo	82
Figura 20. Variación mensual del pH	82
Figura 21. Variación mensual del Potencial Redox	83

Figura 22. Variación mensual de la salinidad	84
Figura 23. Variación mensual de la Electroconductividad	84
Figura 24. Recta meteórica preliminar	85
Figura 25. Desviación de ^{18}O vs. Elevación con el total de datos	86
Figura 26. Desviación de ^{18}O vs. Elevación, de los manantiales 1994, 2002-2003	87
Figura 27. Desviación de D vs. Elevación, de manantiales estudio (2002-2003)	88
Figura 28. Desviación de D vs. Elevación, con puntos de precipitación	88
Figura 29. Recta meteórica local	89
Figura 30. Desviación de ^{18}O vs. Elevación, datos LML	91
Figura 31. Desviación de D vs. Elevación, datos LML	91
Figura 32. Rectas meteóricas, local y de la Cordillera Oriental	93
Figura 33. Rectas meteóricas Regionales	94
Figura 34. Recta meteórica nacional, basada en los estudios más recientes (2002-2004)	96
Figura 35. Recta meteórica de la región Caribe	97
Figura 36. Recta meteórica Bogotá, datos estación GNIP	98
Figura 37. Comparación de rectas meteóricas nacionales con base en datos de la recopilación	99
Figura 38. Identificación de zonas de recarga tomando como referencia la desviación de ^{18}O vs. Elevación	101
Figura 39. Identificación de zonas de recarga tomando como referencia la desviación de D vs. Elevación	102

LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Espectrómetro de masas	14
Foto 2. Depósito colector de agua lluvia	28
Foto 3. Embudo colector con filtro	29
Foto 4. Sonda Multiparametros EIJKELKAMP	30
Foto 5. Recipiente de almacenamiento (1 galón)	31
Foto 6. Frasco para el envío de la muestra de precipitación al laboratorio	31
Foto 7. Depósitos colectores con pintura reflexiva a base de aluminio	32
Foto 8. Aceite mineral con color rojo a la grasa	33
Foto 9. Aceite para carro y moto	34
Foto 10. Aceite de cocina	34
Foto 11. Depósito colector enterrado	35
Foto 12. Colector de lluvia principal (muestreador opcional)	38
Foto 13. Colector de lluvia enterrado (muestreador opcional)	38
Foto 14. Tapón hermético	39
Foto 15. Muestreador (Alto Riesgo de evaporación), sin Nivel Freático	40
Foto 16. Muestreador (Alto Riesgo de evaporación), con Nivel Freático	40
Foto 17. Frascos listos para ser enviados al laboratorio	43
Foto 18. Estación Granja Piedecuesta (1000 msnm). IDEAM	50
Foto 19. Estación IDEAM (1025 msnm). B/manga-Avda.Qseca con cra 32	50
Foto 20. Estación Aeropuerto Palonegro (1189 msnm). IDEAM	52
Foto 21. Estación San Antonio (1532 msnm). Federación Nacional de Cafeteros de Colombia	52
Foto 22. Estación Tona (1796 msnm). IDEAM	53

Foto 23. Estación La Galvicia (1848 msnm). IDEAM	53
Foto 24. Estación La Mariana (2481 msnm). Acueducto Metropolitano de Bucaramanga	54
Foto 25. Estación La Casita (2660 msnm). Cuenca Experimental Río Sucio	54
Foto 26. Estación Escuela Tembladal (2869 msnm). Cuenca Exp. Río Sucio	55
Foto 27. Estación Berlín (3306 msnm). IDEAM	55
Foto 28. Estación El Picacho (3435 msnm). IDEAM	56

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición isotópica del agua	7
Tabla 2. Composiciones isotópicas más abundantes del agua	7
Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del aceite mineral	33
Tabla 4. Información general de las estaciones de muestreo de isótopos estables (D y ^{18}O)	49
Tabla 5. Ubicación general de las estaciones de muestreo de isótopos estables (D y ^{18}O)	49
Tabla 6. Fechas de toma de muestras	62
Tabla 7. Muestreo de campo, mes Octubre de 2004	63
Tabla 8. Muestreo de campo, mes Noviembre de 2004	63
Tabla 9. Muestreo de campo, mes Diciembre de 2004	64
Tabla 10. Muestreo de campo, mes Enero de 2005	64
Tabla 11. Muestreo de campo, mes Febrero de 2005	65
Tabla 12. Muestreo de campo, mes Marzo de 2005	65
Tabla 13. Puntos de Muestreo Manantiales (1994)	67
Tabla 14. Puntos de Muestreo Manantiales (2002-2003)	67
Tabla 15. Puntos de Muestreo Precipitación (2002-2003)	68
Tabla 16. Aguas Subterráneas Muestreo (2002-2003)	68
Tabla 17. Aguas Subterráneas Muestreo (2004)	69
Tabla 18. Datos Isotópicos de Precipitación Guajira	70
Tabla 19. Datos Isotópicos de Precipitación Sucre	71
Tabla 20. Datos Isotópicos de Precipitación Risaralda (2002)	72
Tabla 21. Datos Isotópicos de Precipitación Risaralda (1997)	73
Tabla 22. Datos Isotópicos de Precipitación Valle del Cauca	74
Tabla 23. Tabla de inf. gral de los estudios isotópicos en Colombia	78

Tabla 24. Puntos seleccionados para la elaboración de la LML	90
Tabla 25. Puntos de Agua subterránea que se recargan de la zona I (2000-1700) msnm	103
Tabla 26. Puntos de Agua subterránea que se recargan de la zona I (1500-1200) msnm	104

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO	112

RESUMEN

Titulo:

Implementación de una red de muestreadores de isótopos estables en la precipitación para obtener la recta meteórica local.*

Autor (es):

Hernán Alonso Camacho Martínez
Diego Alejandro Guzmán Arias**

Palabras Claves: Isótopos estables, fraccionamiento isotópico, protocolo de muestreo, recta meteórica, zona de recarga.

Descripción:

El presente proyecto se realizó sobre la cuenca superior del río Lebrija (CSRL), ubicada al Nor-Oriente de Colombia en el departamento de Santander. Esta zona se caracteriza por sus elevadas pendientes y por su variabilidad climática.

Se localizó e implementó una red de muestreadores de isótopos estables (D y ^{18}O) en la precipitación, tratando de cubrir las zonas de variación orográfica más importantes de la cuenca, con el fin de realizar un seguimiento a la variación isotópica por efecto orográfico de las aguas lluvias, durante seis meses en once puntos claves de la cuenca; en una segunda fase se seguirán tomando muestras hasta completar un año, tiempo mínimo para obtener una buena caracterización isotópica de la precipitación. Al mismo tiempo se recopiló información a nivel local y nacional sobre investigaciones similares; que sirvió para proponer una recta meteórica local preliminar y una posible zona de recarga para las aguas subterráneas de la meseta de Bucaramanga.

La falta de una normatividad local adecuada sobre la toma, preservación y envío al laboratorio de muestras de precipitación para análisis de isótopos estables (D y ^{18}O), condujo a la elaboración de un protocolo para dicho proceso, en donde los factores ambientales y logísticos propios de la región, jugaron un papel determinante para su consecución. En este protocolo de muestreo se hace énfasis en los métodos para evitar la evaporación, proceso altamente fraccionante e indicador de alteraciones en las muestras.

* Proyecto de Grado.

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

ABSTRACT

Title:

Implementation of a stable isotope sampling network in order to obtain the local meteoric line.*

Authors:

Hernán Alonso Camacho Martínez
Diego Alejandro Guzmán Arias**

Key words: Stable isotopes, isotopic fractioning, sampling protocol, local meteoric line.

Description:

The current project was made about the upper basin of the Lebrija's River located at the northeast of Colombia in the department of Santander, this zone is characterized by steep slopes and weather variability.

A stable isotope sampling network (D and ^{18}O) was set at the precipitation zone trying to cover the most important zones of orografic variation of the basin. In a second phase samples are going to be taken until complete a year, minimum time to get a good characterization of the precipitation.

At the same time local an national information about similar researches was gathered, with this it was possible to propose a local preliminary meteoric line and a possible recharging zone for sub terrain waters of Bucaramanga.

The lacking of a local norm for taking, preserving and mailing to the laboratory the precipitation samples for the stable isotope analysis (D and ^{18}O) leded to the elaboration of a protocol for all this process very fractioning and indicator of alteration in the samples.

* Graduation Project

** Faculty of Physical – mechanical Engineerings, School of Civil Engineering, Director: Sully Gómez.

INTRODUCCION

Los isótopos estables (^{18}O y ^2H) se utilizan como trazadores de la precipitación, debido a la gran ventaja que ofrecen al ser átomos constitutivos de la propia molécula de agua (H_2O), y no sustancias extrañas adicionadas a ésta, razón por la cual se les conoce con el nombre de trazadores naturales. El conocimiento de la composición isotópica de la precipitación a diferentes alturas, junto con la información isotópica de aguas subterráneas, nos permite establecer las zonas o alturas a las cuales se infiltran las aguas de precipitación y recargan los acuíferos.

Actualmente la información que existe en nuestra región (Bucaramanga), sobre la utilización de los isótopos estables (^{18}O y ^2H) como trazadores naturales es escasa, razón por la cual, en el presente proyecto, se implementa una red de muestreadores de isótopos estables en la precipitación. Con el apoyo de la CDMB e IDEAM, entidades interesadas en el tema, se cubrieron las zonas de variación orográfica más importantes de la cuenca superior del río Lebrija; el objetivo principal es la evaluación de la distribución espacial y temporal (mensual) de los contenidos isotópicos de la precipitación y su dependencia de los parámetros meteorológicos.

Con base en los resultados de estudios realizados con anterioridad por el Grupo de Predicción y modelamiento Hidroclimático (GPH), se propone una red meteorológica local con los puntos de muestreo más confiables y se estiman unas zonas preferenciales de infiltración en la parte alta de la zona de estudio, de donde posiblemente se recargan las aguas subterráneas de la meseta de Bucaramanga.

Mediante la recopilación de algunos estudios isotópicos realizados hasta la fecha en Colombia, disponibles en diferentes publicaciones como tesis de grado, estudios complementarios de informes de investigación y revistas especializadas de ámbito nacional; se comparan las rectas meteóricas de cada región con la primera recta meteórica local propuesta en este trabajo. Igualmente se busca relacionar estas rectas con los fenómenos físicos y climáticos que se conocen en Colombia.

En el primer capítulo se presenta una base teórica acerca de los isótopos estables y su proceso de fraccionamiento, en el segundo capítulo se describe el procedimiento de muestreo de isótopos estables de la precipitación, el tercer capítulo trata sobre la localización de la red de muestreadores basada en la variación isotópica por efecto orográfico, en el cuarto capítulo se hace una recopilación de los siguientes datos: parámetros físico-químicos del muestreo en campo, datos de estudios isotópicos de precipitación y aguas subterráneas realizados a nivel local y datos de algunos estudios isotópicos realizados en Colombia. En el quinto capítulo se hace un análisis de la información recopilada y en los dos últimos capítulos se presentan las conclusiones y recomendaciones.

1. ISOTOPOS ESTABLES EN LA PRECIPITACION Y APLICACIONES EN LA HIDROLOGIA

1.1 CONCEPTOS BASICOS

1.1.1 Estructura del átomo. El átomo es la partícula más pequeña de un elemento y esta constituido por un núcleo rodeado por una o más orbitas de electrones. El núcleo es la parte central del átomo y dentro de éste, se encuentran los protones acompañados de los neutrones; estas dos partículas tienen aproximadamente la misma masa atómica, es decir, una unidad de masa atómica unificada (1 u.m.a)¹.

Los protones son partículas con carga positiva y su masa es 1837 veces mayor a la de los electrones que poseen carga negativa, por lo tanto, la masa del átomo esta concentrada casi exclusivamente en su núcleo. Los neutrones son partículas sin carga eléctrica y su función es la de estabilizar el núcleo.

El número de protones recibe el nombre de número atómico (Z) y con base a él se ordenaron los elementos en la tabla periódica; en un átomo eléctricamente neutro, el número de protones y electrones es el mismo. A los átomos cuyo número atómico excede el número de electrones se les conoce como iones positivos y si ocurre lo contrario serán iones negativos.

La suma del número de protones (Z) y el número de neutrones (N), en el núcleo, es conocida como número másico (A) o número de masa. La notación estándar que se utiliza para representar el núcleo determinado de un elemento cualquiera

¹ La unidad de masa atómica (u.m.a) ha sido definida como 1/12 la masa del átomo de ¹²C.
1 u.m.a = 1.6605655x10⁻²⁷ Kg.

(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 de Z va implícito en el símbolo químico. Por esta razón se utiliza, más frecuentemente, la forma abreviada de representación:



1.1.2 Isótopos. Se da esta denominación a los átomos de un mismo elemento y por tanto, que tienen el mismo número atómico (Z), pero difieren en su número másico o de masa (A). Como el número atómico es equivalente al número de protones en el núcleo, y el número másico es la suma total de protones y neutrones en el núcleo, los isótopos del mismo elemento sólo se diferencian en el número de neutrones que contienen. Por ejemplo, el hidrógeno existe en tres formas isotópicas: la más abundante, ${}^1\text{H}$, cuyo núcleo lo conforma solamente un protón; el deuterio (${}^2\text{H}$ o D), con un protón acompañado de un neutrón y el tritio (${}^3\text{H}$), con un protón y dos neutrones.

La palabra isótopo viene del griego: “isos”, mismo y “topos”, lugar; debido a que ocupan el mismo lugar en la tabla periódica de los elementos, lo cual significa que los isótopos de un mismo elemento tienen la misma configuración electrónica. La

existencia de los isótopos demuestra porque las masas atómicas de la mayoría de los elementos no son números enteros; la masa atómica de un elemento es el promedio de las masas atómicas individuales, o números másicos, de sus isótopos.

1.1.3 Isótopos Estables. Son aquellos átomos cuyos núcleos permanecen en la naturaleza sin alterarse, no se descomponen con el tiempo, o simplemente no se desintegran para dar lugar a otros núcleos emitiendo partículas o radiación electromagnética.

Un elemento químico tiene uno o varios isótopos, de los cuales todos, algunos, o ninguno, pueden ser isótopos estables. No existen reglas precisas que permitan predecir si un núcleo en particular es estable o no; todo lo que hay son observaciones empíricas.

1.1.4 Isótopos estables del Hidrógeno. El Hidrógeno (en griego, “creador de agua”), de símbolo H, es un elemento gaseoso reactivo, insípido, incoloro e inodoro. Su número atómico es 1 y pertenece al grupo 1 (o IA) del sistema periódico.

Consta de dos isótopos estables, el ^1H y el D (deuterio²), con unas abundancias del 99,985 y el 0,015% respectivamente. El ^1H (Protio, hidrógeno común u ordinario) fue descubierto en 1766 por el químico británico Henry Cavendish, cuando demostró que se formaba en la reacción del ácido sulfúrico con los metales; y más tarde descubrió que el hidrógeno era un elemento independiente que se combinaba con el oxígeno para formar agua.

² La notación estándar que se utiliza para representar al deuterio es ^2H , pero generalmente en la literatura se acostumbra a denotarlo con la letra D.

El deuterio se conoce también como hidrógeno pesado, al ser su masa atómica aproximadamente el doble de la del hidrógeno común, aunque ambos tienen las mismas propiedades químicas. Fue descubierto en 1932 por el químico estadounidense Harold Clayton Urey.

1.1.5 Isótopos estables del Oxígeno. El oxígeno, de símbolo O, es un elemento gaseoso ligeramente magnético, incoloro, inodoro e insípido. Es el elemento más abundante en la Tierra. Fue descubierto en 1774 por el químico británico Joseph Priestley e independientemente por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele.

Posee tres isótopos estables, ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O , con abundancias de 99,76; 0,04 y 0,2%, respectivamente. William Francis GIAUQUE (1895-1982), químico estadounidense, descubrió junto con Herrick L. Johnson (1929), los isótopos del oxígeno de masa 17 y 18.

El isótopo de masa 17 no es utilizado en los trabajos de hidrología isotópica debido a que aporta poca información sobre el ciclo hidrológico al encontrarse en una proporción muy baja respecto a los otros dos isótopos estables y por tanto la relación que más se considera es la de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

1.1.6 Composición isotópica del agua. El agua como combinación de hidrógeno y oxígeno se identifica con la fórmula química H_2O . La existencia de varios isótopos estables del hidrógeno y oxígeno hace que se considere cualquier masa de agua como una mezcla de moléculas en las que se encuentran las diferentes especies isotópicas de uno y otro.

La especie molecular más abundante del agua es la que corresponde a la fórmula química $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, en concordancia a la mayor abundancia natural de los isótopos ^1H y ^{16}O . Otras moléculas más pesadas y en menor proporción que incorporan a los

demás isótopos estables se presentan en la Tabla 1. Para nuestro proyecto nos interesamos solamente en los isótopos estables.

Tabla 1. Composición isotópica del agua

Fórmula química	Masa atómica
$^1\text{H}_2^{16}\text{O}$	18
$^1\text{H}_2^{18}\text{O}$	20
$^1\text{HD}^{16}\text{O}$	19
$^1\text{HD}^{18}\text{O}$	21
D_2^{16}O	20
D_2^{18}O	22

Las fórmulas químicas del agua que contienen D y ^{18}O , corresponden a las denominadas aguas pesadas, en contraposición a la molécula más abundante que corresponde al agua ligera.

Tabla 2. Composiciones isotópicas más abundantes del agua

Molécula	Abundancia %
$^1\text{H}_2^{16}\text{O}$	99.768
$^1\text{HD}^{16}\text{O}$	0.032
$^1\text{H}_2^{18}\text{O}$	0.2

1.2 LOS ISOTOPOS EN CICLO HIDROLOGICO

En cada etapa del ciclo hidrológico, se registra un pequeño cambio consistente en una diferencia en la concentración de isótopos estables de hidrógeno y oxígeno en el agua, que es tan singular como una huella dactilar.

El océano, que contiene más del 97% del agua en la corteza terrestre, presenta un contenido en isótopos estables bastante uniforme³. Sus aguas superficiales están ligeramente enriquecidas en isótopos estables pesados (¹⁸O y D), como consecuencia de la evaporación, proceso mediante el cual se forma el vapor de agua atmosférico, el cual por obra de los vientos circula y se desplaza hacia las capas superiores de la atmósfera en donde a temperaturas más bajas se condensa formando en una primera instancia las nubes y posteriormente debido a la fuerza de la gravedad la precipitación.

En la precipitación, las nubes a medida que se alejan de la costa o de la fuente de producción de vapor se van empobreciendo en isótopos estables pesados, los cuales condensan preferentemente en razón a su mayor masa. Del total de agua precipitada, una parte circula en la superficie como escorrentía y se concentra en pequeños cursos de agua, que luego se reúnen en arroyos y más tarde desembocan en los ríos; otra se evapora directamente desde la superficie de los suelos con alto contenido de agua, o es transpirada por la vegetación que la intercepta. El agua restante se infiltra en el suelo hasta alcanzar la zona saturada, formando parte del agua subterránea, la cual puede retornar a la atmósfera por evapotranspiración cuando la capa freática está muy próxima a la superficie del terreno.

Las aguas superficiales como ríos o arroyos reflejan con buena aproximación la composición isotópica del promedio de la precipitación, cuando ésta es la fuente principal del caudal; ya que en la mayoría de los casos el proceso de evaporación tiene una influencia insignificante en la composición isotópica de esta agua.

La concentración de ¹⁸O y D en el agua que recarga a un acuífero depende de su historia, desde que escapa del océano hasta que queda aislada de la influencia

³ El océano representa el punto de partida y de llegada en el ciclo hidrológico. Por esta razón su composición isotópica media ha sido tomada como referencia para expresar las concentraciones del ¹⁸O y D en los compuestos naturales.

del medio exterior, por haberse infiltrado en el subsuelo. El agua infiltrada no está expuesta a cambios de estado y, por ello, su concentración de ^{18}O y D no se modifica con el tiempo, salvo casos excepcionales o como consecuencia del mezclado de aguas con distintas concentraciones.

Tanto el flujo de aguas superficiales, como el de aguas subterráneas, van a descargar directamente en el mar, u otras grandes superficies de agua, cerrándose así el ciclo hidrológico.

1.3 FRACCIONAMIENTO DE LOS ISOTOPOS ESTABLES.

1.3.1 Fraccionamiento isotópico. El fraccionamiento isotópico esta definido, como el fenómeno a través del cual, la composición isotópica de un determinado compuesto (agua) cambia por medio de la transición de un estado a otro, dejando en evidencia pequeñas diferencias (Físicas y Químicas) en la composición molecular del agua, expresadas en términos de enriquecimiento o empobrecimiento isotópico con respecto a la molécula mas abundante de la sustancia.

Estas diferencias en las propiedades tanto físicas como químicas de las moléculas que contienen a los isótopos, están relacionadas con la heterogeneidad entre las masas de los núcleos atómicos que las conforman, generando así dos fenómenos que explican las causas del fraccionamiento isotópico:

- a- Las moléculas del agua contienen átomos de ^1H , D y tritio para el caso del Hidrogeno y ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O para el Oxigeno. Estos átomos se encuentran en constante movimiento, por lo tanto presentan una velocidad dentro de la molécula de agua, dicha velocidad es generadora de una energía cinética molecular cuantificable mediante la expresión:

$$K \cdot T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Donde (K = constante de Boltzmann, T = temperatura absoluta, m = masa molecular conocida, v = velocidad molecular media). Por lo tanto si tenemos en cuenta el contenido isotópico de las moléculas con una masa mayor, estas han de tener una velocidad menor. Algunas consecuencias de esto son:

- Las moléculas más pesadas tienen una velocidad de difusión menor.
- La frecuencia de colisiones 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 reglas que da razón de por qué las moléculas ligeras reaccionan más rápidamente.

b- Usualmente las moléculas pesadas tienen energías de enlace mayores que las moléculas más livianas; esta energía proviene del movimiento relativo respecto a los otros átomos en la sustancia; la energía interna de una molécula en un sólido o en un líquido se relaciona con la frecuencia vibratoria de los enlaces entre el átomo y las fuerzas de enlace adyacentes (a menor movimiento mayor energía de enlace y viceversa). La frecuencia y velocidad de vibración de una partícula son inversamente proporcionales a su masa, por lo tanto si se comparan dos moléculas iguales, una con el isótopo ligero y otra con el isótopo pesado, la que tiene el isótopo ligero es la de mayor velocidad y frecuencia vibratoria que la partícula pesada. Otro factor que altera el comportamiento molecular, es la temperatura; debido a que, mientras mayor sea la temperatura de la sustancia, mayor será la energía de los átomos que la conforman. Como ejemplo de este fenómeno tenemos:

- La presión de vapor determina la velocidad de evaporación o de condensación del agua. Por tanto, las moléculas ligeras ($^1\text{H}_2^{16}\text{O}$), que tienen mayor presión de vapor y enlaces más débiles que se rompen muy fácilmente, evaporan más deprisa y condensan más lentamente que las moléculas pesadas.
- En las reacciones químicas las especies isotópicas ligeras reaccionan más rápidamente que las pesadas.

En la actualidad se conocen tres tipos de fraccionamientos⁴ que están relacionados con los procesos anteriormente mencionados:

- Fraccionamiento isotópico de equilibrio
- Fraccionamiento isotópico cinético
- Fraccionamiento isotópico de transporte

En resumen, la magnitud del fraccionamiento isotópico depende de una serie de factores “internos” relativos al propio átomo (masa) o a la molécula o fase en la que va a entrar (energía vibratoria, valencia, tipo de enlace, etc.). Los otros factores que controlan el fraccionamiento son los “externos”, como la Temperatura (que tiene un papel fundamental) y la Presión.

1.3.2 Expresión del grado de fraccionamiento isotópico. Como es sabido, el hidrógeno natural está formado por la mezcla de sus isótopos ^1H y D (deuterio) y el oxígeno por ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O haciendo del ^1H y ^{16}O los componentes mayoritarios del agua. Y, como existen además de esta especie molecular, otras más pesadas que incorporan un átomo de D, con otro de ^{17}O o ^{18}O u otras combinaciones de estos isótopos; es necesario para su estudio, conocer en que cantidad se

⁴ PUBLICACIONES DEL INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico: Principios y Aplicaciones. 1 ed. Madrid: Editores W.G. Mook, 2002. p.35-44. ISBN-84-7840-465-1.

encuentran estos átomos en la molécula de agua, para lo cual se realiza una relación del isótopo mas pesado (menos abundante), sobre el menos pesado (más abundante), a la cual se denomina relación isotópica **R** y viene definida por la expresión:

$$R = \frac{\text{Abundancia isotópica en defecto (D o } ^{18}\text{O)}}{\text{Abundancia isotópica en exceso (} ^1\text{H o } ^{16}\text{O)}}.$$

La relación isotópica del agua en la hidrosfera es variable, porque depende de la evolución experimentada por las moléculas con anterioridad, desde que escaparon del océano hasta su llegada al lugar de muestreo. Su medida se realiza por medio de espectrómetros de masas. Para poder expresar de forma homogénea las variaciones de dicha relación isotópica, fue preciso definir una muestra de agua patrón que sirviera de referencia para los distintos laboratorios ocupados en estas mediciones. Surgió así el llamado “patrón medio de agua del mar” conocido con las siglas SMOW (Standard Mean Ocean Water), que fue preparado, originalmente, por H. Graig a partir de muestras de diferentes océanos tomadas a profundidades comprendidas entre 500 y 2.000 metros. Las variaciones de la relación isotópica, para el ^{18}O y D con respecto al patrón SMOW se expresan como desviaciones⁵ por medio de la expresión:

$$\delta (\text{‰}) = \frac{R \text{ muestra} - R \text{ smow}}{R \text{ smow}} * 10^3$$

El valor de δ puede ser positivo o negativo, según la muestra tenga mayor o menor relación isotópica que el SMOW. Un δ positivo indica, por tanto, mayor concentración, (enriquecimiento), que el SMOW en el isótopo pesado

⁵ Se utilizan las expresiones: δD , para referirnos a la desviación isotópica del deuterio y $\delta^{18}\text{O}$ para la desviación isotópica del oxígeno-18.

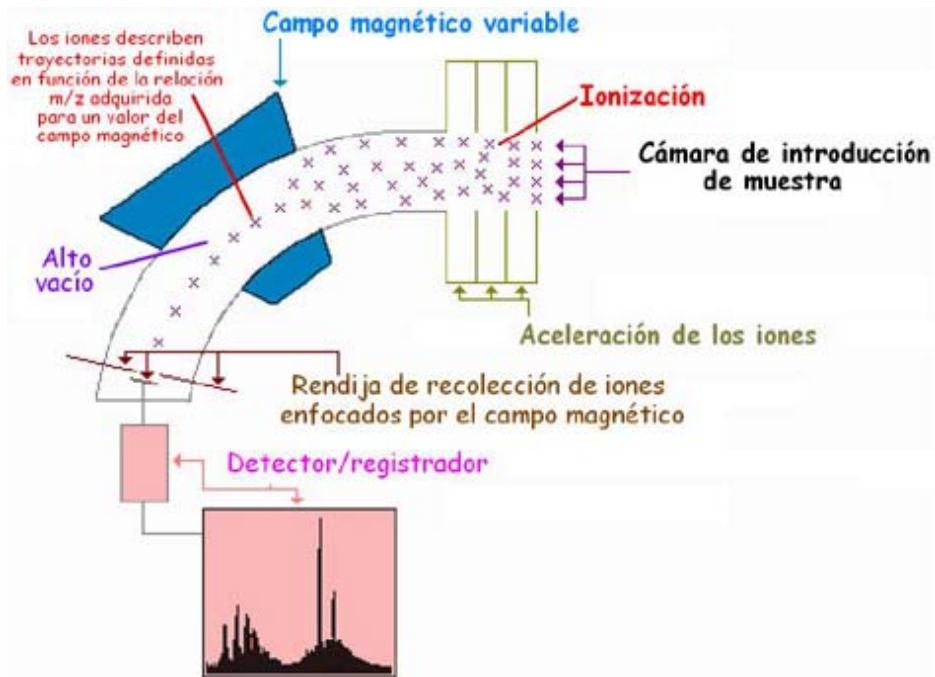
correspondiente (^{18}O o D), este es expresado en partes por mil para facilitar su manejo.

1.3.3 Técnicas de medida. Los análisis isotópicos son realizados por diferentes laboratorios en el mundo, lamentablemente en la actualidad (2005), Colombia no cuenta con laboratorios que posean el personal capacitado ni la tecnología adecuada para llevar a cabo estos análisis, debido a esto las muestras son enviadas al exterior para ser evaluadas, exponiéndolas a alteraciones en su composición.

El equipo que lleva a cabo la medición del contenido isotópico en las muestras de agua se denomina **Espectrómetro de Masas**, este equipo tiene la tecnología para separar átomos o incluso iones con diferente masa y medir sus abundancias relativas. El principio básico del espectrómetro de masas es el de acelerar las partículas mediante una diferencia de potencial, la cual las arrastra hacia un campo magnético en una zona de vacío, generando en las partículas a partir de este momento una trayectoria que describe un movimiento circular o espiral (Fuerzas de Lorentz); como la muestra esta compuesta por gran variedad de átomos (isótopos), la diferencia de masa entre ellos se ve reflejada en los radios de las circunferencias descritas por cada ión (Aceleración Centrifuga), es decir los iones con mayor masa describirán círculos mas grandes mientras que los de menor masa serán menores; así los diferentes iones son desviados según su peso, donde se separan y se clasifican en colectores, en estos colectores los iones pierden su carga eléctrica, causando así pequeñas corrientes cuantificables.

En la Figura 1 y Foto 1 se aprecian un diagrama del funcionamiento del Espectrómetro de masas y el Espectrómetro de masas en la realidad, respectivamente.

Figura 1. Funcionamiento del Espectrómetro de masas



Extraída de www.uam.es

Foto 1. Espectrómetro de masas



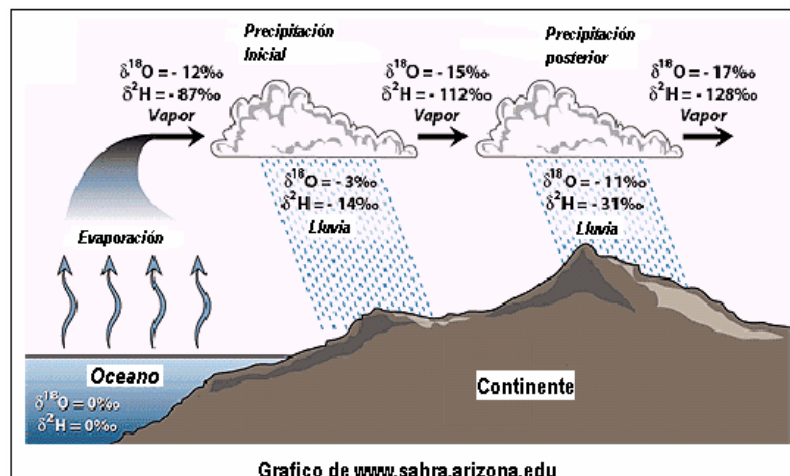
Extraída de www.es.wikipedia.org

1.4 VARIACIONES ISOTÓPICAS EN LA PRECIPITACIÓN

Las variaciones de la composición isotópica de la precipitación en el mundo obedecen a distintos factores; causados por la heterogeneidad climática, topográfica y pluviométrica, así como por el distanciamiento oceánico, latitudinal y demás. Por esto es necesario realizar estudios a nivel local para determinar estos cambios que afectan la composición isotópica de un lugar a otro y sobre todo en un país de gran diversidad climática como el nuestro. Según los estudios y observaciones de los investigadores se pueden explicar así:

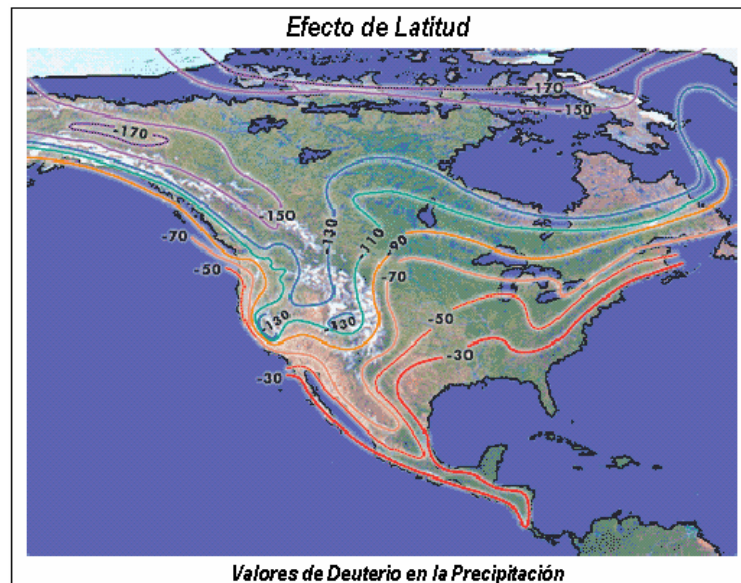
1.4.1 Variación debido al efecto continental. También es conocido como efecto de distancia a la costa; este fenómeno pone en evidencia un empobrecimiento progresivo del D y del ^{18}O en la precipitación a medida en que se aumenta la distancia de una zona continental respecto al océano. Este efecto varía considerablemente de un lugar a otro y de estación en estación si estas existen, aunque se trate de un terreno con poco relieve y relativamente cercano a las costas. También se encuentra relacionado con el gradiente de temperatura y depende tanto de la topografía como del régimen climático de la zona.

Figura 2. Efecto continental



1.4.2 Variación debido al efecto de latitud. En este fenómeno se ven involucrados los procesos de evaporación – condensación, ya que la formación del vapor atmosférico (agua de mar) mediante la evaporación en las regiones que poseen las temperaturas oceánicas superficiales más elevadas (El Ecuador), produce que se desprendan una mayor cantidad de isótopos pesados, caracterizando así la precipitación en estas zonas con desviaciones enriquecidas de D y ^{18}O ; mientras que la condensación progresiva del vapor durante el transporte hacia latitudes más altas con temperaturas inferiores (Los Polos), va empobreciendo las precipitaciones a medida que avanza; además las aguas evaporadas en estas latitudes no reciben la suficiente temperatura para desprender la misma cantidad de isótopos pesados. El efecto de latitud es del orden de $\Delta\delta^{18}\text{O} = -0.6\text{‰}$ por grado de latitud, según los valores observados en la red de estudios mundial GNIP⁶. A medida que el agua evaporada se acerca a los polos, los valores de las concertaciones isotópicas se van empobreciendo, este fenómeno esta ligado estrechamente con la temperatura.

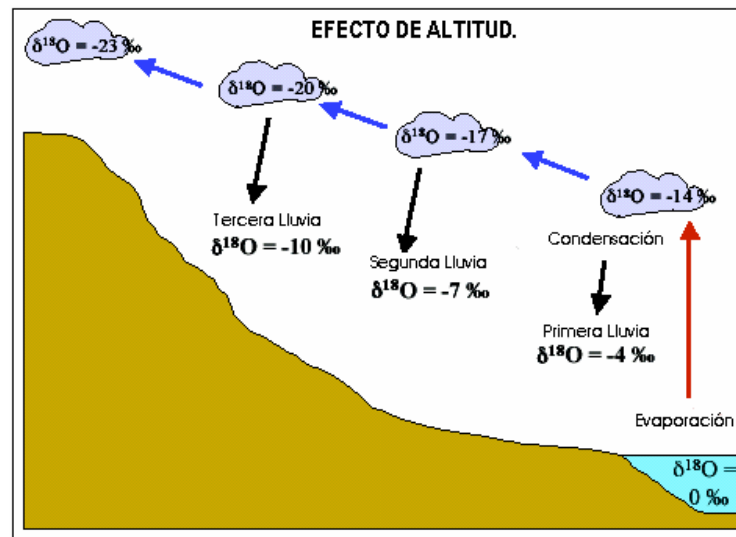
Figura 3. Efecto de latitud



⁶ PUBLICACIONES DEL INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA, Op.cit. p, 203.

1.4.3 Variación debido al efecto de altitud u orográfico. La composición isotópica cambia con la altitud del terreno. A mayor altitud mayor empobrecimiento del ^{18}O y D debido a que los frentes nubosos al ir avanzando se encuentran con las montañas como obstáculo, generando una primera condensación, en donde se observan valores isotópicos relativamente enriquecidos, empobreciendo así las condensaciones posteriores del frente nuboso. Esta es la relación mas útil en hidrológica isotópica, ya que sirve en la identificación de la elevación a la cual se produce la recarga. Este efecto depende de la temperatura y la presión, ya que la condensación se produce a partir de la disminución de los anteriores con el aumento en la altitud.

Figura 4. Efecto de altitud



El efecto de variación isotópica de la $\delta^{18}\text{O}$ con respecto a la elevación, observado por Vogel en 1975 arrojó un rango que generalmente está entre -0.1‰ y -0.6‰ por cada 100 metros de altitud, el cual decrece con el aumento de la latitud; mientras

Moser en 1978 publicó datos sobre el efecto de la altitud en la δD , en los que mostraba valores de -1‰ y -4‰ por cada 100 metros⁷.

1.4.4 Variación debido al efecto de cantidad. Dansgaard (1964)⁸ descubrió que existe una relación entre la cantidad de precipitación y la $\delta^{18}O$. Por ejemplo, las muy intensas lluvias tropicales al paso por la zona de convergencia intertropical, caracterizadas por nubes muy altas y fuertes aguaceros, pueden estar muy empobrecidas en $\delta^{18}O$ y en δD , se observan efectos similares pero menores en las lluvias generadas por tormentas; por otro lado, los pequeños volúmenes de lluvia que se producen especialmente en las regiones más áridas, se enriquecen en isótopos pesados a lo largo de las líneas de evaporación típicas, este efecto se obtiene lógicamente en la evaporación de las gotas de lluvia en su camino hacia la superficie del suelo. La conclusión es que se deben evitar las generalizaciones y explorar los efectos totales locales individuales para cada caso mediante programas especializados de muestreo.

1.4.5 Variación debido a efectos estacionales. La variación estacional está ligada al efecto de la temperatura y a la localización de las regiones de estudio, ya que en las estaciones cálidas las temperaturas son elevadas. En los meses templados y secos los procesos de fraccionamiento enriquecen las aguas con $\delta^{18}O$ y δD , todo lo contrario ocurre en las estaciones frías en donde los valores negativamente grandes de la $\delta^{18}O$ y δD están asociados con la nieve y el granizo (Jouzel y Merlvat, 1984), estos eventos están relacionados con valores isotópicos muy empobrecidos.

⁷ BAUNZA DEL PRADO, E; PLATA, A. y SILGADO, A. Hidrología Isotópica de las Aguas Subterráneas del Parque Nacional de Doña Ana y Zona de Influencia. 1984. Capítulo 8.

⁸ PUBLICACIONES DEL INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA, Op.cit. p, 210.

1.4.6 Variación debido al efecto de temperatura. El fenómeno de la variación por temperatura, está asociado a la mayoría de los efectos antes mencionados; debido a que los procesos que generan la variación isotópica, dependen de la fluctuación térmica del medio en el cual se llevan a cabo. En la atmósfera se pueden observar los cambios que generan la variabilidad térmica como por ejemplo, un ascenso o descenso en altitud, un cambio de estación, la exposición al sol debido a la latitud o algún evento lluvioso que genere un descenso en la temperatura, etc.

1.5 APLICACIONES GENERALES DE LOS ISOTOPOS ESTABLES

La información del contenido isotópico del D y ^{18}O combinado con métodos físico-químicos convencionales, geoquímica e hidrogeología proporciona antecedentes sobre la trayectoria del agua en diferentes partes del ciclo hidrológico que permiten la determinación de áreas de recarga, altura de la recarga, origen de las aguas que aportan a una cuenca, identificación y estudio del origen de la salinización de las aguas subterráneas, evapotranspiración en la zona no saturada, caracterización de aguas lluvias en estudios relacionados con la variación estacional y el efecto de la cantidad de precipitación y el balance hídrico de reservorios superficiales como lagos, diques y embalses.

Las técnicas isotópicas son herramientas complementarias en las investigaciones y estudios relacionados con el recurso hídrico y el tipo de información que entregan depende ampliamente del conocimiento hidrogeológico que se posea del área en estudio.

1.6 DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE RECARGA

La determinación de la zona de recarga es una parte fundamental en un estudio hidrológico regional, ya que esta nos permite establecer un área determinada por donde el agua se infiltra y posteriormente recarga los acuíferos para luego ser

explotados por el hombre en forma controlada. Debido a esto debemos saber con precisión la localización de estas zonas para poder conservarlas y complementar la información de los sistemas hidrológicos locales. GAT y TZUR (1967)⁹ demostraron que la composición isotópica del agua subterránea en climas templados refleja con buena aproximación la composición isotópica del promedio de la precipitación de una localidad.

1.6.1 Recta de Craig o Recta Meteórica. Se denomina Recta de Craig o Meteórica a la correlación lineal obtenida entre la desviación isotópica del ¹⁸O vs. la desviación isotópica del D. Craig (1961), encontró una relación entre los valores δD y $\delta^{18}O$ de la precipitación para diferentes partes del mundo:

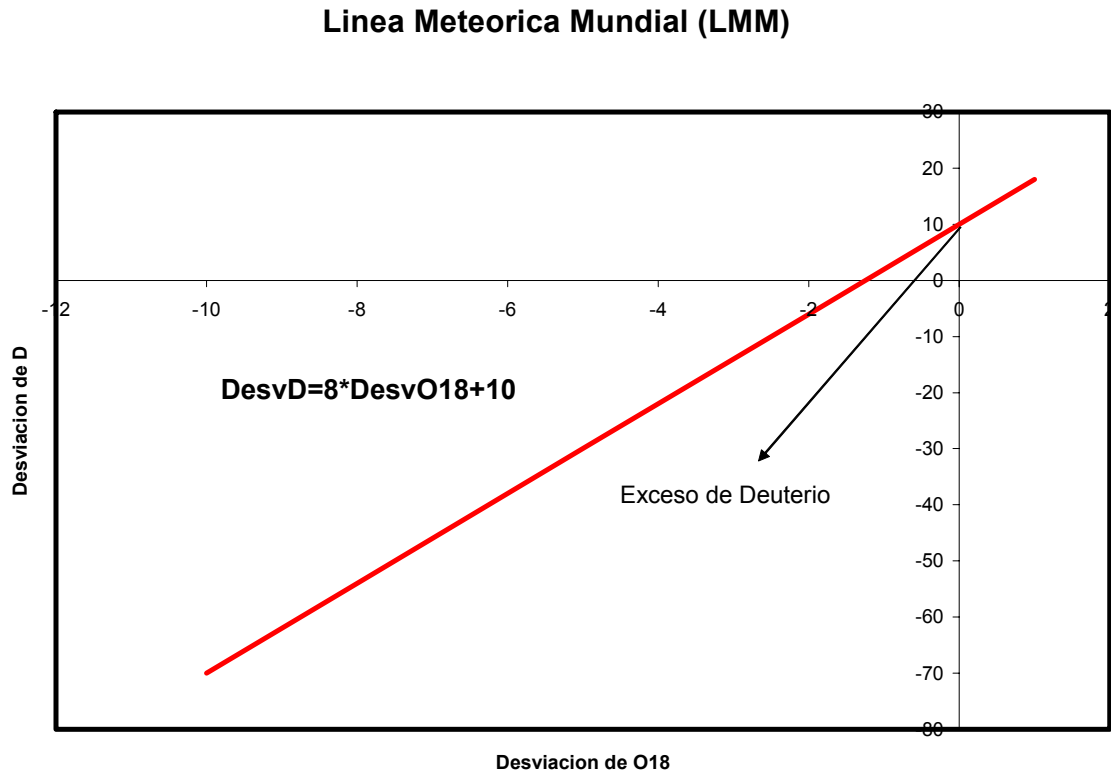
$$\delta D = a * \delta^{18}O + b$$

En la Figura 5 se presenta esta relación, conocida con el nombre de Recta o Línea Meteórica Mundial (LMM) y se caracteriza por tener una pendiente de **a** igual a 8 e interceptar al eje de δD con un valor **b** igual a 10 (también conocido como el exceso de Deuterio¹⁰). Los valores de **a** y **b** pueden variar de acuerdo a cada región y a la procedencia del vapor atmosférico pero siempre conservando la tendencia lineal en la ecuación.

⁹ DAPEÑA, C. PANARELLO, H. Composición isotópica de la Lluvia de Buenos Aires: Su Importancia para el Estudio de los Sistemas Hidrológicos Pampeanos. En: Revista Latino – Americana de Hidrogeología. Numero 4 (2004); p. 17-25.

¹⁰ El exceso de Deuterio es el intercepto de la recta meteórica con el eje Y o de δD , y es función principalmente de la humedad relativa de la atmósfera por encima de la superficie de agua oceánica.

Figura 5. Línea Meteórica Mundial (LMM)



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

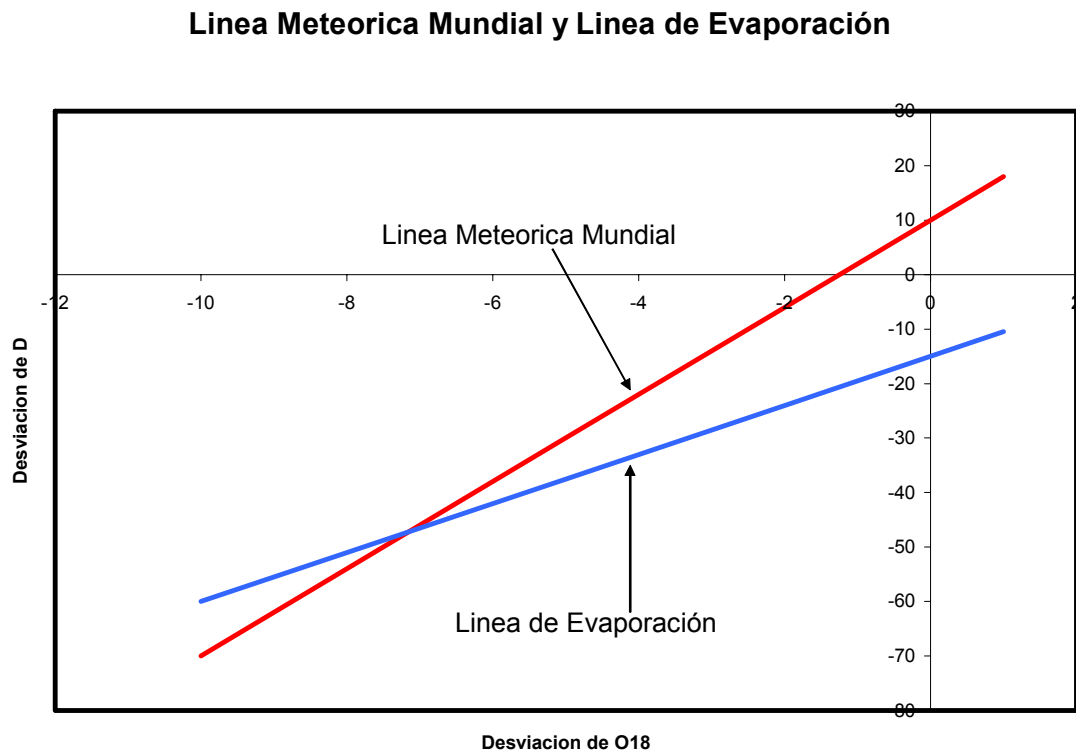
$$\delta\text{D}=8*\delta^{18}\text{O} ; \text{ no existe exceso de Deuterio}$$

Sin embargo, el proceso de evaporación del agua en el océano no tiene lugar en condiciones de equilibrio debido al déficit de humedad en la atmósfera con respecto al valor de saturación; contrario a la condensación, la cual ocurre en la naturaleza en condiciones muy próximas a la del equilibrio. Por lo tanto, una vez formada la nube, el valor de la pendiente igual a 8, se mantiene constante y la

mayor parte de las precipitaciones se sitúan alrededor de la línea meteórica mundial, $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$.

La variación en las desviaciones de D y ^{18}O producidas por el fraccionamiento isotópico, da lugar a efectos observables en las componentes **a** y **b** que caracterizan a la recta meteórica, estas variaciones se presentan para el coeficiente **a** como un aumento o disminución en la pendiente y para **b** en un distinto punto de corte con el eje de δD , (Y); estos cambios permiten caracterizar y comparar las aguas con respecto a su procedencia, o verificar si una muestra se ha evaporado al construir la denominada Línea de Evaporación (Figura 6), la cual se obtiene de los datos (δD , $\delta^{18}O$) de masas de agua como lagos, embalses u otras expuestas a constante evaporación. Esta se caracteriza por tener una pendiente entre 4 y 6, con un exceso de deuterio negativo.

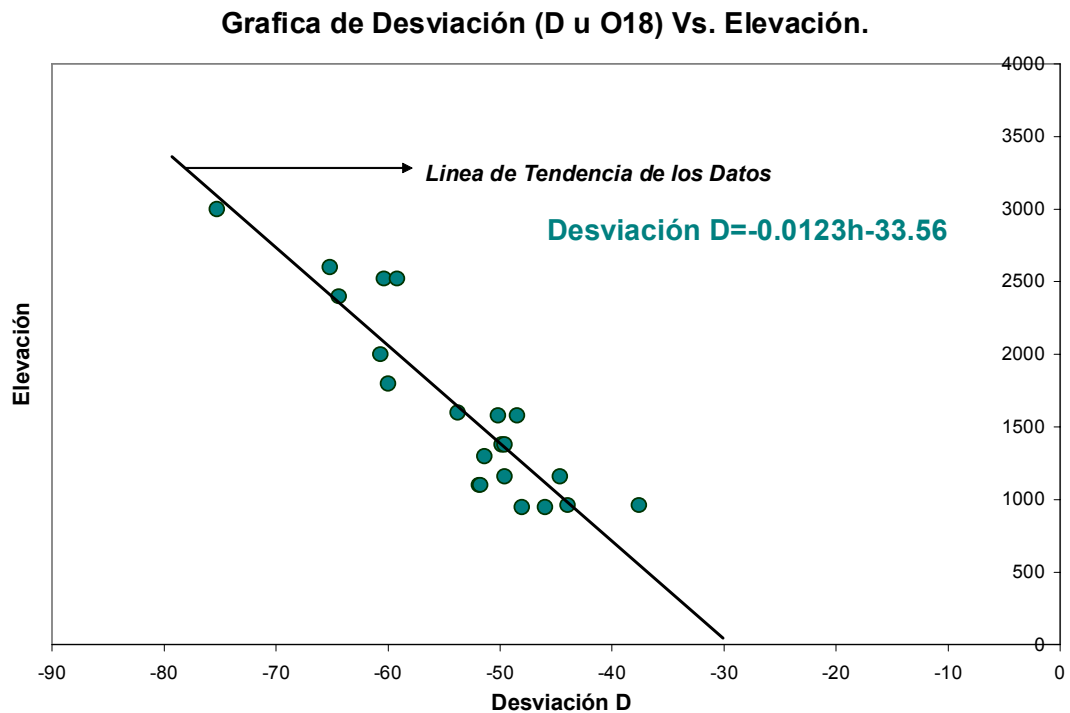
Figura 6. LMM y Línea de Evaporación



1.6.2 Desviación isotópica (^{18}O , D) vs. Elevación. La utilización de la correlación lineal entre las desviaciones de D u ^{18}O vs. Elevación, permite determinar la zona de recarga, identificando así la altura a la cual se infiltra el agua para abastecer el acuífero en estudio, ya que las variaciones isotópicas del agua en los átomos de D y ^{18}O son mínimas desde el momento en que esta se infiltra en el suelo y alcanza la zona saturada hasta que sale de el.

La pendiente de la grafica obtenida por la correlación lineal entre la elevación y la variación de las desviaciones de D u ^{18}O de la precipitación, es conocida como el gradiente orográfico, el cual nos indica el cambio en la concentración isotópica a medida que aumenta o disminuye la elevación. El gradiente orográfico se expresa como $\delta\text{‰}/100\text{m}$ (la variación de la desviación isotópica por cada 100 metros de diferencia en elevación) y varía de una región a otra.

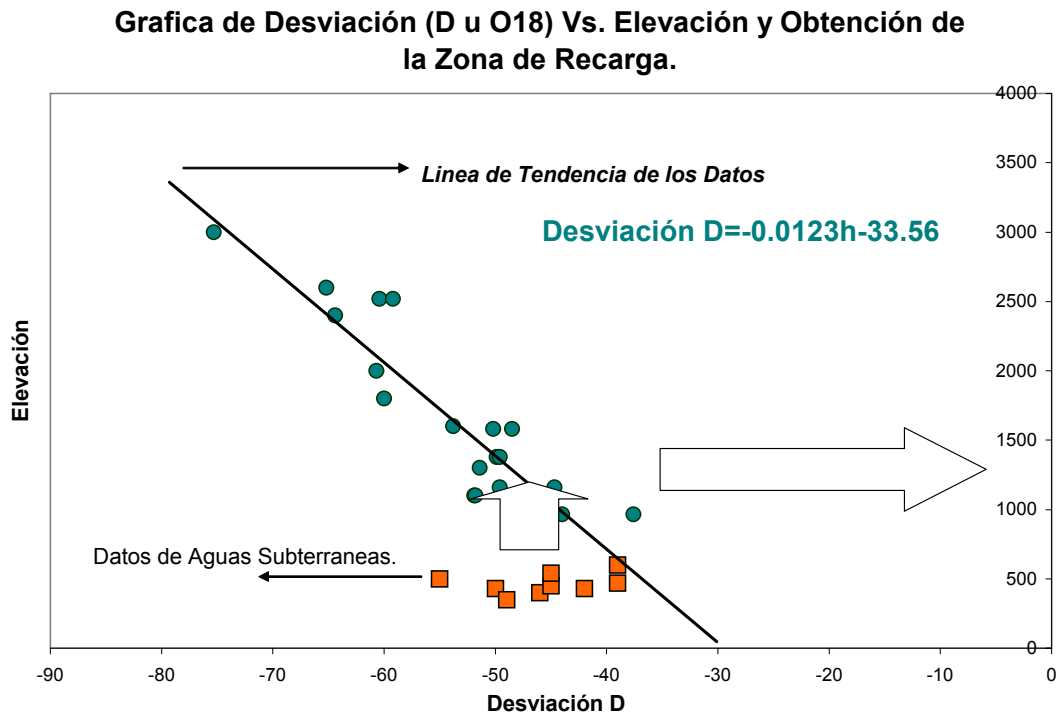
Figura 7. Desviación D vs. Elevación (Ejemplo)



En el ejemplo de la Figura 7, el valor del gradiente orográfico para el Deuterio es de $-1.23\text{‰}/100\text{ m}$.

Para poder llevar a cabo este procedimiento es necesario obtener los valores de las desviaciones de D u ^{18}O del agua subterránea (piezómetros, pozos y drenes) que se presume se recargan en alguna zona de la cuenca a la cual pertenecen. Esta información del agua subterránea se introduce por medio de su desviación (δD o $\delta^{18}\text{O}$) y elevación en la grafica (δD o $\delta^{18}\text{O}$ vs. Elevación) de las aguas lluvias, para así poder determinar un rango de elevación que corresponda a los puntos de desviación localizados sobre la recta. De esta forma se puede obtener la altura de recarga de los acuíferos, que de no ser por el rastro que el ciclo hidrológico deja sobre la composición isotópica del agua, este proceso sería más dispendioso y menos preciso.

Figura 8. Identificación de la zona de recarga de acuíferos (Ejemplo)



En el ejemplo de la Figura 8, la zona de recarga se encuentra entre las cotas 1200 a 1500 metros de altura aproximadamente.

2. PROTOCOLO Y PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE AGUAS LLUVIAS

El muestreo de la precipitación para análisis de isótopos estables, juega un papel determinante en los estudios de hidrología isotópica, debido a que estos dependen de la calidad con que éste se realice, además del cuidado en el almacenamiento y envío al laboratorio de las muestras.

En zonas tropicales como la nuestra, es necesario tener precauciones adicionales en los muestreos debido a la variabilidad climática, especialmente en los meses de intenso verano, en los cuales se puede presentar fraccionamiento por evaporación sobre el agua recolectada.

La implementación de un protocolo especial es consecuencia de las limitaciones técnicas y económicas. Una de las principales limitaciones técnicas y económicas es la falta de un laboratorio de análisis isotópicos a nivel nacional, lo que evitaría la demora en la obtención de los resultados y los altos costos de envío.

2.1 TIPO DE MUESTRA

El tipo de muestra depende de los procedimientos analíticos a efectuarse y de los objetivos del estudio; el fin del muestreo es recolectar muestras puntuales durante un periodo de tiempo (un mes), en un mismo lugar (estación). A esta combinación de muestras se le denomina **Muestra Compuesta**¹¹.

Las muestras compuestas se emplean para observar concentraciones promedio de las desviaciones isotópicas mensuales durante un año, lo cual representa un

¹¹ COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Temas ambientales: Toma y preservación de muestras. p. 2-3.

ahorro sustancial en costo y esfuerzo, tanto de los investigadores como de los laboratorios, comparativamente con el análisis por separado de un gran número de muestras y su consecuente cálculo de promedios.

2.2 NÚMERO Y UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para conocer el contenido isotópico de la lluvia y su variación estacional, es necesario como mínimo caracterizar isotópicamente la precipitación durante un año, mediante la recolección de muestras compuestas que representen la precipitación a la escala mensual, agrupando un total de doce muestras por cada sitio de muestreo seleccionado.

La ubicación y el número de sitios de muestreo, dependen de los factores climatológicos y geomorfológicos que inciden sobre las variaciones isotópicas de la lluvia en la zona de estudio. Debido a las grandes diferencias de elevación que presentan nuestras cordilleras, los estudios se hacen mas complejos, necesitándose una cantidad suficiente de sitios de muestreo que permitan una buena observación de los cambios en la composición isotópica de la lluvia por el efecto orográfico.

2.3 EQUIPO DE MUESTREO

- Para la toma de muestras se utiliza un deposito colector de lluvia¹² propuesto en este trabajo (ver Figura 9; Fotos 2 y 3), que tiene por función almacenar el agua de precipitación durante un periodo de tiempo (un mes) y evitar cualquier proceso de cambio de fase (evaporación y condensación).

¹² Cuando mencionamos el término muestreador, nos referimos al depósito colector de lluvia.

Figura 9. Esquema del depósito colector de agua lluvia

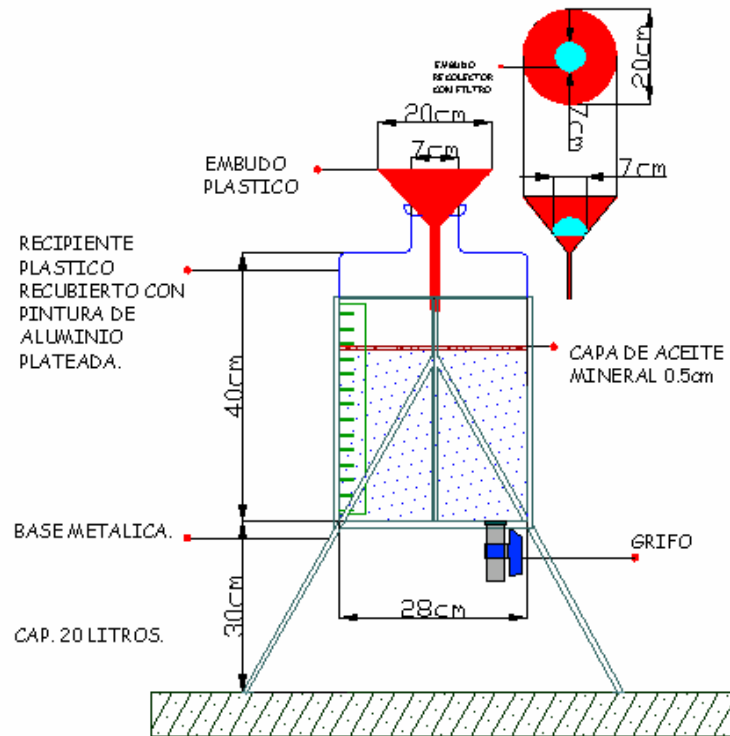
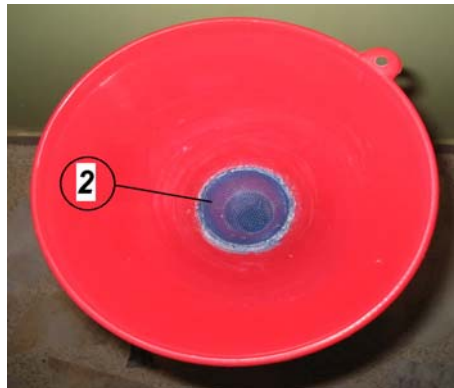


Foto 2. Depósito colector de agua lluvia



Foto 3. Embudo colector con filtro



El depósito colector de agua lluvia esta compuesto por:

1. Embudo colector
 2. Filtro
 3. Recipiente de almacenamiento graduado al Litro
 4. Base metálica de soporte
 5. Llave de paso para extraer el agua
- Es necesario realizar los análisis físico-químicos en campo (Temperatura, pH, Potencial Redox, Conductividad, Salinidad), porque son parámetros requeridos por el laboratorio; para esto se utiliza la Sonda Multiparametros EIJKELKAMP.

Foto 4. Sonda Multiparametros EIJKELKAMP



Otros implementos necesarios son:

- Un galón de agua destilada para lavar los electrodos de la sonda.
- Vasos plásticos de 10 onzas para realizar los análisis físico-químicos del agua lluvia.
- Libreta de campo para anotar las observaciones y escribir los datos de las muestras.

Los recipientes de almacenamiento y los frascos para el envío de las muestras al laboratorio, deben ser preferiblemente en plástico de alta densidad con tapa de seguridad y de cuellos estrechos, de manera que se evite cualquier pérdida por evaporación o difusión en el intercambio del agua con los alrededores; además estos recipientes son sometidos a cambios de presión en el momento del envío hacia los laboratorios. Estos son:

Foto 5. Recipiente de almacenamiento (1 galón)¹³



Foto 6. Frasco para el envío de la muestra de precipitación al laboratorio (50 ml)¹⁴



¹³ Se utiliza para almacenar la totalidad del agua recolectada en campo.

¹⁴ Es de uso exclusivo para el envío de la muestra de precipitación al laboratorio. Para análisis de isótopos estables, (D y ¹⁸O), solamente se necesitan 50 ml de muestra.

2.4 MÉTODO EMPLEADO PARA EVITAR LA EVAPORACIÓN

En zonas tropicales de alta temperatura como la nuestra, es fundamental minimizar el riesgo de evaporación, debido a que es un proceso que modifica la composición isotópica de las muestras; ya que si esto ocurre se alterarían los resultados obtenidos en el laboratorio, careciendo de validez todo análisis que se realice con ellos; por este motivo se han empleado los siguientes métodos:

1. Pintura Reflexiva a base de aluminio que recubre la parte exterior del depósito colector de agua, debido a que el aluminio es un buen reflector tanto de la luz como del calor. Si no se dispone de este tipo de pintura se recomienda cubrir el colector con un color blanco brillante.

Foto 7. Depósitos colectores con pintura reflexiva a base de aluminio



2. Aceite Mineral que con su nula miscibilidad en el agua genera una capa protectora en la superficie de esta (espesor recomendado de 2 cm.), evitando así el contacto directo con la atmósfera. Algunas de sus propiedades se pueden apreciar en la tabla 3 y Foto 8.

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del aceite mineral

Apariencia	Líquido incoloro, inodoro
Composición	Aceite mineral blanco, USP/NF
Densidad a 76.9°F (25°C)	875 kg/m ³ (7.30 lb./gal)
Peso específico (60°F/60°F)	0.882
Punto normal de ebullición	358°C (676°F)
Intervalo óptimo de uso	-20°C hasta 315°C (0-600°F)

Foto 8. Aceite mineral con color rojo a la grasa



El color rojo del aceite se debe a un tinte especial llamado comercialmente como color a la grasa, que permite diferenciar la interfase entre agua-aceite en el colector, para facilitar la medida del volumen en campo.

Después de experimentar el comportamiento de otros aceites con el agua, (aceite de cocina: animal y vegetal, aceite para carro y moto), se observó que los aceites para carro y moto se adherían a las paredes del recipiente, en forma de raíces

asentándose a medida que pasa el tiempo; mientras que el aceite de cocina se tornaba miscible con el agua, como se puede ver en las Fotos 9 y 10.

Foto 9. Aceite para carro y moto



Foto 10. Aceite de cocina



3. En estaciones de muestreo, donde la temperatura ambiente sea muy elevada en periodos de verano, es conveniente enterrar los depósitos colectores para disminuir la evaporación, dejando una altura prudente entre la boca del embudo y la superficie del suelo al menos 30 cm. (Foto 11).

Foto 11. Depósito colector enterrado



Otra opción es desarrollar un muestreador en el que se evite al máximo la radiación solar directa y se pueda almacenar el agua durante un periodo de tiempo, sin que el calentamiento afecte la composición isotópica de esta. (Figura 10 y 11; Fotos 12, 13, 14, 15 y 16).

Figura 10. Esquema del muestreador en zonas de alto riesgo de evaporación y sin presencia de nivel freático.

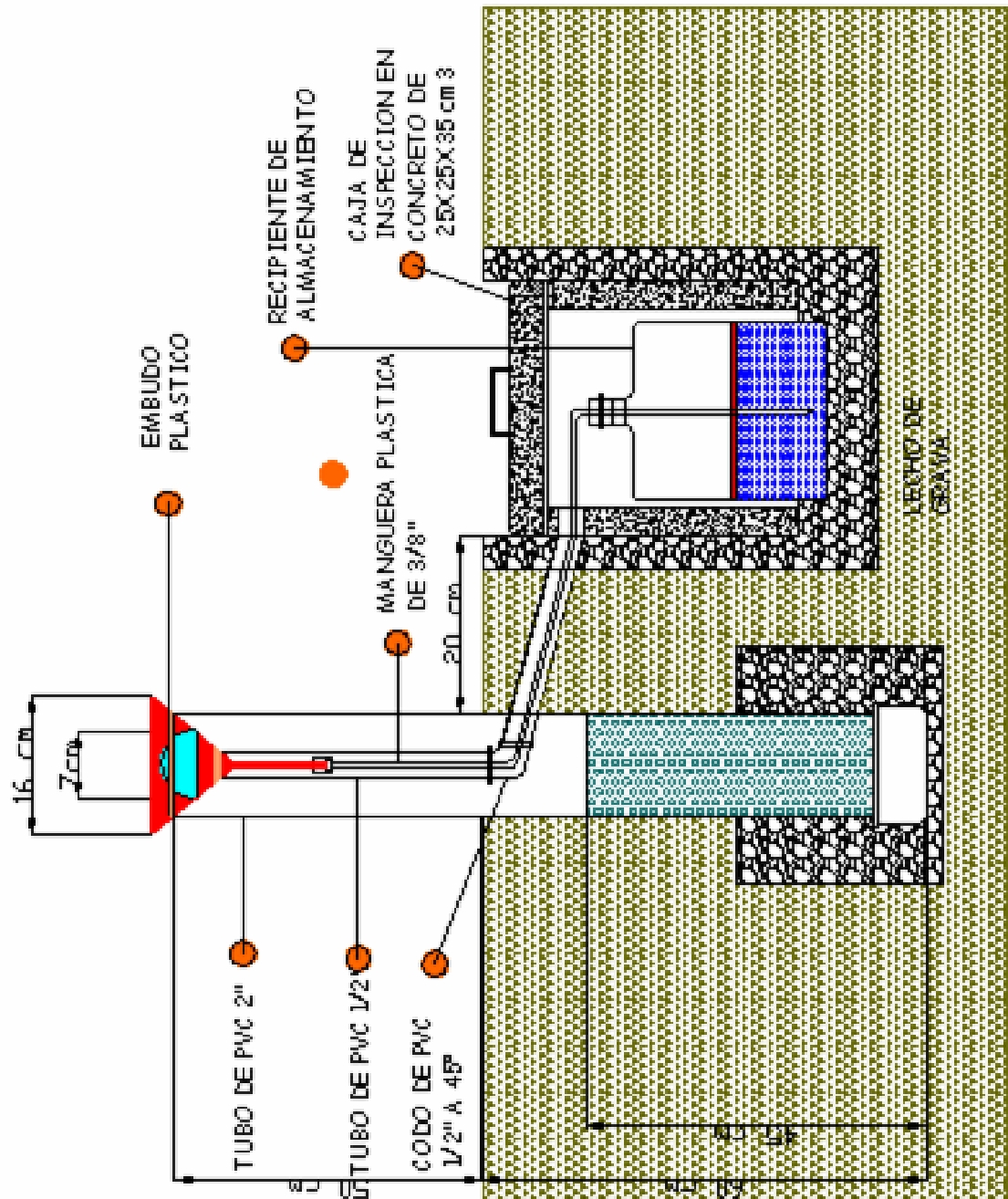


Figura 11. Esquema del muestreador en zonas de alto riesgo de evaporación y con presencia de nivel freático.

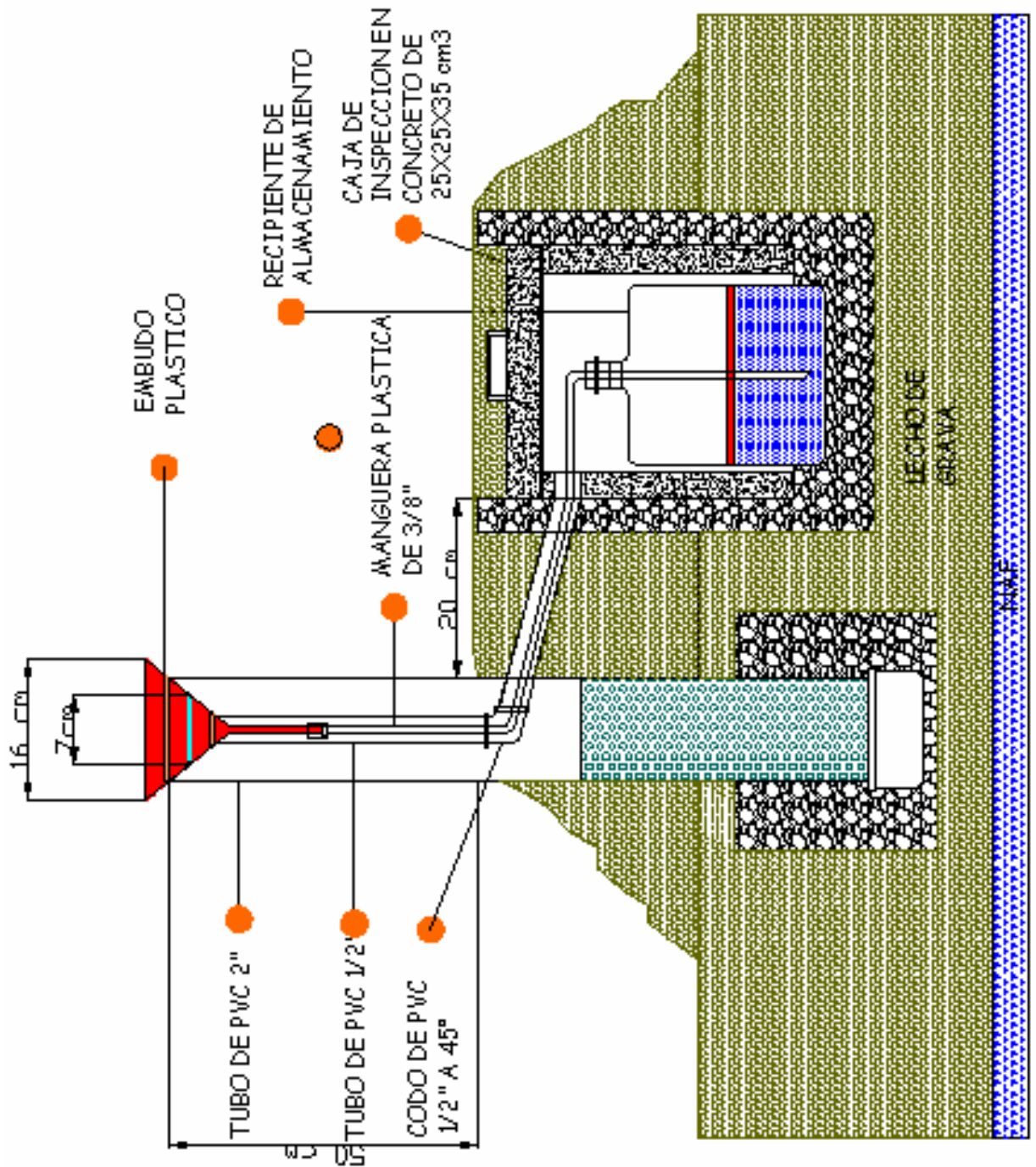


Foto 12. Colector de lluvia principal (muestreador opcional)

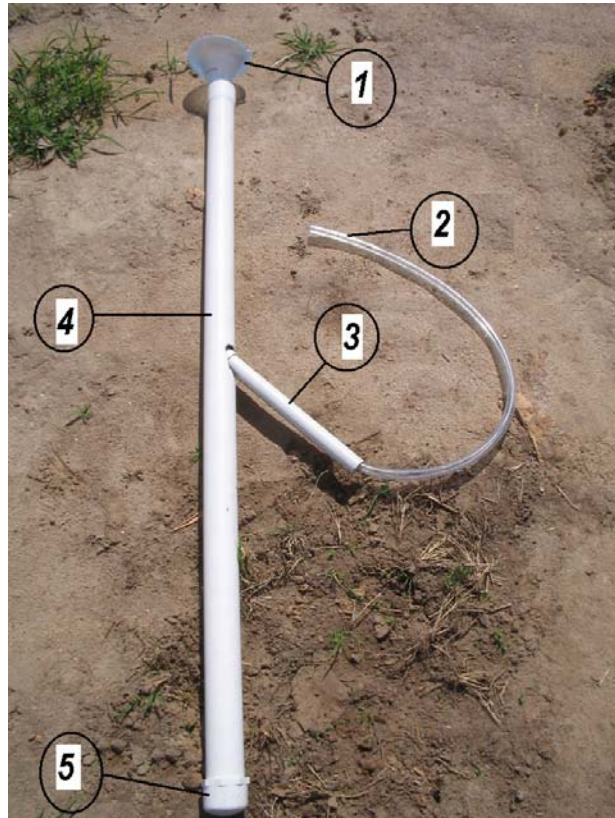


Foto 13. Colector de lluvia enterrado (muestreador opcional)

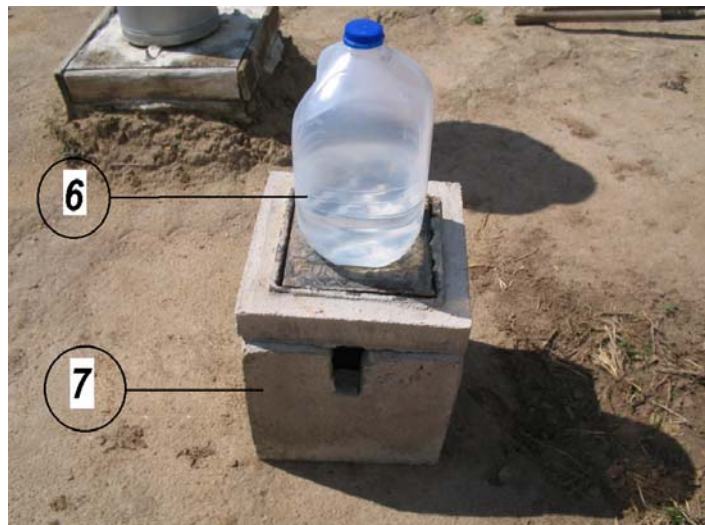


Foto 14. Tapón hermético



Este muestreador consta de:

- 1) Embudo colector con su respectivo filtro.
- 2) Manguera de conducción.
- 3) Bajante tuvo de PVC y codo a 45°.
- 4) Tubo de PVC de soporte y aislante.
- 5) Tapón PVC sello para lastre.
- 6) Recipiente de almacenamiento.
- 7) Caja de Concreto
- 8) Tapón hermético.

El propósito de construir este muestreador fue el de proteger el agua almacenada en los colectores situados en las estaciones que sufren más riesgo de evaporación, es decir, en las que presentan mayor temperatura y en donde no se pueda hacer la recolección directamente sobre el pluviómetro a cargo de una persona capacitada para realizar el muestreo.

Foto 15. Muestreador alto riesgo de evaporación, sin presencia de nivel freático



Foto 16. Muestreador alto riesgo de evaporación, con presencia de nivel freático



2.5 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

1. Es recomendable antes de salir a realizar el muestreo, verificar el buen funcionamiento de los equipos de medición en campo.
2. Planificar el recorrido, de manera que el tiempo empleado en el traslado de un lugar a otro sea el óptimo.
3. Se debe tener en cuenta que cada muestra debe representar la precipitación compuesta de un periodo de tiempo determinado (un mes).
4. En campo, se calibra y prepara la sonda para realizar los análisis físico-químicos del agua recolectada.
5. Hacer una lectura del volumen recogido en el depósito colector.
6. Vaciar totalmente el contenido, menos el aceite, en los recipientes de almacenamiento de 1 galón, dejando una cantidad suficiente para realizar los análisis físico-químicos en campo.
7. Si la cantidad de agua recolectada es aproximadamente 0.5 litros o menor (en períodos de verano), es conveniente extraer la muestra en los frascos de 50 ml para los análisis del laboratorio¹⁵.
8. Marcar los recipientes de un galón o 50 ml con lápices o marcadores indelebles, indicando el sitio del muestreo.
9. Realizar los análisis fisicoquímicos de campo: temperatura, PH, Potencial Redox, Salinidad, Conductividad y registrarlos en la libreta de campo.
10. Adecuar el depósito colector para una próxima toma de muestras.
11. En caso de la presencia de lluvia en el momento del muestreo, es recomendable tener un plástico o sombrilla a mano para evitar fluctuaciones en los aparatos de medición.

Si se tiene la posibilidad de tener acceso diario al muestreador, o a un pluviómetro, los pasos a seguir son los siguientes:

¹⁵ La muestra de 50 ml para análisis de isótopos estables, tiene prioridad teniendo en cuenta que se debe dejar una cantidad de agua para los análisis físico-químicos en campo. Es recomendado para evitar que la muestra se contamine con el aceite mineral empleado para evitar la evaporación.

1. Se hace una lectura del volumen recogido en el muestreador o pluviómetro, tan pronto como sea posible, después de cada precipitación, o cada mañana, durante un mes.
2. Se vierte la precipitación en un recipiente de plástico de un galón con un buen tapón, para que se evite cualquier pérdida por evaporación, difusión o el intercambio con los alrededores.
3. Secar el colector del pluviómetro con un trapo limpio y seco antes de volver a instalarlo en la posición de recolección.
4. Al cabo del mes, se debe agitar toda el agua contenida en el recipiente de un galón antes de llenar los frascos que se han de enviar al laboratorio. Si la cantidad de agua recogida en un mes cualquiera excede de un galón, se puede utilizar un segundo recipiente para acumular el agua excedente. Al final del mes se debe mezclar toda el agua de ambos recipientes antes de llenar los frascos de 50 ml.

2.6 PRECAUCIONES EN EL ALMACENAMIENTO Y ENVÍO DE LAS MUESTRAS AL LABORATORIO

1. Las muestras deben ser almacenadas inmediatamente después de recogidas, en sitios oscuros, frescos y seguros.
2. Las muestras que permanecen en los recipientes de 1 galón deben ser agitadas antes de llenar los frascos de 50 ml que se enviarán al laboratorio.
3. Los frascos de 50 ml no se llenarán completamente, debe dejarse un pequeño espacio de aire para permitir la expansión y contracción del agua y del aire por aumento o descenso en la temperatura y presión. Se recomienda llenar aproximadamente $\frac{3}{4}$ del volumen del recipiente.
4. Se debe verificar que los frascos queden totalmente herméticos con un tapón de seguridad, cinta de teflón y tapa.

5. Los frascos se marcaran inmediatamente después de llenos con etiquetas en donde debe ir anotado: nombre de la estación, localización, fecha, tipo de muestra y número de la muestra. (Ver Foto 16).

Foto 17. Frascos listos para ser enviados al laboratorio



6. Para el envío y transporte de las muestras es necesario tener en cuenta: Los frascos deben ir perfectamente acomodados, la caja de envío debe estar en buen estado y perfectamente sellada. Debe cerciorarse de que no existan materiales puntiagudos en la caja que pueden perforar las botellas de plástico.
7. Tratar de optimizar el peso y el volumen de la caja, para minimizar los costos de envío¹⁶.
8. Con las muestras a enviar debe ir adjunta la información solicitada por el laboratorio. (Ver Anexos).
9. Anotar de manera legible para evitar problemas con las aduanas, que son botellas que contienen agua para análisis, no causan ningún daño ambiental y que no tienen valor comercial.

¹⁶ Las agencias transportadoras basan el costo de los envíos en dos parámetros: el peso volumétrico, o el peso bruto de la caja; de los dos prima el mayor.

3. LOCALIZACIÓN DE LA RED DE MUESTREO DE AGUAS LLUVIAS

La red de muestreo de aguas lluvias está conformada por un conjunto de estaciones, en las cuales se instala el depósito colector (ver numeral 2.3). Ésta se localiza sobre la cuenca superior del río Lebrija (zona de estudio).

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en la parte nororiental del departamento de Santander, (Colombia), y se ubica entre las coordenadas 1°10'50"00" y 1°12'30"00" de latitud norte, y las coordenadas 74°27'60"00" y 74°28'20"00" de longitud oeste. Según el IGAC la zona de estudio se encuentra en las planchas escala 1: 25000, 120-II-B, 121-I-A y 119-IV-B.

Figura 12. Mapa de Santander y ubicación de la zona de estudio



3.1.1 Cuenca Superior del Río Lebrija. La cuenca superior del río Lebrija se encuentra localizada en la Provincia de Soto (Departamento de Santander); el área de estudio es aproximadamente 1200 km² y comprende a los municipios de Bucaramanga, Piedecuesta, Floridablanca, Girón, Lebrija y Tona.

Figura 13. Mapa de la Provincia de Soto



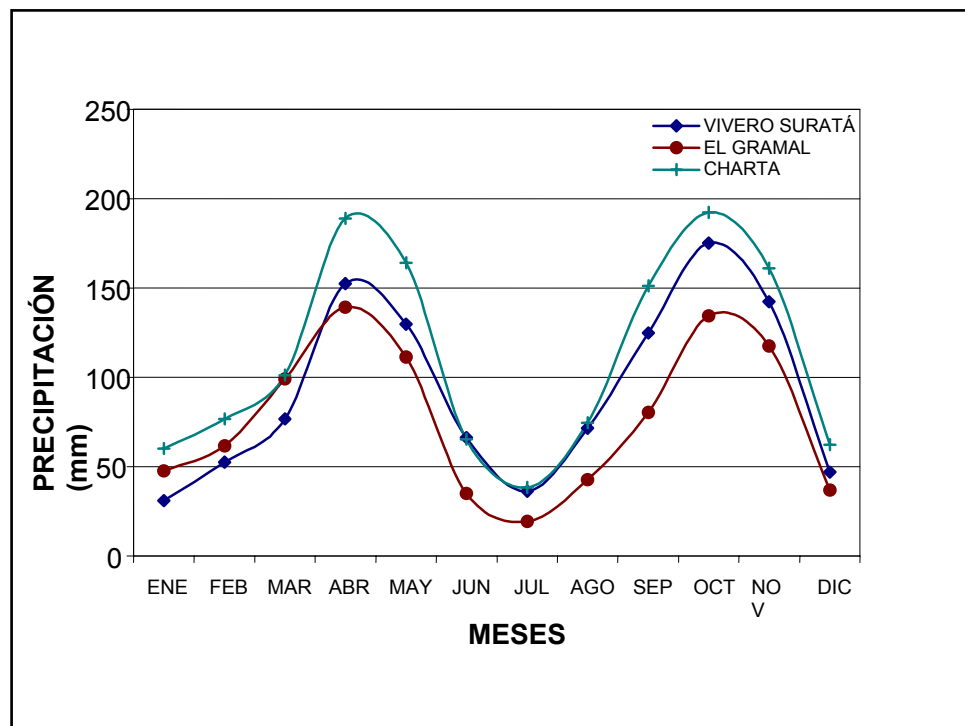
3.1.2 Topografía. En general el área de estudio presenta un rango de elevaciones que van desde los 950 msnm en el Área Metropolitana de Bucaramanga hasta los 3500 msnm sobre la parte alta del macizo de Santander, caracterizando la zona con variaciones bruscas en la pendiente.

3.1.3 Clima. La zona se caracteriza por la gran variabilidad climática, que va desde climas calidos tropicales hasta páramos. Uno de los factores al que se le

atribuye la variabilidad climática es la orografía, la cual se puede definir como montañosa y variable, creando innumerables microclimas a causa de las variaciones en la temperatura, al estar esta en función de la altitud.

Observando las diferentes estaciones pluviométricas y pluviográficas, es notoria la presencia en la zona de dos periodos de verano y dos periodos de invierno, (Comportamiento Bimodal). El primero de ellos se inicia a finales de diciembre y finaliza en marzo, mientras que el segundo se inicia a finales de junio y finaliza a mediados de septiembre. En la Figura 13 se presenta la variación de la precipitación durante el año.

Figura 14. Comportamiento Bimodal de la precipitación en la cuenca



Modificado de Mendoza, C., y Sandoval, R. 2002

3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES

Para la selección y localización de las estaciones que conforman la red de muestreo de aguas lluvias, para análisis de isótopos estables, se realizó un inventario de todas las estaciones de medición de precipitación activas del IDEAM, AMB, CENICAFE, y CDMB, sobre la cuenca superior del río Lebrija; para descartar o seleccionar de acuerdo a los siguientes aspectos.

3.2.1 Aspectos generales. La escogencia de una estación de medición de precipitación asociada a alguna entidad, se basa en la seguridad que esta brinda a los instrumentos allí localizados por parte de un cercado seguro y la vigilancia de la persona encargada. El fácil acceso a estas, es fundamental debido a que los períodos de tiempo empleados en la instalación y recolección de muestras, debe ser mínimo por la extensa zona que debe cubrir el muestreo y el ahorro en gastos de transporte.

3.2.2 Variaciones isotópicas involucradas en la localización. De las variaciones isotópicas en la precipitación (Ver numeral 1.4), la que tiene mayor trascendencia en la zona de estudio (Cuenca superior del río Lebrija), es el efecto de altitud u orográfico; ya que la cuenca presenta una topografía (Ver numeral 3.1.2) que se presta para basar la localización de las estaciones de muestreo de agua lluvia, para análisis de isótopos estables, en función de la altitud. Un aumento de altitud se traduce, generalmente, en una disminución de la temperatura y, por tanto, en una disminución de la relación isotópica¹⁷ de las precipitaciones y un valor de desviación (δ) más negativo.

¹⁷ A mayor altura, la cantidad de moléculas ligeras ($^1\text{H}_2\text{ }^{16}\text{O}$) en la precipitación aumenta, mientras las pesadas ($^1\text{H}\text{D}^{16}\text{O}$ y $^1\text{H}_2\text{ }^{18}\text{O}$) disminuye. Por lo tanto la relación isotópica, R, disminuye. Ver pagina 12.

El efecto de altitud esta determinado por el empobrecimiento en isótopos pesados (D y ^{18}O), que tiene lugar dentro de la nube durante su ascensión a cotas más altas, debido a la condensación preferencial de las moléculas pesadas del agua ($^1\text{H}^{16}\text{O}$ y $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$).

Las estaciones de muestreo se deben distribuir, tratando de cubrir las zonas de variación orográfica más importantes, para poder observar los fenómenos de variación isotópica en la precipitación a medida que aumente la elevación.

3.3 ESTACIONES SELECCIONADAS

Fueron seleccionadas 11 estaciones para instalar el depósito colector de agua lluvia y así dar puesta en marcha a la red de muestreadores de isótopos estables (D y ^{18}O); éstas se ubican distantes entre sí cada 200 a 400 metros de altura aproximadamente, ubicando la más baja a 993 msnm en Bucaramanga y la más alta a 3435 msnm en el Picacho. La información correspondiente a estas se puede observar en las Tablas 4, 5 y Fotos 17 a 27.

Todas las estaciones, exceptuando a Granja Piedecuesta, IDEAM y Aeropuerto Palonegro, se georeferenciaron con GPS. Por lo tanto estas estaciones cuentan con la información suministrada por el IDEAM.

La estación UIS Edif. Hidráulica, estuvo en funcionamiento solo en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre de 2004.

Tabla 4. Información general de las estaciones de muestreo de isótopos estables (D y ¹⁸O)

N°	CODIGO IDEAM	TIPO	NOMBRE	SUBCUENCA	DPTO	MUNICIPIO	COORD. GPS	ELEV.GPS msnm	INST.
1	NO EST.		UIS EDIF. HIDRAULICA	TONA	SANT	BUCARAMANGA	070841N-730730W	993.43	UIS
2	2319070	PG	PIEDECUESTA GJA	LATO	SANT	PIEDECUESTA	0700N-7305W	1000.00	IDEAM
3	2319083	PG	IDEAM	SURATA	SANT	BUCARAMANGA	0707N-7307W	1025.00	IDEAM
4	2319513	SP	AEROPUERTO PALONEGRO	DE ORO	SANT	LEBRIJA	0708N-7311W	1189.00	IDEAM
5	CENICAFE	CP	SAN ANTONIO	FRIO	SANT	FLORIDABLANCA	070608N-730410W	1531.58	CENICAFE
6	2319013	PM	TONA	TONA	SANT	TONA	071155N-725826W	1795.92	IDEAM
7	2319040	PM	LA GALVICIA	TONA	SANT	FLORIDABLANCA	070732N-730336W	1847.98	IDEAM
8	Est.AMB	PM	LA MARIANA	FRIO	SANT	FLORIDABLANCA	070732N-730037W	2481.18	AMB
9	NO EST.		LA CASITA	TONA	SANT	TONA	071230N-725617W	2659.72	UIS
10	NO EST.		ESCUELA TEMBLADAL	TONA	SANT	TONA	071215N-725553W	2869.27	UIS
11	3701502	CO	BERLIN	JORDAN	SANT	TONA	071122N-725218W	3306.66	IDEAM
12	2319030	PM	PICACHO EL	TONA	SANT	TONA	070646N-725811W	3435.35	IDEAM

Tabla 5. Ubicación general de las estaciones de muestreo de isótopos estables (D y ¹⁸O)

N°	NOMBRE	FECHA DE INSTALACION	ENCARGADO	UBICACIÓN
1	EDIF.UIS HIDRAULICA	14-Oct-04	Terraza Hidraulica (Tanque)	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
2	PIEDECUESTA GJA	12-Oct-04	Miguel Diaz	FRENTE A ASOPENDER PIEDECUESTA
3	IDEAM	01-Ene-05	Ing.Victor Calderon	EDIFICIO IDEAM QUEBRADA SECA
4	AEROPUERTO PALONEGRO	01-Dic-04	Sr. Seguridad Don Noe	JARDIN METEOROLOGICO APTO. PALONEGRO
5	SAN ANTONIO	05-Oct-04	Pedro Maria Sanchez	KM16 VIA CUCUTA
6	TONA	12-Oct-04	Mireya Quintero	300m ANTES DEL CEMENTERIO TONA
7	GALVICIA LA	13-Oct-04	German Quintero	KM 18 VIA CUCUTA
8	LA MARIANA	21-Oct-04	Ivan Dario Osma	KM 32 VIA CUCUTA
9	LACASITA	18-Sep-04		CARRETERA BERLIN - TONA
10	ESCUELA TEMBLADAL	16-Oct-04	Profesora Escuela	ESCUELA TEMBLADAL
11	BERLIN	13-Oct-04	Armando Lizarazo	HACIENDA PESCA DE TRUCHA, SALIDA DE BERLIN
12	PICACHO EL	13-Oct-04	Ana Rosa Montañez	200 metros DESPUES DEL PEAJE

Foto 18. Estación Granja Piedecuesta (1000 msnm). IDEAM.



Foto 19. Estación IDEAM (1025 msnm). Bucaramanga – Avda. Qseca con cra 32



Continuación estación IDEAM. Bucaramanga – Avda. Qseca con cra 32



En esta estación no se colocó el depósito colector de las demás. Hay una persona capacitada, que recoge el agua lluvia del pluviómetro y la almacena en el recipiente de un galón, tal y como se indica en los numerales 1,2 y 3 de la página 42.

Foto 20. Estación Aeropuerto Palonegro (1189 msnm). IDEAM



Foto 21. Estación San Antonio (1532 msnm). Federación Nacional de Cafeteros de Colombia



Foto 22. Estación Tona (1796 msnm). IDEAM



Foto 23. Estación La Galvicia (1848 msnm). IDEAM



Foto 24. Estación La Mariana (2481 msnm). Acueducto Metropolitano de Bucaramanga



Foto 25. Estación La Casita (2660 msnm). Cuenca Experimental Río Sucio



Foto 26. Estación Escuela Rural Tembladal (2869 msnm). C. Exp. Río Sucio



Foto 27. Estación Berlín (3306 msnm). IDEAM



Foto 28. Estación El Picacho (3435 msnm). IDEAM



El plano de la cuenca superior del río Lebrija con la localización de las estaciones de muestreo de isótopos estables en la precipitación (D y ^{18}O), se presenta en la Figura 14.

La localización de los puntos de muestreo de isótopos en aguas subterráneas (ver numeral 4.2.2), se presenta en la Figura 15.

En las Figuras 16 y 17 se encuentran los perfiles con las estaciones de muestreo de isótopos en la precipitación, siguiendo las rutas de muestreo que se presentan en la Figura 14.

Figura 15. Localización de las estaciones de muestreo de isótopos estables (D y ^{18}O)

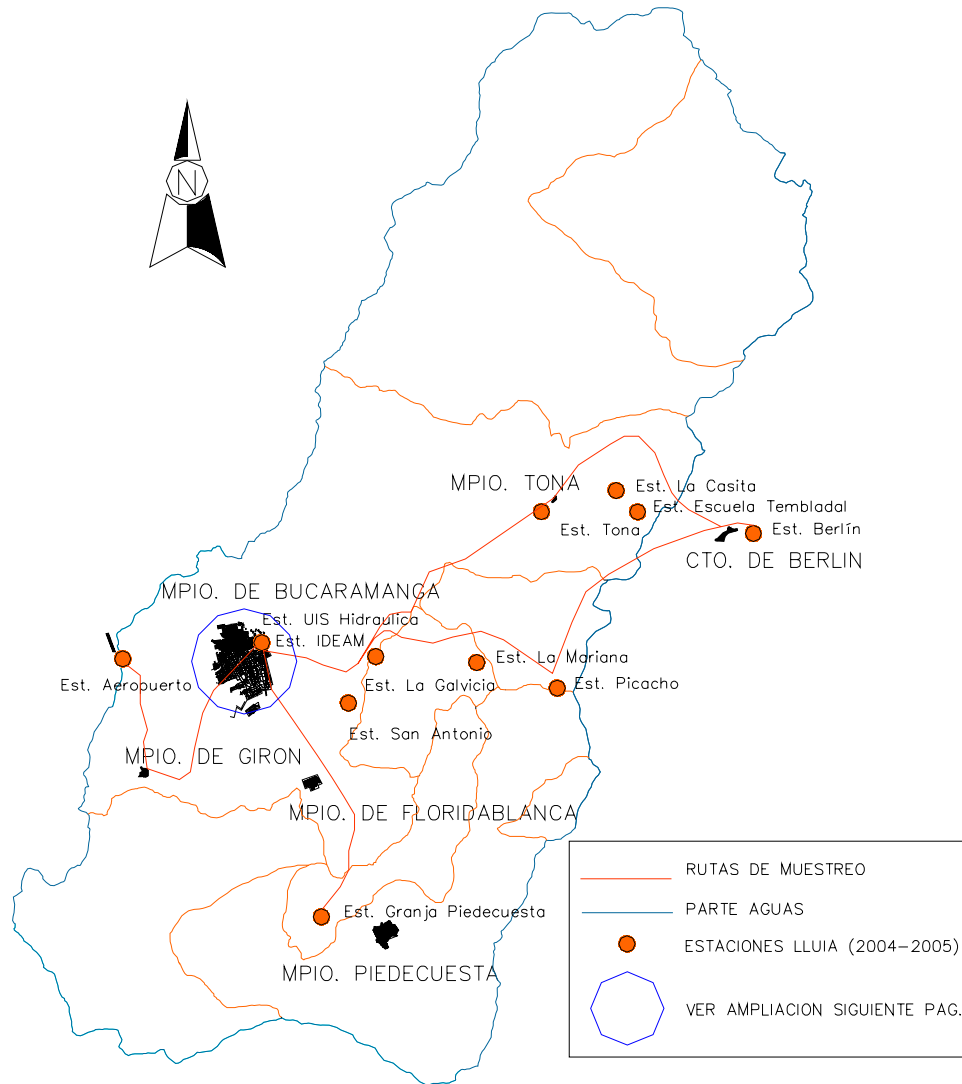


Figura 17. Perfil de las estaciones, siguiendo la ruta Piedecuesta-UIS-IDEAM-S.Antonio-La Galvicia-Tona-La Casita-Esc. Tembladal-Berlín

Berlín, Tembladal, Casa, Tona, Galvicia, S.Antonio, IDEAM, UIS, Piedecuesta

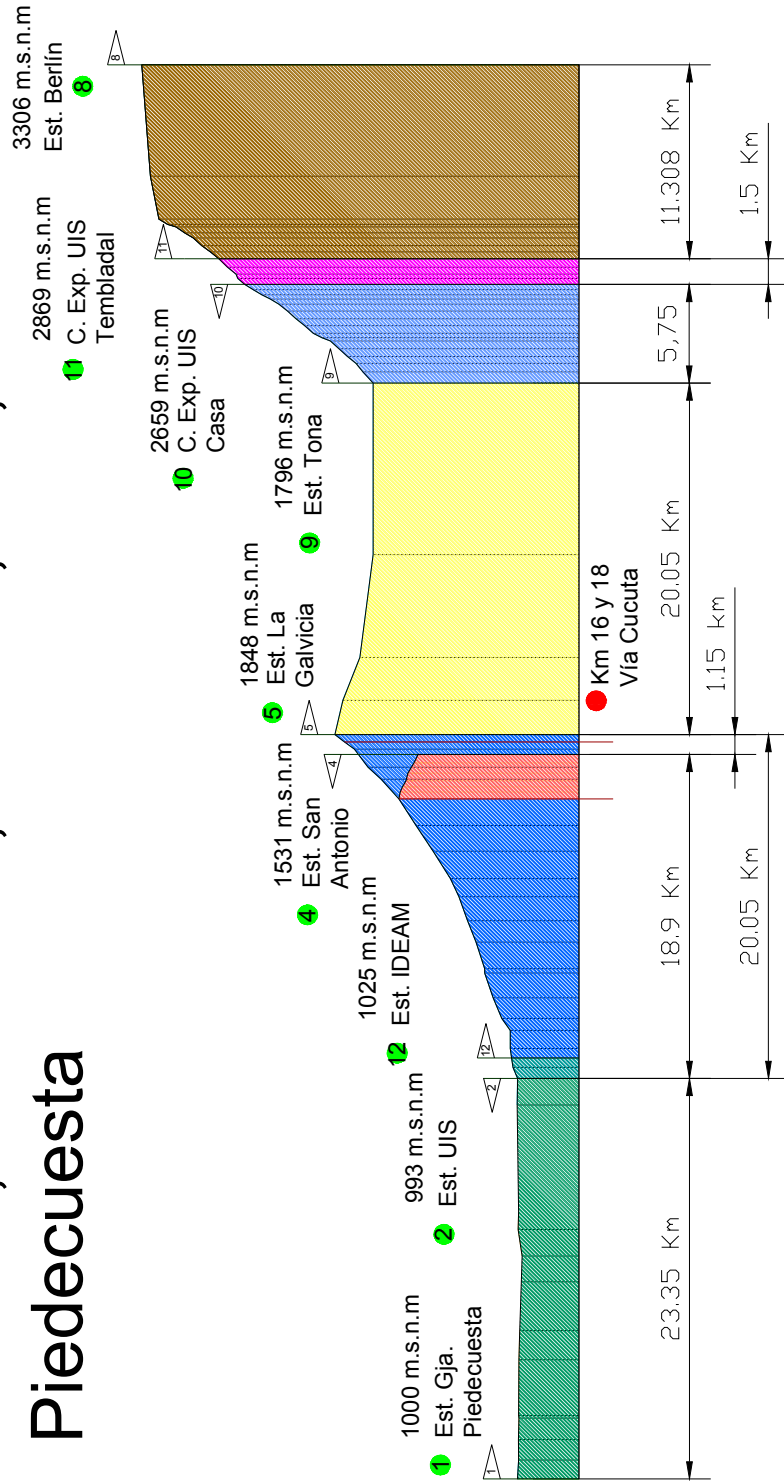
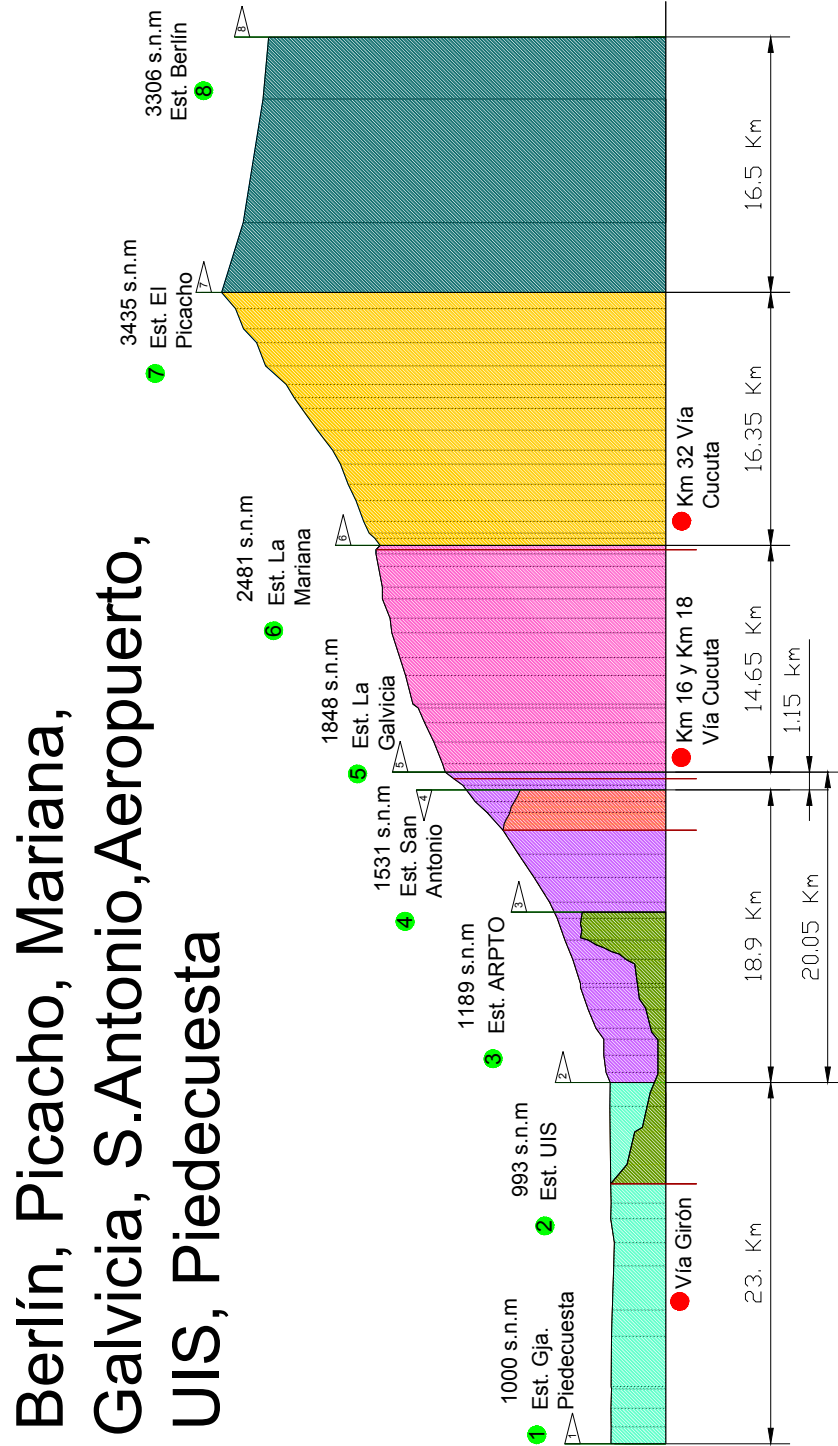


Figura 18. Perfil de las estaciones, siguiendo la ruta Piedecuesta-UIS-Aeropuerto Palonegro-S.Antonio-La Galvicia-La Mariana-El Picacho-Berlín



4. TOMA Y RECOPIACIÓN DE DATOS

En el presente capítulo se expone la información recopilada durante el desarrollo del proyecto, entre la que se encuentra información tomada en campo durante el periodo de muestreo e información de los más recientes estudios isotópicos realizados en Colombia con una breve reseña de su contenido.

4.1 DATOS DE CAMPO (Muestreo de precipitación)

En el presente proyecto se desarrolló un muestreo de isótopos estables sobre agua lluvia, el cual abarcó 6 meses comprendidos entre Octubre de 2004 a Marzo de 2005 durante los cuales se tomaron algunos parámetros físico-químicos en campo sobre el agua recolectada; La medición de los parámetros se efectúa no solo por los requerimientos de los laboratorios en donde se analizan las muestras de isótopos; sino por la información que estos proporcionan, ya que dan un indicio de la calidad y cantidad del agua recolectada, para poder detectar posibles alteraciones durante el periodo de muestreo.

Entre las mediciones realizadas en campo durante el periodo del muestreo, se encuentran algunos parámetros Físico – Químicos como pH, salinidad, electroconductividad, potencial redox y volúmenes de precipitación. Se omitieron otros parámetros que también eran medidos por la sonda, como el Oxígeno disuelto que no proporciona una medida confiable ya que el agua en reposo contenida en el colector durante el mes pierde gran cantidad de este; y la temperatura la cual se midió pero dependía de las condiciones climáticas en el momento del muestreo.

Tabla 6. Fechas de toma de Muestras.

Nº	NOMBRE	FECHA DE INSTALACION	Octubre (Fecha)	Noviembre (Fecha)	Diciembre (Fecha)	Enero (Fecha)	Febrero (Fecha)	Marzo (Fecha)
1	EDIF. UTS HIDRAULICA	14-Oct-04	10-Nov-04	09-Dic-04	07-Ene-05	10-Feb-05	09-Mar-05	06-Abr-05
2	GJA. PIEDECUESTA	12-Oct-04	10-Nov-04	09-Dic-04	06-Ene-05	08-Feb-05	09-Mar-05	06-Abr-05
3	IDEAM	01-Ene-05				31-Ene-05	28-Feb-05	01-Abr-05
4	AEROPUERTO PALONEGRO	01-Dic-04			06-Ene-05	08-Feb-05	09-Mar-05	07-Abr-05
5	SAN ANTONIO	05-Oct-04	09-Nov-04	07-Dic-04	05-Ene-05	11-Feb-05	08-Mar-05	08-Abr-05
6	TONA	12-Oct-04	12-Nov-04	07-Dic-04	05-Ene-05	09-Feb-05	08-Mar-05	08-Abr-05
7	GALVICIA LA	13-Oct-04	09-Nov-04	07-Dic-04	05-Ene-05	11-Feb-05	08-Mar-05	08-Abr-05
8	LA MARIANA	21-Oct-04	09-Nov-04	07-Dic-04	05-Ene-05	11-Feb-05	08-Mar-05	08-Abr-05
9	LA CASITA	18-Sep-04	11-Nov-04	07-Dic-04	05-Ene-05	09-Feb-05	08-Mar-05	08-Abr-05
10	ESCUELA TEMBLADAL	16-Oct-04	11-Nov-04	07-Dic-04	05-Ene-05	09-Feb-05	10-Mar-05	08-Abr-05
11	BERLIN	13-Oct-04	09-Nov-04	07-Dic-04	05-Ene-05	11-Feb-05	08-Mar-05	08-Abr-05
12	PICACHO EL	13-Oct-04	09-Nov-04	07-Dic-04	05-Ene-05	11-Feb-05	08-Mar-05	08-Abr-05

Las mediciones de las para metros físico-químicos durante los meses de muestreo se pueden observar en las tablas 7 a 12. El error calculado esta dado por la diferencia entre la lectura del pluviómetro y el colector dividido entre la lectura del pluviómetro y expresado en %, es evidente el calculo de errores muy grandes con mediciones de volúmenes pequeños.

Tabla 7. Muestreo de campo, mes Octubre de 2004

ESTACIÓN	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Colector mm	Pluviometro mm	%Error	Dias **
UIS Hidraulica	6,14	40	9.6	18.1	4.8	132.2	115	-14.97	28
La Granja Piedecuesta	5.88	56	7.4	13.8	10.1	278.2	297	6.33	30
San Antonio	5.7	61	8.1	15.2	9.5	261.7	261	-0.26	36
Tona*	5.9	60	5.2	9.8	9.5	261.7	280	6.55	32
La Galvicia*	6.14	41	8	15.1	8.5	234.1	243	3.65	29
La Mariana	6.2	37	13.5	25.5	5.7	157.0	150.5	-4.32	20
La Casita	6.18	41	13.2	24.8	12	330.5	No hay		55
Escuela Tembladal	6.45	25	17.7	33.3	9	247.9	No hay		27
Berlin	6.3	29	22	41	3.5	96.4	99.8	3.40	29
El Picacho*	5.49	75	185	348	5.5	151.5	160	5.32	29

* Estaciones en donde la lectura del pluviometro se hace con reglilla.

** Numero de dias de recolección de agua lluvia.

Valores Elevados

Tabla 8. Muestreo de campo, mes Noviembre de 2004

ESTACIÓN	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Colector mm	Pluivometro mm	%Error	Dias **
UIS Hidraulica	6.25	35	10.1	19	3	82.6	80.3	-2.91	30
La Granja Piedecuesta	6.43	24	7.3	13.6	4.5	123.9	122.4	-1.27	30
San Antonio	5.88	56	4.4	8.2	5.2	143.2	145	1.22	29
Tona*	6.45	21	5.6	10.6	5	137.7	144	4.36	26
La Galvicia*	5.49	80	7.1	13.4	6	165.3	177	6.63	29
La Mariana	5.92	53	6	11.2	4.5	123.9	108.5	-14.24	29
La Casita	5.9	52	6.2	11.5	3	82.6	No hay		27
Escuela Tembladal	6.49	20.1	10.8	21.1	4	110.2	No hay		27
Berlin	6.36	25	4.9	9.1	1.1	30.3	30.1	-0.66	29
El Picacho*	5.95	48	9.4	17.7	4.3	118.4	114	-3.90	29

* Estaciones en donde la lectura del pluviometro se hace con reglilla.

** Numero de dias de recolección de agua lluvia.

Tabla 9. . Muestreo de campo, mes Diciembre de 2004

ESTACION	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Colector mm	Pluviómetro mm	%Error	Dias **
UIS Hidraulica	6.09	42	5	9.4	5.6	154.2	142.2	-8.47	30
La Granja Piedecuesta	6.49	22	5.3	9.9	2.5	68.9	76.1	9.51	29
Est. Aeropuerto P.	6.06	48	4.1	7.7	3.2	88.1	95.2	7.41	37
San Antonio	5.37	91	4.7	8.9	2.1	57.8	56.5	-2.38	30
Tona*	5.96	56	59	112	6.8	187.3	208	9.95	30
La Galvicia*	6.05	49	7.8	14.6	3.2	88.1	97	9.13	30
La Mariana	6.11	37	6.4	11.9	2.3	63.4	62.3	-1.69	30
La Casita	6.23	40	3.7	6.9	2.5	68.9	No hay		30
Escuela Tembladal	6.66	14	5.2	9.7	2.4	66.1	No hay		30
Berlin	6.52	22	13.6	25.6	0.4	11.0	11.9	7.41	30
El Picacho*	6.6	16	36	67.7	0.9	24.8	24	-3.29	30

* Estaciones en donde la lectura del pluviometro se hace con reglilla.

** Numero de dias de recolección de agua lluvia.

Tabla 10. Muestreo de campo, mes Enero de 2005

ESTACION	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Colector mm	Pluviómetro mm	%Error	Dias **
La Granja Piedecuesta	5.97	62	10.1	19.1	5.7	157.0	153.3	-2.42	34
IDEAM	5.45	80	12.1	22.9			68.7		32
Est. Aeropuerto P.	5.76	73	7	12.8	4.6	126.7	128.8	1.63	34
San Antonio	5.5	76	4.7	8.9	4	110.2	112.5	2.06	38
Tona*	5.26	97	5.8	11	5.1	140.5	145	3.12	36
La Galvicia*	5.19	93	6.4	12	6.4	176.3	176	-0.16	38
La Mariana	5.69	65	7.8	14.5	4.3	118.4	93.1	-27.22	38
La Casita	5.83	62	3.6	6.8	4.1	112.9	No hay		36
Escuela Tembladal	5.69	71	4	7.6	4.4	121.2	No hay		36
Berlin	5.21	91	7.7	14.5	1.1	30.3	29.9	-1.33	38
El Picacho*	5.41	80	6.8	12.8	3.8	104.7	104	-0.64	38

* Estaciones en donde la lectura del pluviometro se hace con reglilla.

** Numero de dias de recolección de agua lluvia.

Tabla 11. Muestreo de campo, mes Febrero de 2005

ESTACION	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Colector mm	Pluviómetro mm	%Error	Dias **
La Granja Piedecuesta	5.17	109	6.4	12.1	11.9	327.8	325.6	-0.67	30
IDEAM	5.11	112	17.2	9.3			312.6		28
Est. Aeropuerto P.	5.29	101	4.3	8.1	10.4	286.5	280.6	-2.09	30
San Antonio	6.93	6	540	287	6.6	181.8	195.5	7.01	26
Tona*	5.28	103	10.9	5.8	2	55.1	51	-8.02	28
La Galvicia*	5.05	116	13	6.9	5.9	162.5	163	0.30	26
La Mariana	5.21	105	11.3	6	3	82.6	70	-18.05	26
La Casita	5.26	105	6.8	3.6	2.9	79.9	No Hay		28
Escuela Tembladal	NO HAY MUESTRA ESTE MES								
Berlin	5.45	92	15.4	8.1	0.7	19.3	20.3	5.02	26
El Picacho*	5.66	78	13.6	7.3	1	27.5	24	-14.77	26

* Estaciones en donde la lectura del pluviómetro se hace con reglilla.

** Numero de dias de recolección de agua lluvia.

Valores Elevados

Tabla 12. Muestreo de campo, mes Marzo de 2005

ESTACION	PH	P.REX mV	SAL mg/L	E.CONDUC	Vol.L	Colector mm	Pluviómetro mm	%Error	Dias **
La Granja Piedecuesta	5.85	64	13.6	25.5	0.8	22.0	17.7	-24.49	29
IDEAM	5.41	96	7.2	13.6			24		31
Est. Aeropuerto P.	4.83	127	7.4	13.8	2.3	63.4	67.6	6.28	30
San Antonio	5.05	109	19.1	35.9	1.1	30.3	30	-1.00	32
Tona*	5.46	84	13	24.3	0.7	19.3	18	-7.12	32
La Galvicia*	5.59	78	16.6	31.1	0.8	22.0	22	-0.16	32
La Mariana	5.7	71	15	27.8	0.4	11.0	6.9	-59.68	32
La Casita							No hay		32
Escuela Tembladal	6.55	21	23.2	43.6	0.4	11.0	No hay		30
Berlin	5.3	93	42.5	80	1.4	38.6	39	1.12	32
El Picacho*	5.97	53	56	106	0.1	2.8	2	-37.72	32

* Estaciones en donde la lectura del pluviómetro se hace con reglilla.

** Numero de dias de recolección de agua lluvia.

4.2 DATOS DE ESTUDIOS EXISTENTES EN LA REGIÓN (Bucaramanga)

Los datos recopilados fueron obtenidos de los estudios isotópicos en la precipitación realizados en 1994 por Navía y Suárez, 2002 y 2003 por Gómez y Anaya; estudios de aguas subterráneas (drenes, pozos y piezómetros) realizados por Gómez y Anaya en 2002,2003 y 2004, todos estos respectivamente a través de Tesis de grado¹⁸, publicaciones en revistas¹⁹ e informes de investigación²⁰. Realizados todos estos sobre la Cuenca Superior del Río Lebrija.

Los periodos de muestreo de precipitación en el estudio Gómez y Anaya, se realizaron en los meses de noviembre de 2002 y febrero de 2003, para caracterizar isotópicamente un mes de invierno y otro de verano respectivamente; mientras que los estudios de Navía y Suárez realizados en 1994 no especifican la fecha del muestreo.

4.2.1 Datos de Precipitación. En el estudio realizado en 1994 se tomaron muestras de 9 manantiales mientras que en el estudio 2002-2003 los manantiales muestreados fueron 14, ver tabla 13 y 14. Las muestras extraídas de los manantiales se tomaron como 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.

¹⁸ NAVIA, Maria y SUAREZ, Martín. Aplicación de Isótopos en Hidrología. Bucaramanga, 1994,140 p. Tesis de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Área de Hidrología Isotópica.

¹⁹ GOMEZ, Sully y ANAYA, Ángel. Acercamiento a un Modelo Conceptual de Recarga de los Acuíferos de la Región de Bucaramanga. En: Revista Avances en Recursos Hídricos. Numero 11 (Septiembre, 2004); p. 37-50. ISSN 0121-5701.

²⁰ GOMEZ, Sully y ANAYA, Ángel. Interrelación Entre Sistemas Hidrogeológicos Para el Estudio del Fenómeno de Recarga en el Macizo de Santander e Identificación de Acuíferos. Bucaramanga: 2004. 39 p.

Tabla 13. Puntos de Muestreo Manantiales (1994)

LOCALIZACION	ALTURA msnm	δO_{18} o/oo	δD o/oo	TIPO DE MUESTRA
Páramo de Berlín	3000	-10.55	-75.3	Manantial
Km. 45	3200	-9.13	-68.2	Manantial
Km. 34	2600	-9.64	-65.2	Manantial
Km. 29	2400	-9.06	-64.4	Manantial
Km. 24	2000	-8.69	-60.7	Manantial
Km. 18	1800	-8.87	-60	Manantial
Km. 12	1600	-7.2	-53.8	Manantial
Manantial la flora	1000	-4.23	-30	Manantial
Km. 15	1300	-7.51	-51.4	Manantial

Tabla 14. Puntos de Muestreo Manantiales (2002-2003)

LOCALIZACION	ALTURA msnm	MUESTRA	δO_{18} o/oo	δD o/oo	TIPO DE MUESTRA	Este	Norte
Invierno							
Q.Suratoque	946	20/12/02	-7.35	-48.1	Manantial	1118493	1279608
Q. El Carmen	964	27/11/02	-6.89	-44.0	Manantial	1110284	1278577
Q.Malaña	1100	22/12/02	-7.94	-51.9	Manantial	1109566	1279477
Q. La Flora	1160	26/11/02	-7.65	-49.6	Manantial	1107521	1280726
Q. La Aurora	1380	26/11/02	-7.78	-49.9	Manantial	1107099	1281850
km11	1580	26/11/02	-7.77	-50.2	Manantial	1109339	1275121
km33	2520	26/11/02	-9.36	-60.4	Manantial	1109945	1274814
Verano							
Q.Suratoque	946	06/02/03	-7.07	-46.0	Manantial	1118493	1279608
Q. El Carmen	964	06/02/03	-6.20	-37.6	Manantial	1110284	1278577
Q.La Malaña	1100	23/02/03	-7.91	-51.8	Manantial	1109566	1279477
Q.La Flora	1160	05/02/03	-7.04	-44.7	Manantial	1107521	1280726
Q.La Aurora	1380	05/02/03	-7.78	-49.6	Manantial	1107099	1281850
km11	1580	05/02/03	-7.77	-48.5	Manantial	1109339	1275121
km33	2520	05/02/03	-9.30	-59.2	Manantial	1109945	1274814

Las muestras de precipitación se tomaron de tres estaciones, de las cuales dos se ubicaban sobre la meseta de Bucaramanga y una en la parte alta sobre los 1950 msnm. Se recolectaron muestras compuestas mensuales, para los meses de Diciembre de 2002 y Febrero de 2003, estas se pueden observar en la tabla 15.

Tabla 15. Puntos de Muestreo Precipitación (2002-2003)

LOCALIZACION	ALTURA msnm	MUESTRA	δO_{18} o/oo	δD o/oo	TIPO DE MUESTRA	Este	Norte
Verano							
Est. La Cumbre	1008	13/02/03	-1.40	0.9	Precipitación	1112352	1277912
Est. UIS	1018	13/02/03	-1.46	0.2	Precipitación	1105933	1281632
Est. el Diviso	1950	29/01/03	-4.32	-22.0	Precipitación	1109324	1274653
Invierno							
Est. La Cumbre	1008	13/12/02	-4.87	-30.8	Precipitación	1112352	1277912
Est. UIS	1018	13/12/02	-3.73	-21.7	Precipitación	1105933	1281632
Est. el Diviso	1950	29/12/02	-8.37	-53.4	Precipitación	1109324	1274653

4.2.2 Datos de Aguas Subterráneas. Para la identificación de la zona de recarga se tomaron muestras de drenes, pozos y piezómetros ubicados en el Área Metropolitana de Bucaramanga, ver tablas 16 y 17. Se realizaron dos muestreos, el primero de ellos se llevo a cabo en los meses de Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero y Marzo de 2002-2003 y el segundo en el mes de Junio de 2004, en donde se muestrearon piezómetros en su gran mayoría.

Tabla 16. Aguas Subterráneas Muestreo (2002-2003)

Nombre	Tipo	Fecha	δO_{18} o/oo	δD o/oo	Eleva msnm	Este	Norte
Invierno							
Nazaret	Dren	27/Nov/2002	-8.49	-56.2	880	1104190	1281150
Ciudad Norte	Pozo Bom.	27/Nov/2002	-8.07	-53.7	830	1105350	1282260
B. Independencia	Dren	27/Nov/2002	-8.40	-54.6	865	1105090	1281620
Barrio Argelia	Dren	27/Nov/2002	-8.42	-55.5	900	1103920	1279722
Vivero La Rosita	Dren	27/Nov/2002	-8.23	-54.9	893.9	1105251	1278261
Lavadero la Rosita	Cisterna	27/Nov/2002	-8.41	-55.5	950	1105857	1279150
Barrio Galán	Cisterna	1/Dic/2002	-8.40	-55.6	650	1100750	1277250
Lavad. Calle 48 - 33	Pozo Bom.	2/Dic/2002	-7.56	-50.0	976	1106794	1278819
Terpel - Chimita	Pozo Asrt.	3/Dic/2002	-7.48	-50.8	676.1	1100458	1276737
Lavadero San FSCO.	Pozo Bom.	2/Dic/2002	-8.43	-56.3	961	1105190	1281450
Jardín La Colina	Pozo Bom.	27/Dic/2002	-8.48	-56.3	1030	1108271	1278069
Estación Oriental T	Pozo Bom.	3/Ene/2003	-9.79	-62.3	898	1109328	1275468
Piezómetro la Flora	Pozo Obser.	14/Mar/2003	-7.16	-45.5	1027	1107449	1272329
Lavadero la Cumbre	Cisterna	9/Mar/2003	-7.53	-48.6	1000	1109558	1274832

Continuación Tabla 16. Aguas Subterráneas Muestreo (2002-2003)

Nombre	Tipo	Fecha	δO_{18} o/oo	δD o/oo	Eleva msnm	Este	Norte
Verano							
Nazaret	Dren	6/Feb/2003	-8.47	-55.0	880	1104190	1281150
Ciudad Norte	Pozo Bom.	6/Feb/2003	-8.05	-51.9	830	1105350	1282260
B. Independencia	Dren	6/Feb/2003	-8.38	-53.8	865	1105090	1281620
Barrio Argelia	Dren	6/Feb/2003	-8.41	-54.8	900	1103920	1279722
Vivero La Rosita	Dren	6/Feb/2003	-8.27	-52.8	893.9	1105251	1278261
Lavadero la Rosita	Cisterna	6/Feb/2003	-7.91	-51.9	950	1105857	1279150
Barrio Galán	Cisterna	6/Feb/2003	-8.34	-55.3	650	1100750	1277250
Lavad. Calle 48 - 33	Pozo Bom.	7/Feb/2003	-8.05	-53.5	976	1106794	1278819
Terpel - Chimita	Pozo Asrt.	10/Feb/2003	-7.51	-51.6	676.1	1100458	1276737
Lavadero San Fsco.	Pozo Bom.	10/Feb/2003	-8.48	-55.9	961	1105190	1281450
Jardín La Colina	Pozo Bom.	14/Feb/2003	-8.35	-55.3	1030	1108271	1278069
Estación Oriental T	Pozo Bom.	7/Feb/2003	-8.80	-60.3	898	1109328	1275468
Piezómetro la Flora	Pozo Obser.	28/Mar/2003	-7.14	-44.7	1027	1107449	1272329
Lavadero la Cumbre	Cisterna	28/Mar/2003	-7.54	-48.2	1000	1109558	1274832

Tabla 17. Aguas Subterráneas Muestreo (2004)

Nombre	Tipo	Fecha	δO_{18} o/oo	δD o/oo	Eleva msnm	Este	Norte
Pan de Azúcar	Piezómetro sup.	10/Jun/2004	-6.91	-46.5	1042	1107875	1279071
La Cumbre	lavadero	10/Jun/2004	-7.54	-50.4	1023	1109558	1274832
Parque La Flora	Piezómetro inf.	13/Jun/2004	-8.34	-54.8	957.9	1107270	1278178
Q. Mensuli	Pozo bombeo	13/Jun/2004	-6.65	-43.4	1000	1111795	1269414
Llanogrande	Pozo explor.	11/Jun/2004	-7.27	-50.1	720	1100502	1268039
Piedecuesta	Pozo de bomb.	13/Jun/2004	-6.98	-46.7	1000	1113013	1260014
Pan de Azúcar	Piezómetro inf.	13/Jun/2004	-8.32	-53.4	1042	1107875	1279071
Parque La Flora	Piezómetro sup.	13/Jun/2004	-7.46	-49.5	957.9	1107270	1278178
Buenavista	Piezómetro inf.	14/Jun/2004	-7.69	-49.6	1322	1108994	1280275
Buenavista	Piezómetro sup.	14/Jun/2004	-7.66	-49.6	1322	1108994	1280275
La Cumbre	Cisterna	14/Jun/2004	-7.51	-49	1023	1109558	1274832

4.3 DATOS DISPONIBLES EN COLOMBIA

Los siguientes resultados fueron obtenidos de numerosas publicaciones y archivos privados sobre estudios isotópicos en algunas regiones de Colombia; realizados

por universidades, corporaciones y otras entidades interesadas en el tema. Muchos de los datos disponibles en los estudios carecen de información vital e imprescindible para su análisis como lo son las condiciones de muestreo, épocas de muestreo, localización precisa de los sitios de muestreo y tipo de muestra, lo que pone en duda la calidad de los mismos.

4.3.1. Rectas meteóricas en Colombia. El resultado de la información isotópica recopilada en Colombia, sobre los datos de aguas lluvias mediante este proyecto, han sido: 270 datos de estudios distribuidos por todo el país y 259 de la estaciones del GNIP en Barranquilla y Bogota.

- **Guajira:** La Corporación Autónoma Regional de la Guajira (CORPOGUAJIRA) llevo a cabo un estudio²¹ de hidrogeología, geoquímica e hidrología isotópica en el municipio de Maicao, en donde fueron analizadas tres muestras compuestas mensuales de agua lluvia y un manantial ubicadas entre 40 y 600 msnm. La línea meteórica local preeliminar obtenida en esta región a partir de 4 puntos tomados en los meses de Octubre, Diciembre de 2002 y Febrero de 2003, tiene por ecuación: $\delta D = 8.55 * \delta^{18}O + 13.07$ y $R = 0.997$.

Tabla 18. Datos Isotópicos de Precipitación Guajira

#	Tipo de Muestra	Fecha	δO^{18}	δD
L01	Lluvia	Oct-02	-5.3	-32.9
L03	Lluvia	Dic-02	-2.6	-9.5
L05	Lluvia	Dic-02	-3.9	-19.6
4	Manantial		-5.9	-36

²¹TORO, Luis. Inventario de los acuíferos en la zona de Maicao, por medio de la hidroquímica. En: PRIMER CONGRESO COLOMBIANO DE HIDROGEOLOGIA. (2004: Medellín). Memorias Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. 15 p.

- **Sucre:** La Corporación Autónoma Regional de Sucre (CARSUCRE), con el apoyo de la OIEA desarrollo un proyecto hidrogeológico completo²², del cual se obtuvo un año de muestras compuestas mensuales de lluvias, recolectadas en dos totalizadores en las estaciones Corozal y Ovejas, con el fin de elaborar la línea meteórica local. El acuífero de Morroa tiene un área de 1000 km² y está localizado al noroeste de Colombia. La línea meteórica local se rige por la siguiente ecuación: $\delta D = 8.2 * \delta^{18}O + 10.1$ y $R = 0.99$.

Tabla 19. Datos Isotópicos de Precipitación Sucre

#	Estación	Tipo de Muestra	Fecha	δO^{18}	δD	Precipitación.
1	Corozal	Lluvia	Mar-02	-1.6	-5	20
2	Corozal	Lluvia	Abr-02	-3.7	-23	101
3	Corozal	Lluvia	May-02	-7.6	-54.1	190
4	Corozal	Lluvia	Jun-02	-12.3	-92	154
5	Corozal	Lluvia	Jul-02	-3.2	-18.9	42
6	Corozal	Lluvia	Ago-02	-6	-36	132
7	Corozal	Lluvia	Sep-02	-5.8	-34	92
8	Corozal	Lluvia	Oct-02	-5.3	-32	180
9	Corozal	Lluvia	Nov-02	-6.1	-43	111
10	Corozal	Lluvia	Dic-02	-1.21	0.2	18
11	Corozal	Lluvia	Mar-03	-1.8	-8	56
12	Ovejas	Lluvia	Mar-02	-2.4	-11	79
13	Ovejas	Lluvia	Abr-02	-4.8	-28	198
14	Ovejas	Lluvia	May-02	-12.5	-93	118
15	Ovejas	Lluvia	Jun-02	-9.8	-72	109
16	Ovejas	Lluvia	Jul-02	-9.5	-74	157
17	Ovejas	Lluvia	Ago-02	-3.9	-24	101
18	Ovejas	Lluvia	Sep-02	-4.4	-25	81
19	Ovejas	Lluvia	Oct-02	-6.2	-40	177
20	Ovejas	Lluvia	Nov-02	-7	-48	70
21	Ovejas	Lluvia	Dic-02	-1.5	-5	22
22	Ovejas	Lluvia	Mar-03	-2	-8	161

²² ROMERO, Luz y HERRERA, Héctor. Estudio hidrogeológico e hidroquímico del acuífero de Morroa, Sucre. En: PRIMER CONGRESO COLOMBIANO DE HIDROGEOLOGIA. (2004: Medellín). Memorias Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. 20 p.

- **Risaralda:** El estudio²³ realizado por (Vélez, Arias y García) se ejecutó en la zona de Pereira ubicada al Centro-Occidente de Colombia. Se tomaron 11 puntos de lluvia entre 930 y 4400 msnm, para el mes de octubre del 2002, dando como resultado la siguiente recta: $\delta D = 7.41 * \delta^{18}O + 3.41$ y $R = 0.99$. En este trabajo no se encontró correlación alguna entre las desviaciones isotópicas y la elevación, por lo tanto se tiene muy baja confiabilidad para identificar zonas de recarga.

Tabla 20. Datos Isotópicos de Precipitación Risaralda (2002)

#	Tipo de Muestra	Fecha	Altura	$\delta O18$	δD
1	Lluvia	Oct-02	1200	-9.8	-71
2	Lluvia	Oct-02	4000	-11.5	-80
3	Lluvia	Oct-02	1400	-11.6	-81
4	Lluvia	Oct-02	2100	-12.5	-91
5	Lluvia	Oct-02	930	-12.9	-93
6	Lluvia	Oct-02	3650	-13.5	-98
7	Lluvia	Oct-02	2050	-13.6	-95
8	Lluvia	Oct-02	2700	-13.8	-99
9	Lluvia	Oct-02	3250	-14.5	-104
10	Lluvia	Oct-02	4400	-14.6	-103
11	Lluvia	Oct-02	1500	-15.4	-113

- Otro estudio²⁴ isotópico (Hoyos y Vélez), se realizó en el departamento de Risaralda en 1998, con el fin de ampliar los conocimientos sobre la oferta y demanda hídrica en el área metropolitana de Pereira y Dosquebradas. Este proyecto hace parte de una propuesta para la determinación un modelo regional de infiltración y recarga de agua subterránea, en el que se dispuso

²³ VELEZ, Maria; ARIAS, Gabriel y GARCIA, Olimpo. Primeros resultados hidrogeológicos e hidrogeoquímicos del acuífero de Pereira. En: PRIMER CONGRESO COLOMBIANO DE HIDROGEOLOGIA. (2004: Medellín). Memorias Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. 13 p.

²⁴ HOYOS, Fabián y VELEZ, Maria. Determinación mediante isótopos ambientales de zonas y mecanismos de recarga en el departamento de Risaralda. En: IV CONGRESO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA. (1997: Medellín). Memorias IV Congreso de Hidrología Subterránea. p. 1270-1281.

de algunos datos isotópicos de aljibes, manantiales y agua lluvia, 37 en total; cuya ecuación se ajusta a la recta: $\delta D = 7.63 * \delta^{18}O + 4.4$. El gradiente orográfico para la desviación de ^{18}O es de $-0.16\text{‰}/100\text{m}$ y para el Deuterio $-1.21\text{‰}/100\text{m}$.

Tabla 21. Datos Isotópicos de Precipitación Risaralda (1997)

Muestra	Tipo-Muestra	$\delta O18$	Cota	Localización
E-28	Lluvias	-8	2500	Termales Botero
E-36	Lluvias	-11.9	3600	Finca Londoño
E-51	Lluvias	-7.9	2000	Manizales
R-60	Lluvias	-14.94	4500	Deshielo
R-128	Lluvias	-13.9	4000	Laguna del Otun
R-08	Manantial	-10.02	1460	Carretera Altagracia-Arabia
R-14	Manantial	-10.17	1410	La Popa - Carretera PEI - DQS
R-15	Manantial	-10.52	1900	Valle Cócora
R-20	Manantial	-10.86	2300	Valle Cócora
R-22	Manantial	-10.99	2530	Valle Cócora
R-24	Manantial	-10.68	2050	Valle Cócora
R-31	Manantial	-9.74	1350	PEI - ARM
R-32	Manantial	-9.61	1350	PEI - ARM
R-45	Manantial	-10.11	2150	Finca San Ramón S. R. C.
R-47	Manantial	-10.35	1950	E. Yarumal
R-48	Manantial	-9.2	1340	Carretera a Sta.Rita
R-50	Manantial	-9.75	1600	Carretera CHC-MZL
R-51	Manantial	-9.89	1700	Carretera CHC-MZL
R-53	Manantial	-12.02	3650	Carretera MZL-PMN
R-55	Manantial	-11.12	2550	Carretera MZL-BTA
R-56	Manantial	-10.76	2500	Carretera MZL-BTA
R-57	Manantial	-11.98	2720	Carretera MZL-BTA
R-58	Manantial	-11.7	2900	Carretera MZL-BTA
R-59	Manantial	-11.8	3950	Carretera MZL-BTA
R-60	Manantial	-14.49	4050	Carretera MZL-Murillo
R-62	Manantial	-14.95	4500	Carretera Ruiz-N.Sta.Isabel
R-65	Manantial	-14.37	4200	Carretera Ruiz-N.Sta.Isabel
R-70	Manantial	-11.16	2500	Camino Otun-La Pastora
AH-049	Manantial	-10.47	1900	Carretera MZL-BTA
AH-051	Manantial	-10.84	2350	Carretera MZL-BTA
AH-052	Manantial	-12.52	3500	Carretera MZL-BTA
AH-053	Manantial	-11.24	2800	Carretera MZL-BTA
AH-055	Manantial	-11.38	3000	Carretera MZL-BTA
AH-056	Manantial	-11.07	3600	Carretera MZL-BTA
AH-057	Manantial	-14.76	4000	Carretera MZL-PNN
AH-058	Manantial	-14.33	4400	Nevado Ruiz
AH-059	Manantial	-13.6	4400	Carretera MZL-PNN

- **Valle del Cauca:** La Corporación Autónoma Regional del valle del Cauca (CVC) realizó un estudio²⁵, en donde ha revisado y analizado toda la información hidrogeológica disponible de la zona sur del Valle del Cauca ubicada entre las cordilleras oriental y central, utilizando las técnicas isotópicas para mejorar el conocimiento de la recarga de los sistemas acuíferos para optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico. Para tal fin se utilizaron 5 estaciones pluviométricas ubicadas entre 1000 y 3000 msnm y un punto de monitoreo sobre el río Nima durante 2 meses (Marzo y Abril de 2003); teniendo en cuenta las variaciones isotópicas producidas por cantidad y estacionalidad de las lluvias. Los puntos de lluvia se encuentran sobre la línea meteórica local descrita por la ecuación: $\delta D = 8.35 * \delta^{18}O + 16.05$ y $R = 0.998$. El gradiente orográfico para la desviación de ^{18}O es de $-0.14\text{‰}/100\text{m}$ y para el Deuterio $-0.91\text{‰}/100\text{m}$.

Tabla 22. Datos Isotópicos de Precipitación Valle del Cauca

Elevación msnm	Fecha	δD	$\delta O18$	Localización	Precipitación (mm)
2605	15-Mar-03	-41.2	-7.03	La Sirena	62 a 147
3000	15-Mar-03	-40.6	-7.1	Albania	62 a 147
1170	15-Mar-03	-30.6	-5.29	Planta NIMA	62 a 147
2100	15-Mar-03	-30.1	-5.73	La Maria	62 a 147
1550	15-Mar-03	-20	-4.17	Tenjo	62 a 147
3000	15-Abr-03	-109.1	-15.24	Albania	132 a 307
1170	15-Abr-03	-96.4	-13.19	Planta NIMA	132 a 307
1550	15-Abr-03	-93.4	-13.07	Tenjo	132 a 307
2605	15-Abr-03	-92.5	-13.02	La Sirena	132 a 307
2100	15-Abr-03	-83.4	-11.73	La Maria	132 a 307

²⁵ MORALES, Guillermo y ORTEGON, Gloria. Hidrogeología e hidrogeoquímica en los acuíferos aluviales en la zona sur del Valle del Cauca. En: PRIMER CONGRESO COLOMBIANO DE HIDROGEOLOGIA. (2004: Medellín). Memorias Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. 11 p.

4.3.2. Rectas Meteóricas Nacionales. Desde 1992 hasta la fecha, se han propuesto algunas rectas meteóricas nacionales entre las que se encuentran:

(1992). En el estudio²⁶ (Hoyos, Velásquez y Vélez) se obtuvo una recta meteórica nacional, con base en 150 datos que corresponden a aguas lluvias de distintas regiones; a partir de los cuales se discriminaron tendencias locales que aunque siguen de manera general la tendencia global propuesta por Craig, son claramente diferentes a esta, y diferentes a la tendencia nacional. Las rectas son las siguientes:

Región Caribe: $\delta D = 8.31 * \delta^{18} O + 8.97$, $R = 0.987$ y $n = 31$

Región Andina: $\delta D = 8.2 * \delta^{18} O + 11.13$, $R = 0.982$ y $n = 11$

La recta meteórica de la región andina, esta conformada por datos de la cordillera central y oriental.

Cordillera Central: $\delta D = 7.91 * \delta^{18} O + 7.72$, $R = 0.957$ y $n = 64$

Los datos de la recta correspondiente a la cordillera central pertenecen a la zona central de Antioquia y el macizo Ruiz-Tolima.

Zona central de Antioquia: $\delta D = 7.67 * \delta^{18} O + 4.35$, $R = 0.976$ y $n = 35$

Macizo Ruiz-Tolima: $\delta D = 8.14 * \delta^{18} O + 11.25$, $R = 0.985$ y $n = 29$

Entre los datos que hicieron posible la obtención de la recta meteórica sobre la cordillera oriental, no se encuentran registros de las composiciones isotópicas de

²⁶ HOYOS, Fabián; VELASQUEZ, Elkin y VELEZ, Jaime. Variación regional en la composición isotópica del agua lluvia en Colombia. En: X SEMINARIO NACIONAL DE HIDRAULICA E HIDROLOGIA - XV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA. (1992: Cartagena). Memorias X Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Memorias Vol. I. p 263-272.

los Santanderes y otros departamentos que se extienden sobre la cordillera oriental colombiana.

Cordillera Oriental: $\delta D = 8.32 * \delta^{18}O + 12.46$, $R = 0.972$ y $n = 55$

La recta meteórica resultante para el país es la siguiente:

Recta Meteórica Colombiana: $\delta D = 7.96 * \delta^{18}O + 8.37$, $R = 0.992$ y $n = 150$

(1996). El estudio²⁷ realizado por Beatriz Elena Salazar en su tesis de grado, es una actualización de la recta meteórica propuesta por Fabián Hoyos⁷ (1992); en donde se recopiló toda la información disponible hasta la fecha del estudio y se obtuvo una recta meteórica para Colombia con base en 325 datos definida por la función: **$\delta D = 7.46 * \delta^{18}O + 3.18$ y $R = 0.989$.**

(2004). La integración de los análisis isotópicos obtenidos en los estudios²⁸ de hidrología isotópica realizados a nivel local en diferentes partes del territorio Colombiano, permitieron integrar una línea meteórica mas actualizada (2004). La información se obtuvo en más de 20 estudios realizados por el autor (Cesar Rodríguez) y además se aprovecho la información de 2 estaciones que poseen registros de análisis isotópico de muestras de precipitación tomadas en las ciudades de Bogota y Barranquilla (GNIP). La recta descrita por los datos recopilados fue la siguiente: **$\delta D = 8.03 * \delta^{18}O + 9.6$ y $R = 0.994$.** El gradiente orográfico para la desviación de ¹⁸O es de -0.24‰/100m y para el Deuterio -1.86‰/100m.

²⁷ SALAZAR, Beatriz. Gradiente Orográfico de la Composición Isotópica del Agua Lluvia en el Valle de Aburra. Medellín, 1996, 66 p. Tesis de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil. Área de Hidrología Isotópica.

²⁸ RODRIGUEZ, Cesar. Línea Meteórica Isotópica de Colombia. En: Revista Meteorología Colombiana. Numero 8 (Marzo, 2004); p. 43-51. ISSN 0124-6984.

4.3.3. Tabla de información general de los estudios isotópicos recopilados en Colombia. De todos los estudios recopilados se elaboró una tabla (ver Pág. 77-78), en la cual se encuentran los rangos de las desviaciones de D y ^{18}O , rangos de elevación y precipitación, junto con la información del tipo de muestra, región y entidad o autores por los cuales fueron realizados.

Los datos recopilados abarcan gran parte del territorio nacional, exceptuando la zona centro oriental del país que corresponde a los departamentos que conforman los llanos orientales, Arauca, Vichada y Meta donde no se estudia el efecto orográfico; la zona sur y parte sur occidental conformada por Amazonas, Vaupés, Caquetá, Putumayo, Nariño, sur del Huila y Cauca. La fecha de los estudios data desde 1992 hasta el 2004, encontrándose como los más recientes Valle del Cauca, Sucre, Guajira, Pereira y Santander. El dato de desviación mas empobrecido se registro en el Nevado del Ruiz con valores de -15.9 para ^{18}O y -118 para D, resultados lógicos para tan bajas temperaturas, y el registro mas enriquecido tiene lugar en Sucre con un valor de desviación -1.21 para ^{18}O y 0.2 para D, zona muy cercana a la costa atlántica; según esto el rango de desviaciones que se pueden observar en el relieve Colombiano puede oscilar entre los 0 msnm a los 4500 msnm, obedecen a los valores de desviaciones anteriormente mencionados.

Los datos proporcionados por el GNIP hacen referencia a eventos de precipitación, a los cuales se les realizó un análisis isotópico que sirvió para clasificar el mes en el cual fue recolectada la muestra en las estaciones de Barranquilla y Bogota, respectivamente desde 1971 hasta el 2002. Estos datos se pueden encontrar en la base de datos del GNIP²⁹.

²⁹ Global Network of Isotopes in Precipitation. www.iaea.org

Tabla 23. Tabla de información general de los estudios isotópicos recopilados

Fuente	Region	Fecha	Rango δO18	Rango δD	Rango Elev.	Rango Prec.	Tipo de Muestra
Determinación Mediante Isotopos de Zonas y Mecanismos de Recarga en el Departamento de Risaralda.F. Hoyos, Maria V.Velez.	N.Ruiz	No especifica	-13.9 a -14.95	-101.6 a -109.67	4000-4500	No especifica	No especifica
	Dpto.Risaralda	No especifica	-7.9 a -12.52	-55.88 a -91.13	1100-4000	1600 a 5000 mm anual	No especifica
Datos GMP	Est.Barranquilla	15/07/71-15/12/89	-3 a -7.6	-10.1 a -50.9	14		Eventos
	Est.Bogota	15/08/71-15/12/02	-1.3 a -14	-8.6 a -109.8	2547	3 a 218 mm	
Tesis Beatriz Salazar, Proyecto de Grado 1996 U.N.M.	Guajira		-3.14 a -5.93	-18.5 a -39.4			No especifica
	Boyaca (Tota).		-6.91 a -11.74	-61.1 a -88			
	Antioquia		-5.04 a -11.73	-33.4 a -84.3	20-2600		
	Atlantico-Bolivar	No especifica	-5.4 a -8.45	-38 a -60.5			
	Cundimarca		-6.88 a -11.65	-49.4 a -81.2	1320-3500		
	Manizales-Ruiz		-7.9 a -15.8	-51.5 a -117	800-4200		
Hidrogeoquímica de los acuíferos aluviales de la zona sur del Valle del Cauca, CVC, INGEOMINAS, IRD.	Valle del Cauca	15/03/03-15/04/03	-4.17 a -15.24	-20 a -109	1000-3000	62 a 307mm	M.Compuesta
Primeros Resultados Hidrogeológicos e Hidrogeoquímicos del acuífero de pereira, M.E Velez, G.F. Arias, O.García, INGEOMINAS, IRD.	Pereira	00/02/2002	-9.8 a -15.4	-71 a -113	930-4400	1700 a 2600 mm anual	M.Compuesta durante un mes
Inventario de los acuíferos de Maricao por medio de la Hidroquímica, CORPOGUA, IIRA, INGEOMINAS, IRD.	Guajira	00/10/02 y 00/12/02	-2.6 a -5.9	-9.5 a -36	40-600	350 a 1200 mm anual	M.Compuestas
Estudio Hidrogeológico e Hidroquímico del Acuífero de Mortoa, CARSUCRE, INGEOMINAS, IRD.	Sucre	00/03/02-00/03/03	-1.21 a -12.5	0.2 a -93	173-300	18 a 190mm	M.Compuesta
Base de datos GPHUIS.	Santander	1994 -23/02/03	-3.73 a -10.55	-21.7 a -75.3	946-3200	700 a 2200 mm anual	M.Compuesta

Fuente	Region	Fecha	Rango δO18	Rango δD	Rango Elev.	Rango Prec.	Tipo de Muestra
Linea Meteorica Isotopica Colombiana, Cesar O Rodriguez.	Boyaca (Tota).	No Especifica	-10 a -11.95	-74 a -79	2790-3000	No Especifica	No Especifica
	Guavio (Cundinamarca)		-7.5 a -8.8	-50 a -60	1780-2030		
	Rio Negro Antioquia		-10.6	-73	2700		
	Santa Marta		-3.5 a -4	-18 a -22	20-40		
	R. Palagua Pto.Boyaca		-4.8 a -6	-41 a -49	1250-1420		
	N.Ruiz		-13.4 a -15.9	-104 a -118	4490-4980		
	Santande Socorro-S.Gil		-7.05	-49	1450		
	Manizales		-12.1 a -13.1	-82.5 a -88.5	3550-4000		
	Barranquilla		-3.6 a -5.3	-25 a -40	0-15		
	Sucre		-5.4 a -7.3	-38 a -51	160-170		

5. ANALISIS DE DATOS

En este capítulo se analizan los datos obtenidos a través del muestreo de precipitación realizado en campo para detectar posibles alteraciones sobre el agua recolectada. La información isotópica recopilada en la región se examina para proponer una recta meteórica local y estimar una posible zona de recarga producto de las aguas lluvias procedentes de la parte alta de la cuenca.

5.1 ANALISIS DE LA INFORMACION TOMADA EN CAMPO (Muestreo de precipitación)

La información tomada en campo corresponde a los volúmenes y parámetros físico-químicos de la precipitación durante los seis meses de muestreo (Octubre de 2004 a Marzo de 2005). Los volúmenes de precipitación muestreados, corresponden al periodo de tiempo comprendido entre muestreos, que se extendía hasta el día 11 de cada mes, y no al mes calendario.

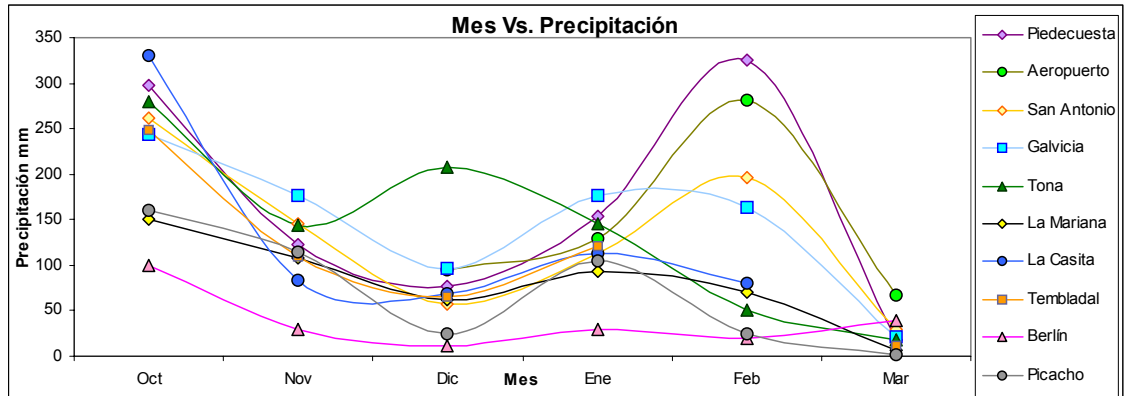
5.1.1 Volúmenes de precipitación en la zona de estudio. Al comparar la medición de campo tomada del depósito colector, con la medida registrada en el pluviómetro de la estación durante el mes de muestreo, se observaron diferencias por exceso y por defecto en todas las estaciones, las cuales se atribuyen a los siguientes errores:

- El depósito colector de lluvia está graduado al litro que son 27.5 mm del pluviómetro convencional, comparado con la probeta o la regla de medida utilizada en las estaciones pluviométricas que están graduadas a 0.1 mm y 1mm respectivamente.

- La medida del volumen se tomaba desde la superficie de la capa de aceite utilizado para evitar la evaporación, ya que la interfase agua-aceite no era visible.
- Cuando se miden volúmenes de precipitación menores, existe la probabilidad de que haya ocurrido alguna evaporación que disminuya el volumen del agua muestreada.
- En meses de poca precipitación es más difícil hacer la medición exacta, dada la forma del recipiente, además en estos periodos se aumenta el riesgo de evaporación.
- Las diferencias físicas entre los dos tipos de colectores, captación y forma. Ya que por el sistema de captación la salpicadura era inminente y el colector no posee una forma regular patronada a una menor escala para realizar mediciones uniformes.

Durante los seis meses de muestreo fue evidente un comportamiento inusual de la precipitación en los periodos de invierno y verano, ya que en los meses de Enero y Febrero que por lo general son secos; se presentaron eventos lluviosos que alteraron el ciclo anual de la precipitación. Esto se puede ver claramente en la Figura 18, que representa la variación de la precipitación durante el periodo de muestreo; también se observa que en el mes de Febrero en las estaciones que se encuentran hasta los 1800 msnm (Piedecuesta, Hidráulica, IDEAM, Aeropuerto, San Antonio, La Galvicia), la cantidad de agua precipitada fue considerablemente mayor que la registrada en las estaciones ubicadas desde los 1800 msnm hasta la parte alta de la cuenca (Tona, La Mariana, La Casita, Escuela Tembladal, Picacho), representadas las primeras con líneas ascendentes y las segundas con líneas descendentes en dicho mes.

Figura 19. Variación de la precipitación durante el periodo de muestreo 2004-2005



5.1.2 Parámetros Físico-Químicos en la precipitación. La variación del pH durante el periodo de muestreo se mantuvo en un rango de 5.05 a 6.66; lo que indica un carácter ácido de las lluvias en la zona de estudio. En la estación San Antonio, en el mes de Febrero, el pH medido fue de 6.93, muy elevado para la tendencia general en ese mes, lo que puede ser indicio de algún factor de alteración. Como se observa en la Figura 18, en los meses de Enero, Febrero y Marzo caracterizados por algunos eventos de abundantes lluvias, el pH mostró una disminución en la mayoría de las estaciones, comparado con el resto de los meses de muestreo.

Figura 20. Variación mensual del pH 2004-2005

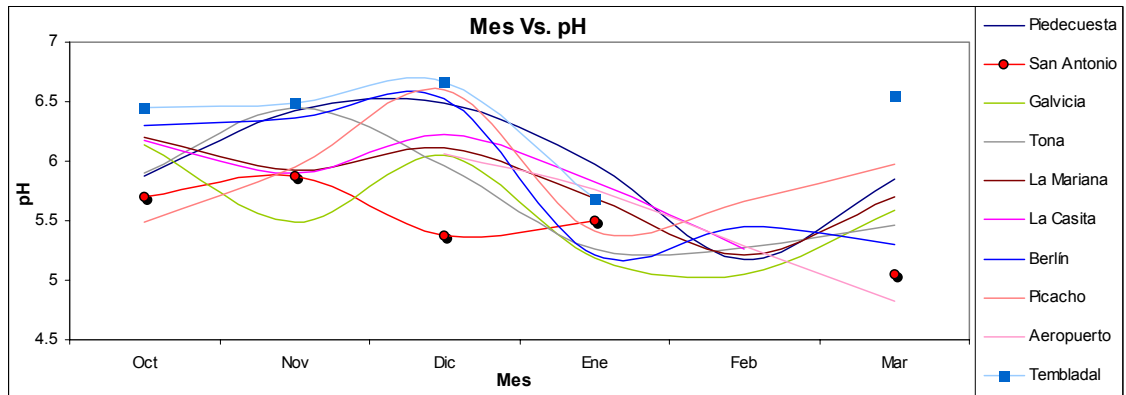
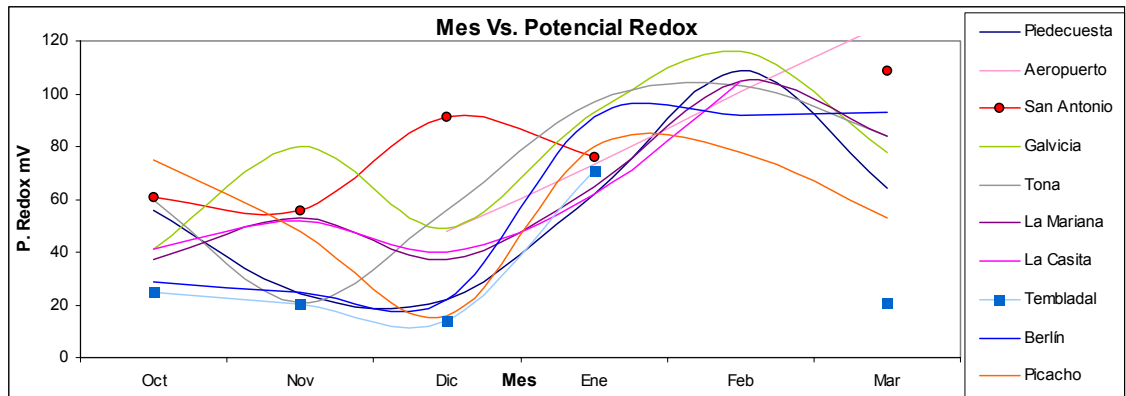


Figura 21. Variación mensual del Potencial Redox 2004-2005



El potencial redox³⁰ oscilo en un rango de 20 a 116 mV. Este parámetro puede servir como indicativo de la calidad del agua debido a que es un indicador de condiciones deterioradas o cambios excesivos en la química de esta. Un nivel bajo en el potencial redox hace referencia a un agua con alta cantidad de materia orgánica, lo que posiblemente se presentó en la estación San Antonio con un valor de 6 mV en el mes de Febrero. Estos valores bajos de Potencial redox se ven reflejados en altos valores de pH haciendo una comparación con las Figuras 19 y 20.

Los parámetros salinidad y electroconductividad se encuentra relacionados entre si, debido a que una muestra de agua cargada en sales conlleva a una alta electroconductividad, correspondencia que se puede observar en las Figuras 21 y 22, que representan la variación de la salinidad y la electroconductividad durante el periodo de muestreo respectivamente. El rango de variación para la salinidad va desde 3.6 mg/l hasta 42.5 mg/l, y de 3.6 μ S a 80 μ S para la electroconductividad. Normalmente el agua de precipitación presenta unos límites máximos de salinidad que oscilan entre 80 y 95 mg/l, valores por encima de estos serian un posible indicio de contaminación local, como en el caso del Picacho con

³⁰ En: <http://www.acuariofilia.net/manual/34.asp>

185 mg/l en Octubre y San Antonio con 540 mg/l en febrero con presencia de mal olor y turbiedad. En el resto de meses el comportamiento de estos parámetros fue estable durante el muestreo.

Figura 22. Variación mensual de la salinidad 2004-2005

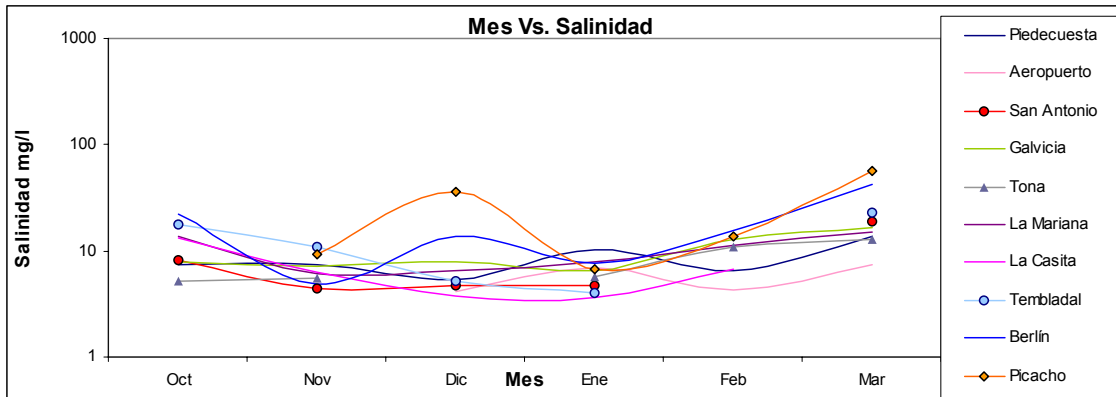
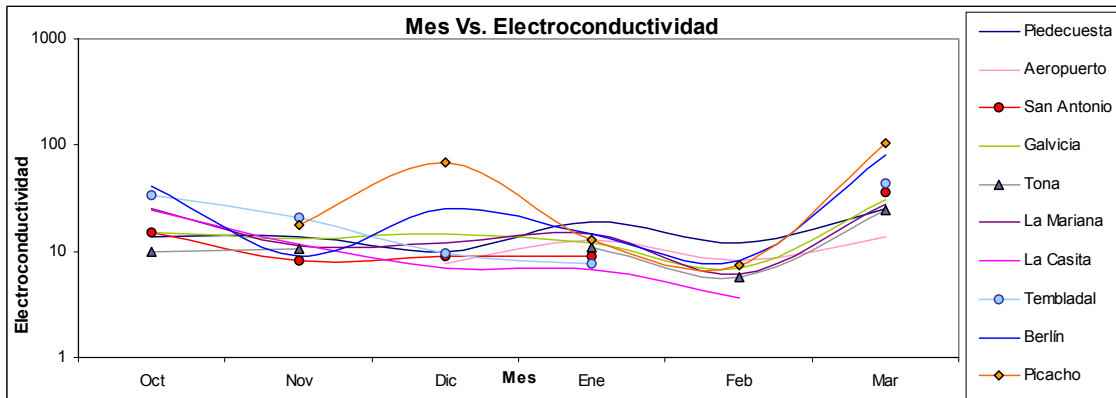


Figura 23. Variación mensual de la Electroconductividad 2004-2005



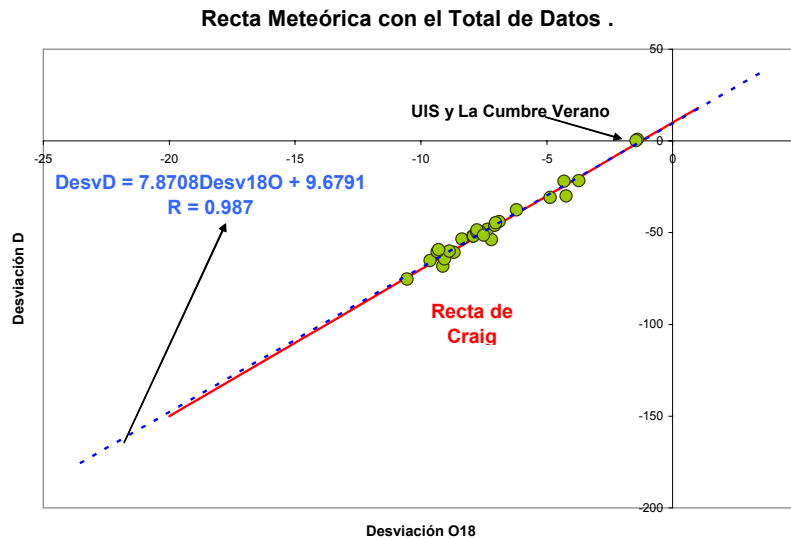
La medición de la temperatura en campo no arrojo resultados concluyentes que ameritaran ser graficados, ya que para nadie es desconocido que la temperatura disminuye a medida en que aumenta la altitud; y esta dependía de la hora y condiciones climáticas en el momento del muestreo.

5.2 RECTA METEORICA LOCAL Y COMPARACIONES CON OTRAS RECTAS EN COLOMBIA

Inicialmente se analiza el total de datos disponibles para la región. (Tablas 13, 14 y 15, ver capítulo 4), para luego, individualmente en cada estudio (1994, 2002-2003), con un argumento justificado, depurar los datos que están alterados y así proponer una recta meteórica local.

5.2.1 Obtención de la recta meteórica local. Se analizaron un total de 29 datos ubicados desde los 950 hasta los 3200 msnm sobre la cuenca superior del río Lebrija, entre los que se encuentran 9 manantiales del estudio Navía y Suárez (1994), 6 de precipitación y 14 manantiales del estudio Gómez y Anaya (2002-2003). Estos se graficaron para observar su comportamiento en conjunto sobre una recta meteórica inicial, descrita por la ecuación: $\delta D = 7.87 \cdot \delta^{18}O + 9.6791$, $R = 0.987$, $n = 29$ datos, en la que se puede observar (Grafica 11) alguna semejanza con la recta de Craig.

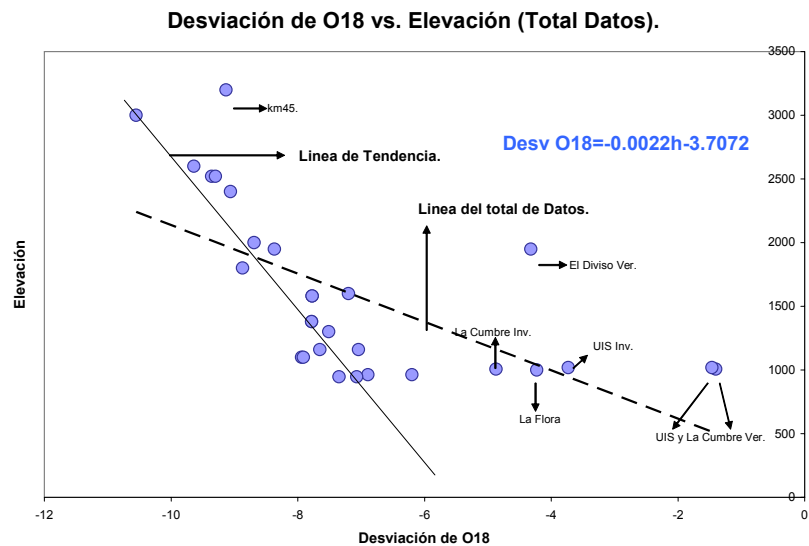
Figura 24. Recta meteórica preliminar



En esta gráfica se pueden apreciar dos puntos demasiado enriquecidos en δD y $\delta^{18}O$, algo que no es muy común en regiones andinas como la nuestra y tampoco se observan valores similares, aún en estudios de regiones muy cercanas a la costa (Guajira, Barranquilla), sin embargo se encuentran sobre la Recta Meteórica Mundial (LMM) propuesta por Craig $\delta D=8*\delta^{18}O+10$, en color rojo. Estos puntos son, Estación UIS verano y Estación La cumbre verano.

En la Figura 24 se pueden observar dos líneas, una continua que lleva el nombre de línea de tendencia; esta es la línea que representa la tendencia general de los puntos que se encuentran en la izquierda de la figura. Y otra punteada que representa la tendencia de la totalidad de los puntos allí expuestos, con una notoria disminución en la pendiente, causada por 7 puntos cuyos nombres se encuentran ilustrados y que obedecen a una tendencia distinta a la de los demás. Idéntico comportamiento presenta el Deuterio.

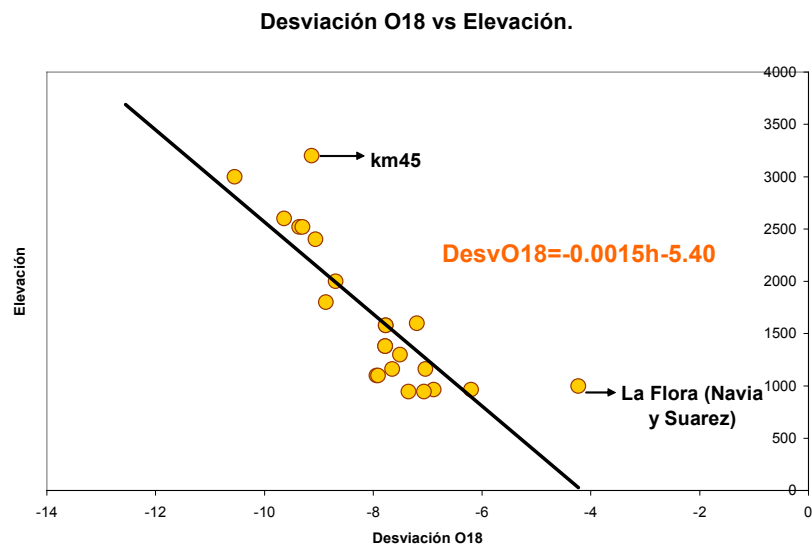
Figura 25. Desviación de ^{18}O vs. Elevación con el total de datos



- **Variaciones isotópicas observadas en la zona de estudio:** En la figura 25 se muestra el efecto orográfico de los manantiales localizados a diferentes alturas,

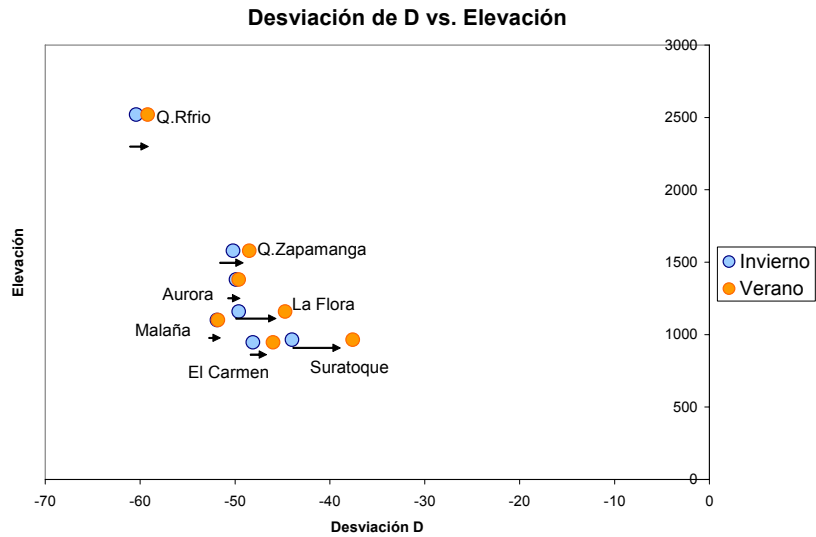
corroborando la hipótesis de que el agua de los manantiales refleja un comportamiento similar con el agua lluvia de la zona. Los puntos Manantial La Flora y km45 no siguen la tendencia lineal de los demás. El punto km45 no cumple con el efecto orográfico ya que, ubicado a 3200 msnm tiene valores de desviación mayores que uno ubicado a 2600 msnm en el mismo estudio. El punto de La flora presenta una caída súbita en su valor de desviación debido a que, de 1300 a 3000 msnm hay una diferencia de $-3.04\text{‰}\delta^{18}\text{O}$, y de 1300 a 1000 msnm que es la elevación a la cual se ubica La Flora la diferencia es de $-3.28\text{‰}\delta^{18}\text{O}$. De lo anterior se puede concluir que los dos puntos se encuentran alterados y deben descartarse.

Figura 26. Desviación de ^{18}O vs. Elevación, de los manantiales 1994, 2002-2003



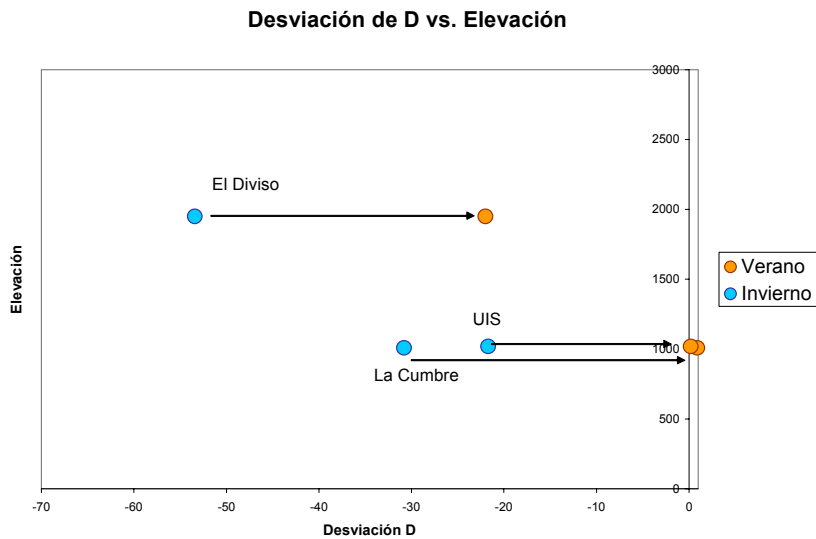
En el estudio de los manantiales (2002-2003) se tomaron muestras de verano e invierno, en las cuales se pueden distinguir algunas diferencias que podrían expresar un efecto estacional, en donde la precipitación correspondiente al periodo de invierno presenta un empobrecimiento en las desviaciones de ^{18}O y D con respecto a las desviaciones en el periodo de verano, estas variaciones son observables en la Figura 26.

Figura 27. Desviación de D vs. Elevación, de manantiales estudio (2002-2003)



El efecto estacional observado sobre los manantiales, también es evidente en las aguas de precipitación, empobrecidas en invierno y enriquecidas en verano, pero con diferencias muy grandes en sus desviaciones correspondientes, como se aprecia en la Figura 27.

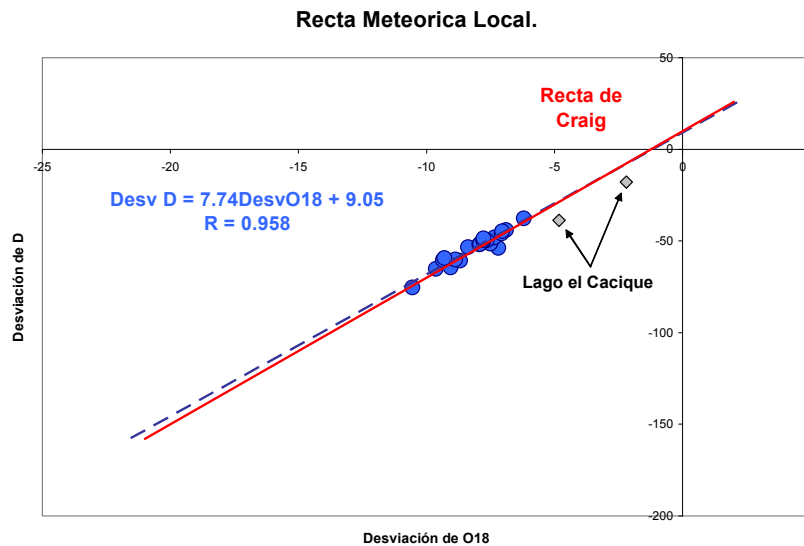
Figura 28. Desviación de D vs. Elevación, con puntos de precipitación.



El punto El Diviso en verano se encuentra mas enriquecido que la estación La Cumbre en invierno habiendo una diferencia de 942 m de elevación entre uno y otro como se puede observar en la Figura 27. Haciendo una comparación entre la estación El Diviso de invierno que se encuentra a una altura de 1950 msnm y el km24 del estudio de Navía y Suárez ubicado a 2000 msnm, sus desviaciones y alturas son relativamente similares, por lo que se puede concluir que sus desviaciones son características del intervalo de altura antes mencionado.

Construyendo la Recta Meteorica local (Figura 28) sin los puntos descartados se obtiene la siguiente ecuación: $\delta D = 7.74 * \delta^{18} O + 9.05$, $R = 0.958$ y $n = 22$ datos, ver Tabla 25.

Figura 29. Recta meteorica local (LML)



Los dos puntos pertenecientes al lago el Cacique son insuficientes para proponer una línea de evaporación, pero sus desviaciones son representativas de aguas superficiales expuestas a constante evaporación, que al ser comparadas con

algunos de los puntos de precipitación que presentaron desviaciones similares confirmaron su eliminación .

Tabla 24. Puntos seleccionados para la elaboración de la LML.

LOCALIZACION	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	TIPO DE MUESTRA
Paramo de Berlin	-10.55	-75.3	Manantial
Km 34	-9.64	-65.2	Manantial
Km 29	-9.06	-64.4	Manantial
Km 24	-8.69	-60.7	Manantial
Km 18	-8.87	-60	Manantial
Km 12	-7.2	-53.8	Manantial
Km 15	-7.51	-51.4	Manantial
Estacion el Diviso Inv.	-8.37	-53.4	Precipitacion
Q.Suratoque	-7.35	-48.1	Manantial
Q. El Carmen	-6.89	-44.0	Manantial
Q.Malaña	-7.94	-51.9	Manantial
Q. La Flora	-7.65	-49.6	Manantial
Q. La Aurora	-7.78	-49.9	Manantial
Q.La Cascada Zmga	-7.77	-50.2	Manantial
Río Frío Qda. Providencia	-9.36	-60.4	Manantial
Q.Suratoque	-7.07	-46.0	Manantial
Q. El Carmen	-6.20	-37.6	Manantial
Q.La Malaña	-7.91	-51.8	Manantial
Q.La Flora	-7.04	-44.7	Manantial
Q.La Aurora	-7.78	-49.6	Manantial
Q.La Cascada Zmga	-7.77	-48.5	Manantial
Río Frío Q. Providencia	-9.30	-59.2	Manantial

Las Figuras 29 y 30, muestran las tendencias de las desviaciones de ^{18}O y D con la Elevación, variando respectivamente cada una en $-0.15\text{‰}\delta^{18}\text{O}$ y $-1.21\text{‰}\delta\text{D}$ por cada 100 metros de altura, los cuales se encuentran dentro del rango propuesto por Vogel y Moser³¹.

³¹ PUBLICACIONES DEL INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA, Op. cit. Pág. 210.

Figura 30. Desviación de ^{18}O vs. Elevación, datos LML

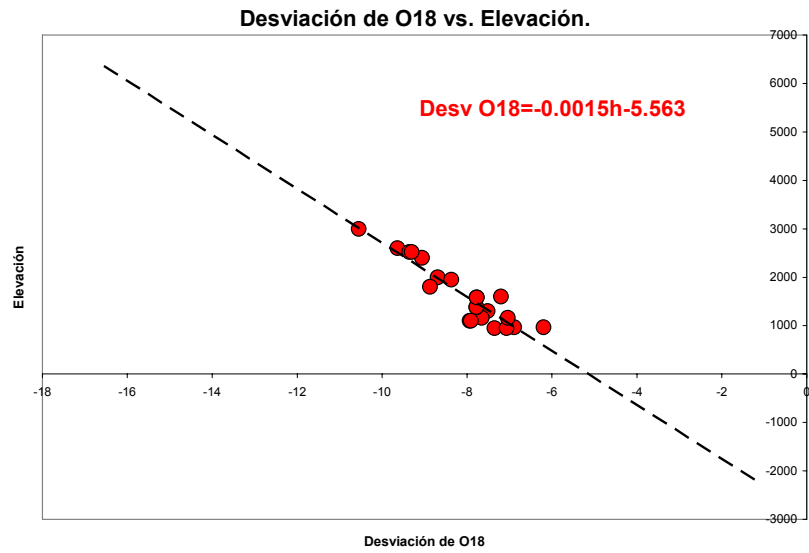
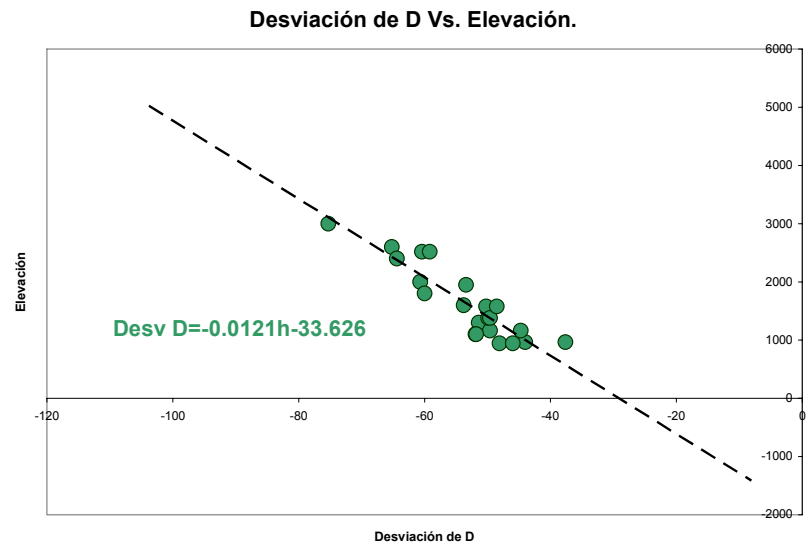


Figura 31. . Desviación de D vs. Elevación, datos LML



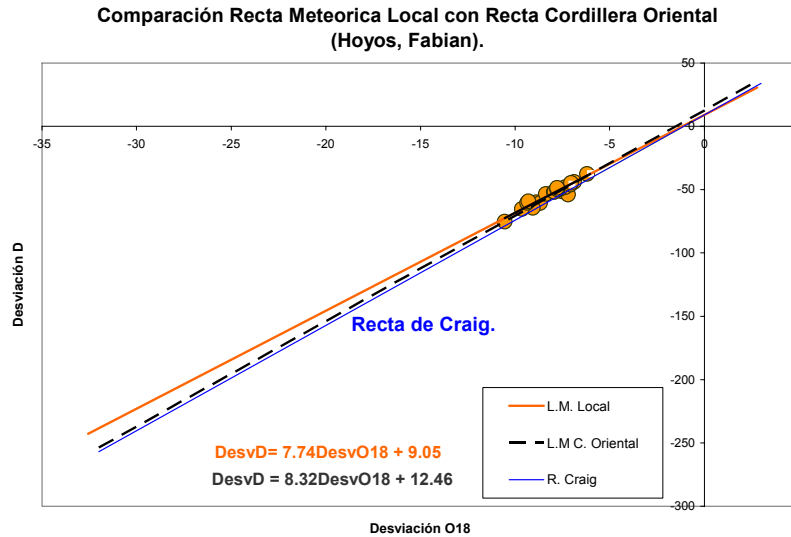
5.2.2 Comparación de la recta meteórica local con las rectas meteóricas en Colombia. Los parámetros de las rectas meteóricas obtenidas para diferentes regiones del país, presentan diferencias que pueden ser explicadas de manera inicial en función de la procedencia de las masas húmedas que dan origen a las precipitaciones en cada una de las regiones.

Es conveniente aclarar que la recta meteórica correspondiente a la cordillera oriental desarrollada por Hoyos en 1992, no localiza puntos de muestreo sobre la zona Nor-Oriental del país, lo cual produce diferencias apreciables entre las rectas, debido a que los fenómenos que generan la precipitación varían de una región a otra.

Entre las rectas meteórica local y la cordillera oriental observadas en la Figura 31, es notorio el mayor valor del exceso de Deuterio sobre la ecuación de la recta oriental, el cual representa una fuerte influencia de masas húmedas procedentes del Caribe según Hoyos³². La recta meteórica local también puede ser influenciada por masas oceánicas transportadas por los vientos procedentes del Caribe u otras regiones; las cuales dejan huella sobre las desviaciones isotópicas de las precipitaciones locales. El menor valor del exceso de Deuterio respecto a la recta de la cordillera oriental también puede ser interpretado como resultado de un mayor peso en la correlación de los datos que conforman a la recta meteórica local, correspondientes a las precipitaciones de origen convectivo presentes en algunos sectores de la zona de estudio, ocasionando un descenso en los valores de los coeficientes que conforman a la recta meteórica local.

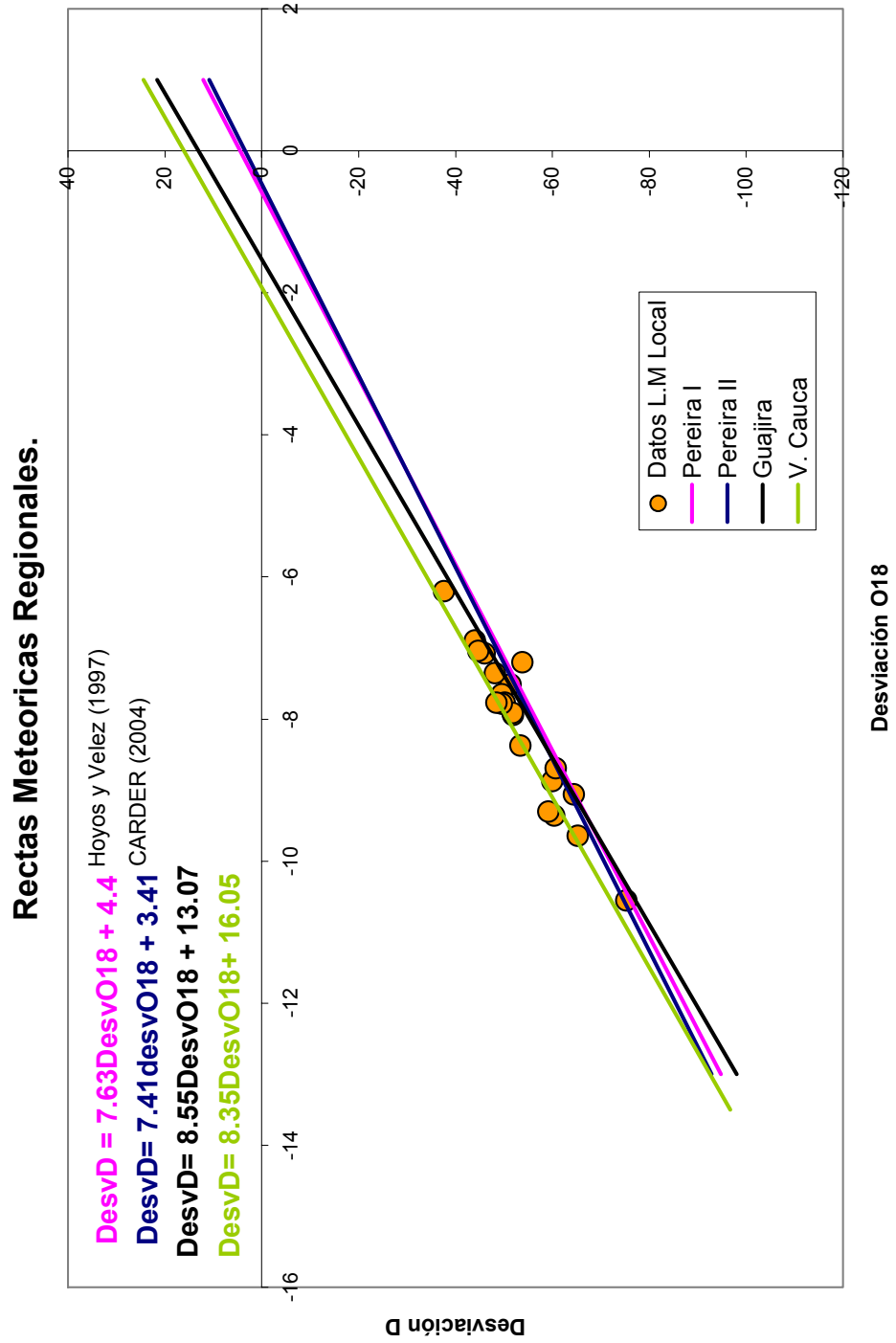
³² HOYOS, Fabián; VELASQUEZ, Elkin y VELEZ, Jaime, Op. cit. Pág. 270.

Figura 32. Rectas meteóricas, local y de la Cordillera Oriental



La Figura 32 hace referencia a las rectas meteóricas desarrolladas en otras regiones del país comparadas con los datos disponibles en la ciudad de Bucaramanga, en donde se aprecian excesos de Deuterio elevados en las rectas meteóricas pertenecientes a la Guajira y Valle del Cauca en comparación a otras regiones del país, con valores de 13.07‰ y 16.05‰ respectivamente, lo cual puede estar influenciado por su cercanía a las costas. Lo contrario ocurre en regiones como Pereira en la cual el exceso de Deuterio tiene un valor de 3.41‰. Esto demuestra que ninguna recta se ajusta a los datos locales, confirmando así la necesidad de tener un estudio isotópico regional que describa las fenómenos que modifican las desviaciones de una zona determinada y sobre todo en un país que presenta tantas heterogeneidades, haciéndolo susceptible a grandes variaciones.

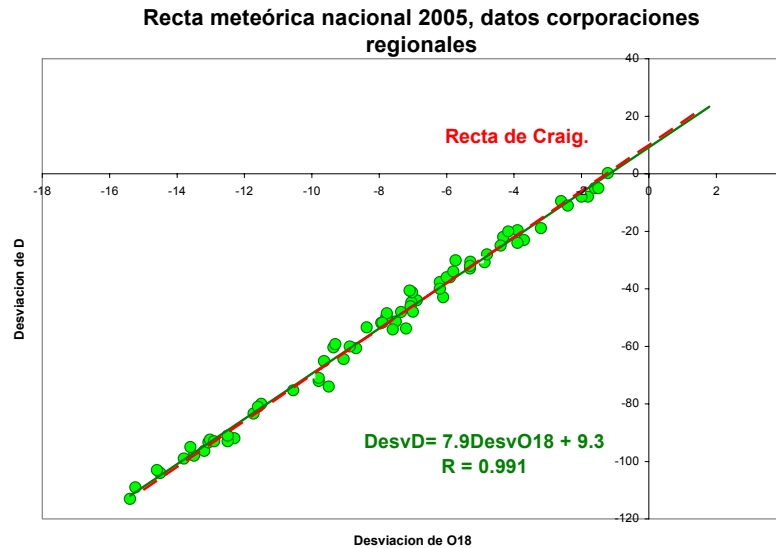
Figura 33. Rectas meteóricas Regionales



Los estudios isotópicos más recientes desarrollados en Colombia por algunas corporaciones regionales desde el año 2002 a 2004 (Santander, Valle del Cauca, Risaralda, Sucre y Guajira), sirvieron para proponer una recta meteórica nacional, ya que en estos estudios los datos poseen la información necesaria (localización exacta, fecha de muestreo, dato de precipitación y tipo de muestra) para ser analizados. La dispersión de los estudios sobre el territorio nacional abarca una gran zona de norte a sur, lo que puede dar una idea a gran escala del comportamiento isotópico a nivel nacional, información que no es recomendable para su aplicabilidad en estudios locales, debido a que no representa fielmente los fenómenos que generan la precipitación en una zona determinada.

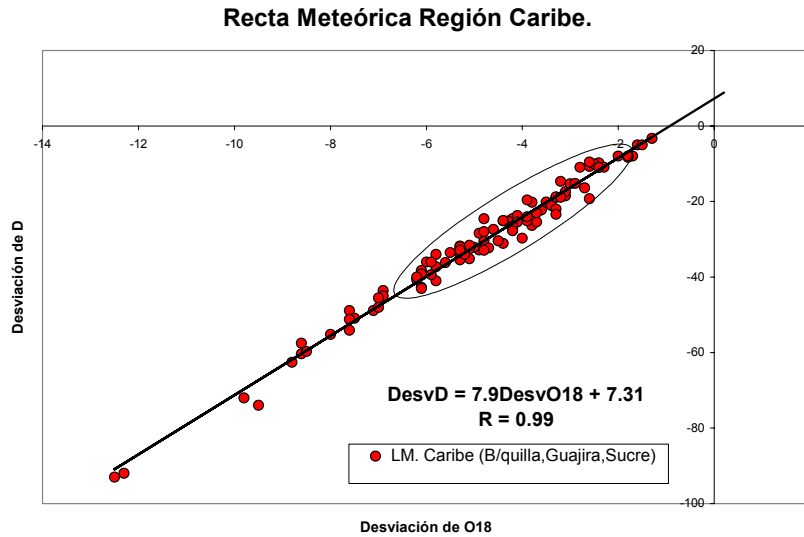
La recta consta de 68 datos; 22 de Santander, 4 de la Guajira, 26 de Sucre, 11 de Risaralda y 10 del valle del Cauca, los cuales describen la ecuación: $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 9.3$ (Figura 35), recta similar a la propuesta por Craig $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$. En esta recta es notoria la mayor dispersión de los datos a lo largo de la línea, encontrando valores de desviación bastante enriquecidos como empobrecidos representativos cada uno de estos a su región de procedencia. A esta escala también pueden ser evidentes la variación producida por el fenómeno de latitud y continentalidad.

Figura 34. Recta meteórica nacional, basada en los estudios mas recientes (2002-2004)



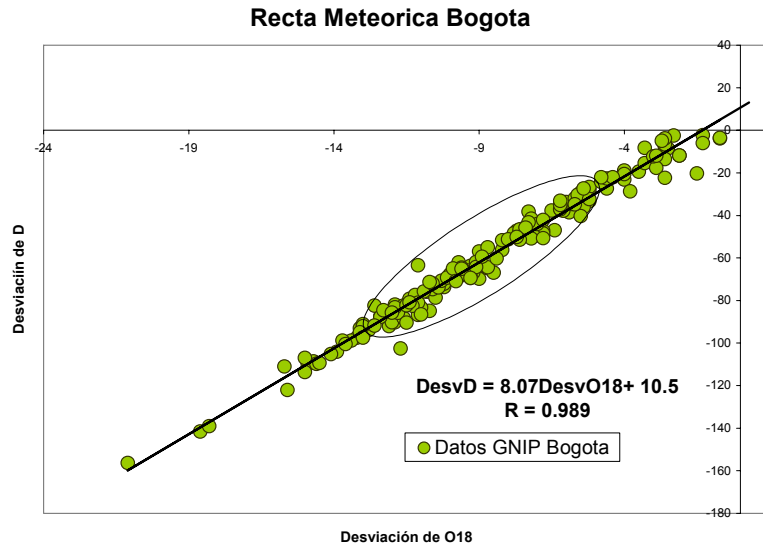
La recta meteórica propuesta para la región Caribe (Figura 34), describe la ecuación $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 7.31$ con un total de 110 datos que corresponden a 84 del GNIP de Barranquilla, 22 al estudio de Sucre y 4 de la Guajira. En esta recta se puede apreciar que en la mayoría de puntos se encuentran con desviaciones isotópicas bastantes enriquecidas en comparación con desviaciones registradas al interior del país, estas desviaciones para el caso del ^{18}O se encuentran en un rango que va desde -2‰ hasta -6‰ , valores normales debido a su cercanía al mar y temperatura estable; y otros con desviaciones empobrecidas que según la información registrada en las fuentes de datos, corresponden a meses de eventos aislados con fuertes precipitaciones donde se evidencia un posible efecto de cantidad.

Figura 35. Recta meteórica de la región Caribe



Con 174 datos disponibles en la estación del GNIP localizada en la ciudad de Bogota desde 1971 hasta el 2002, se realizó una recta meteórica para dicha ciudad la cual esta descrita por la función $\delta D = 8.07\delta^{18}O + 10.5$ (Figura 35); en donde son evidentes los valores de desviación isotópica mas empobrecidos en comparación con la recta meteórica de la región Caribe (Figura 34), estos valores de desviación oscilan entre -6‰ y -12‰ para el ^{18}O y -50‰ a -80‰ para el Deuterio. Las desviaciones isotópicas que se encuentran más enriquecidas pueden ser debidas a grandes cambios de temperatura y al origen de los frentes húmedos que confluyen en la zona para generar la precipitación, esto hace también que el rango de desviaciones sea más grande que el de la región Caribe.

Figura 36. Recta meteórica Bogota, datos estación GNIP



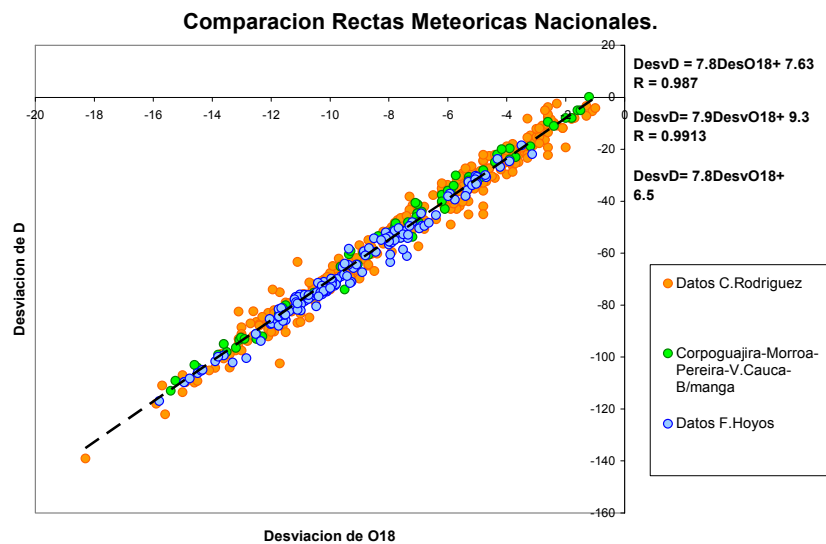
Las rectas meteóricas presentadas a continuación se realizaron con algunos de los datos que utilizaron los autores para presentarlas en sus estudios de origen (Cesar Rodríguez y Fabián Hoyos). En la Figura 36 se muestran tres rectas meteóricas que representan el comportamiento isotópico a nivel nacional, descritas por las siguientes ecuaciones:

- (I) Datos estudios Cesar Rodríguez $\delta D = 7.8\delta^{18}O + 7.63$ y $R = 0.987$ $n = 303$
- (II) Datos estudios corporaciones 2005 $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 9.3$ y $R = 0.991$ $n = 68$
- (III) Datos estudios Fabián Hoyos $\delta D = 7.8\delta^{18}O + 6.5$ y $R = 0.984$ $n = 153$

En donde los parámetros de la recta (I) están influenciados por la procedencia en su mayoría de datos del GNIP de las estaciones de Bogota y Barranquilla, apartándose de una tendencia general que describa el comportamiento isotópico a nivel nacional. De la recta (III) es claro un menor valor del exceso de Deuterio en comparación con las rectas (I) y (II), efecto que se puede atribuir a que mucha de

la información isotópica recopilada de este autor (Fabián Hoyos) en el presente proyecto, es procedente de la cordillera central, la cual aporta poco peso a desviaciones isotópicas enriquecidas como las que se pueden encontrar en las regiones costeras. Entre las tres rectas la numero (II) es la que mas se acerca a la tendencia lineal propuesta por Craig, debido a que en ella están representadas muchas mas zonas del territorio nacional en proporciones similares, caracterizadas por un gran rango de desviaciones que fluctúan entre -3‰ y -14‰ para el ^{18}O .

Figura 37. Comparación de rectas meteórica nacionales con base en datos de la recopilación



5.3 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA

Con la información isotópica de drenes, pozos y piezómetros ubicados en su mayoría en el Área Metropolitana de Bucaramanga, es posible realizar una comparación de sus desviaciones isotópicas, con la información de los datos que conforman a la recta meteórica local, mediante las Figuras 36 y 37, de Desviación ^{18}O y D vs. Elevación.

En las figuras 36 y 37 se observan dos zonas de agrupación de los puntos de desviación isotópica pertenecientes a las aguas subterráneas, lo cual es un indicio de que existen dos posibles zonas preferenciales de infiltración en la parte alta de la cuenca. La zona I tiene un área de de recarga localizada aproximadamente entre los 2000-1700 msnm y para la zona II entre los 1500-1200 msnm.

El punto Oriental de Transportes posee las desviaciones isotópicas mas empobrecidas del grupo de datos que pertenecen a la zona I, esto se puede deber a que esta agua procede de una área de infiltración que se ubica a una altura mayor que la zona I, dando lugar a una posible tercera zona de infiltración entre los 2400 y 2200 msnm, hecho que se debe estudiar con mayor rigurosidad posteriormente. Otra razón para explicar este fenómeno es que el agua de la estación Oriental de Transportes sea característica de desviaciones isotópicas de precipitaciones que se desarrollen en lugares de mayor altitud y por algún tipo de flujo superficial lleguen a hasta la zona I de recarga.

Figura 38. Identificación de zonas de recarga tomando como referencia la desviación de ^{18}O vs. Elevación

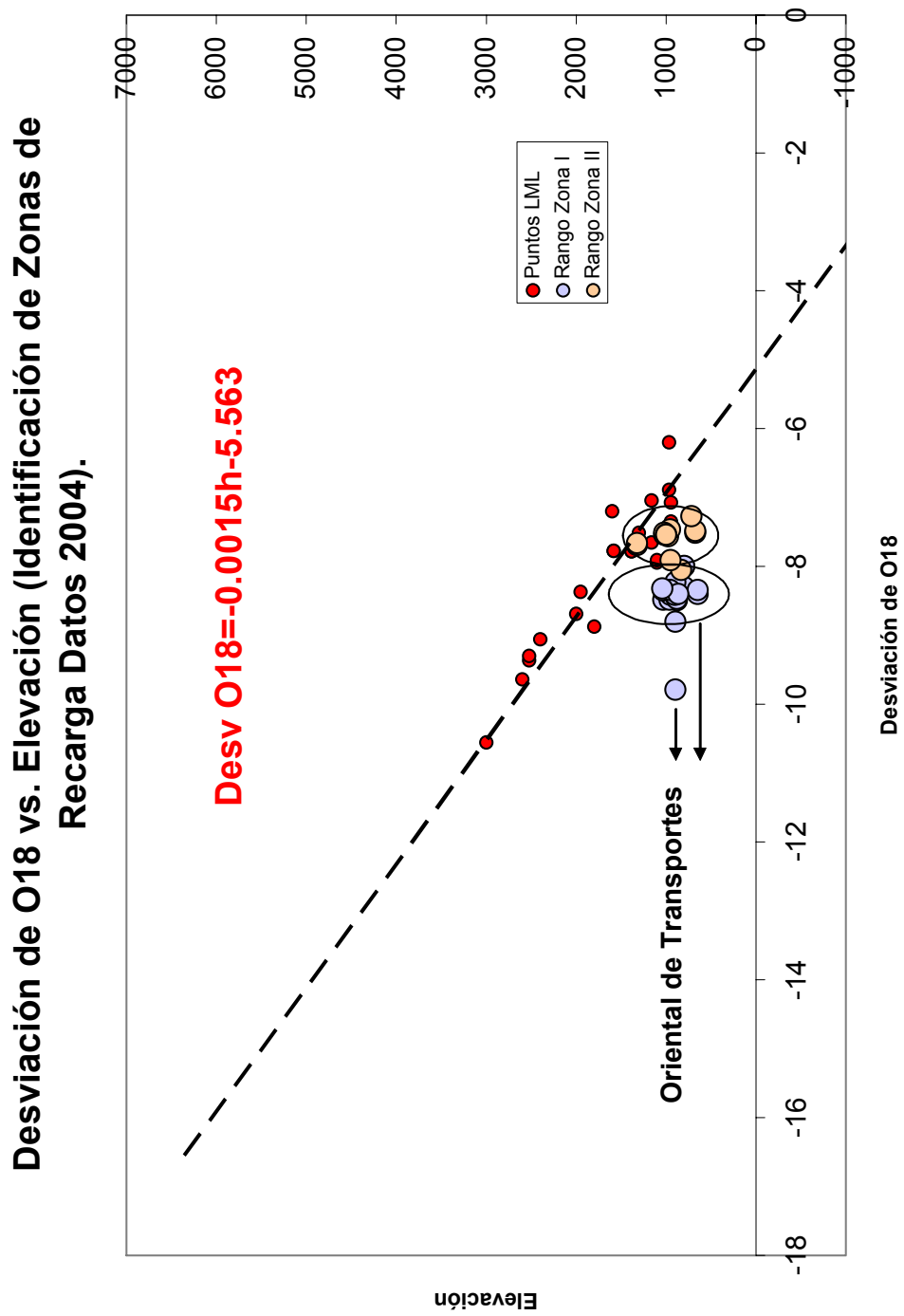
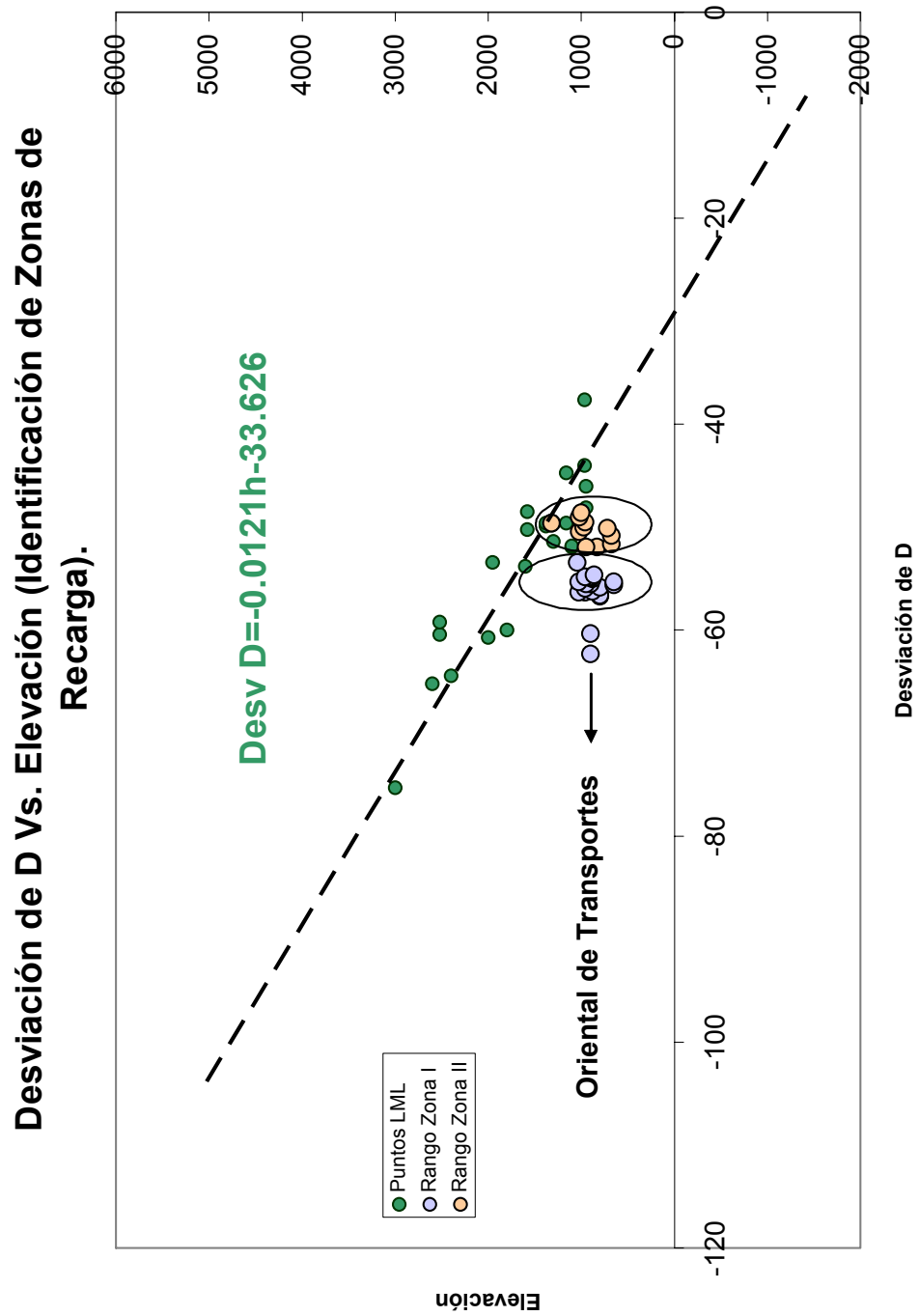


Figura 39. Identificación de zonas de recarga tomando como referencia la desviación de D vs. Elevación



De las tablas 26 y 27, se observa que las desviaciones de las aguas subterráneas que pertenecen a una determinada zona de recarga, tanto en invierno como en verano siempre corresponden a la misma zona de infiltración, es decir, las desviaciones de algún punto empobrecidas en invierno y enriquecidas en verano, se mantienen dentro del rango de elevación de la zona a la cual pertenecen.

Los datos de aguas subterráneas que no hacen parte de ninguna zona de infiltración, son algunos de los puntos con desviaciones isotópicas más bajas, en los que existe la posibilidad de que se recarguen por flujos de aguas locales como aguas subterráneas subsuperficiales y lagos, o sufran modificación de la composición isotópica durante el proceso de infiltración por evaporación en la zona no saturada.

Tabla 25. Puntos de Agua subterránea que se recargan de la zona I (2000-1700) msnm.

Zona I	Tipo	Periodo	$\delta^{18}\text{O}$	δD	Eleva
Est. Oriental Transp.	Pozo de Bombeo	Invierno	-9.79	-62.3	898
Est. Oriental Transp.	Pozo de Bombeo	Verano	-8.80	-60.3	898
Lavadero San FSCO.	Pozo de Bombeo	Invierno	-8.43	-56.3	961
Jardín La Colina	Pozo de Bombeo	Invierno	-8.48	-56.3	1030
Nazaret	Dren	Invierno	-8.49	-56.2	880
Lavadero San FSCO.	Pozo de Bombeo	Verano	-8.48	-55.9	961
Barrio Galán	Cisterna	Invierno	-8.40	-55.6	650
Barrio Argelia	Dren	Invierno	-8.42	-55.5	900
Lavadero la Rosita	Cisterna	Invierno	-8.41	-55.5	950
Barrio Galán	Cisterna	Verano	-8.34	-55.3	650
Jardín La Colina	Pozo de Bombeo	Verano	-8.35	-55.3	1030
Nazaret Verano	Dren	Verano	-8.47	-55	880
Vivero La Rosita	Dren	Invierno	-8.23	-54.9	894
Barrio Argelia	Dren	Verano	-8.41	-54.8	900
Parque La Flora	Piezómetro inf.		-8.34	-54.8	958
Barrio Independencia	Dren	Invierno	-8.40	-54.6	865
Pan de Azúcar	Piezómetro inf.		-8.32	-53.4	1042

Tabla 26. Puntos de Agua subterránea que se recargan de la zona II (1500-1200) msnm.

Nombre	Tipo	Periodo	$\delta^{18}\text{O}$	δD	Eleva
Ciudad Norte	Pozo de Bombeo	Verano	-8.05	-51.9	830
Lavadero la Rosita	Cisterna	Verano	-7.91	-51.9	950
Terpel - Chimita	Pozo Asrtesiano	Verano	-7.51	-51.6	676.14
Terpel - Chimita	Pozo Asrtesiano	Invierno	-7.48	-50.8	676.14
La Cumbre2	Lavadero		-7.54	-50.4	1023
Llanogrande	Pozo exploración		-7.27	-50.1	720
Lavadero Calle 48 - 33	Pozo de Bombeo	Invierno	-7.56	-50	976
Buenavista	Piezómetro inf.		-7.69	-49.6	1322
Buenavista	Piezómetro sup.		-7.66	-49.6	1323
Parque La Flora	Piezómetro sup.		-7.46	-49.5	958
La Cumbre2	Lavadero		-7.51	-49	1023
Lavadero la Cumbre1	Cisterna	Invierno	-7.53	-48.6	1000
Lavadero la Cumbre1	Cisterna	Verano	-7.54	-48.2	1000
Pan de Azúcar	Piezómetro sup.		-6.91	-46.5	1042

6. CONCLUSIONES

Se implementó una red de muestreadores de isótopos estables en la precipitación, constituida por 11 estaciones; de la cual se obtuvieron 62 muestras representativas mensuales de agua lluvia, que ya se encuentran en el laboratorio del OIEA para ser analizadas. 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, según se muestra en las Figuras 14, 16 y 17. La localización se realizó tratando de cubrir las zonas de variación orográfica más importantes de la cuenca (Río Frío, Río de Oro, Río Tona), lugares de fácil acceso y sitios que reporten alguna seguridad como son las estaciones pluviométricas en funcionamiento.

Se adaptó un protocolo de muestreo de aguas lluvias a nuestras condiciones climáticas y orográficas, para evitar alteraciones en la muestra en los procesos de: recolección, muestreo, almacenamiento y envío al laboratorio. Entre las adaptaciones se encuentran 3 métodos para tratar de evitar la evaporación (ver numeral 2.4). Se implementó un muestreador específico en la estación Granja Piedecuesta, considerada como un punto de condiciones propicias para la evaporación.

A partir de la información isotópica disponible y representativa de la precipitación en la cuenca superior del río Lebrija, se obtiene una recta meteórica local dada por la función: $\delta D = 7.74 * \delta^{18}O + 9.05$, $r = 0.958$; compuesta por un total de 22 datos. El gradiente orográfico que representa la pendiente de la recta de δ vs. Elevación es 0.15‰/100m para el ^{18}O y de 1.21‰/100m para el D, rango considerado aceptable para el efecto orográfico.

La recta meteórica nacional propuesta con los datos de estudios isotópicos más recientes se sintetiza en la ecuación: $\delta D = 7.9 * \delta^{18}O + 9.3$, la cual describe algunas tendencias isotópicas regionales representadas por: Guajira, Sucre, Bucaramanga, Pereira y Valle del Cauca. Esta recta meteórica presenta una mayor similitud con respecto a la recta de Craig en comparación con otras rectas propuestas en otros trabajos, lo cual puede significar una mejor representación de los fenómenos de fraccionamiento (evaporación y condensación) que expresa la recta de Craig.

Los datos de aguas subterráneas (drenes, pozos y piezómetros) se agrupan en dos posibles zonas de recarga, cada una con desviaciones isotópicas representativas de un rango de elevación, (Figuras 37 y 38). Los datos de aguas subterráneas de la zona con las desviaciones más empobrecidas en isótopos estables se recargan entre los 2000-1700 msnm y los pertenecientes a la zona de desviaciones mas enriquecidas entre los 1500-1200 msnm.

Comparando los datos de aguas subterráneas con los de precipitación, resulta evidente la procedencia meteórica de estas, ya que sus desviaciones son similares; también se observa que ningún punto de agua subterránea se recarga de las precipitaciones del Área Metropolitana de Bucaramanga ya que sus desviaciones no son correspondientes con las de aguas subterráneas.

7. RECOMENDACIONES

Se debe implementar un muestreo de isótopos estables más prolongado sobre las aguas subterráneas en el Área Metropolitana de Bucaramanga, con el fin de tener mayor información, para compararla con las variaciones espaciales y temporales observadas en la precipitación de las zonas de infiltración.

Comparar los resultados obtenidos en la identificación de la zona de recarga con otros métodos de trazadores alternativos, como Cloruros o Tritio, siendo estos los mas usados y de factible aplicación para las características de la zona de estudio; ya que la utilización de diferentes métodos suple las deficiencias que se pueden encontrar en la aplicación de uno solo.

Para proyectar mejoras en el diseño del colector se deben tener en cuenta aspectos fundamentales como: pérdidas de agua en la recolección, perdidas por evaporación, precisión en la medida del volumen de agua recolectada y mejoras en el proceso de captación de agua.

Se recomienda desarrollar un estudio en donde se relacionen las características isotópicas de la precipitación con respecto a la procedencia de las masas nubosas que la generan, puesto que cada frente húmedo carga información isotópica única que representa sus orígenes y transportes.

BIBLIOGRAFÍA

BAUNZA DEL PRADO, E; PLATA, A. y SILGADO, A. Hidrología Isotópica de las Aguas Subterráneas del Parque Nacional de Doña Ana y Zona de Influencia. 1984. Capítulo 8.

BRICEÑO, C. y RODRIGUEZ, L. Química. 2 ed. Bogotá: Editorial Educativa, 1997. 681 p. ISBN-958-9489-06-0.

COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Temas ambientales: Toma y preservación de muestras. p. 2-3.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. Hidrología Subterránea. 2 ed. Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1996. p 1265 – 1273. Volumen 2.

DAPEÑA, C. PANARELLO, H. Composición isotópica de la Lluvia de Buenos Aires: Su Importancia para el Estudio de los Sistemas Hidrológicos Pampeanos. En: Revista Latino – Americana de Hidrogeología. Número 4 (2004); p. 17-25.

ELLINS, K. Stable Isotopic Study of the Groundwater of the Martha Brae River Basin, Jamaica. En: Water Resources Research. Volumen 28, Número 6 (Junio, 1992); p. 1597-1604.

FAURE, G. Principles of Isotope Geology. New York: John Wiley and Sons, 1976. Capítulo I. p. 1-9.

GOMEZ, S. y ANAYA, Á. Acercamiento a un Modelo Conceptual de Recarga de los Acuíferos de la Región de Bucaramanga. En: Revista Avances en Recursos Hídricos. Numero 11 (Septiembre, 2004); p. 37-50. ISSN 0121-5701.

GOMEZ, S. y ANAYA, Á. Interpretación Entre Sistemas Hidrogeológicos Para el Estudio del Fenómeno de Recarga en el Macizo de Santander e Identificación de Acuíferos. Bucaramanga: 2004. 39 p.

HIDALGO, C. Recarga de Acuíferos y Corrientes Superficiales en la Ladera Occidental del Valle de Aburra. Medellín, 1998, 54 p. Tesis de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil. Área de Hidrología Isotópica.

HOYOS, F. y VELEZ, M. Determinación Mediante Isótopos Ambientales de Zonas y Mecanismos de Recarga en el Departamento de Risaralda-Colombia. En: 4º CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRÁNEA. (1998 : Montevideo-Uruguay). Memorias IV Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. p. 1270 -1281.

HOYOS, F. VELASQUEZ, E. y VELEZ, J. Variación regional en la composición isotópica del agua lluvia en Colombia. En: X SEMINARIO NACIONAL DE HIDRAULICA E HIDROLOGIA - XV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA. (1992: Cartagena). Memorias X Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Vol. I. p 263-272.

IAEA. November 1997. Technical Procedure for cumulative monthly sampling of precipitation for isotopic analyses. Viena.

MORALES, G. y ORTEGON, G. Hidrogeología e hidrogeoquímica en los acuíferos aluviales en la zona sur del Valle del Cauca. En: PRIMER CONGRESO COLOMBIANO DE HIDROGEOLOGIA. (2004: Medellín). Memorias Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. 11 p.

NAVIA, M. y SUAREZ, M. Aplicación de Isótopos en Hidrología. Bucaramanga, 1994, 140 p. Tesis de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Área de Hidrología Isotópica.

OIEA/OMN. Programa OIEA, OMN sobre la composición isotópica de la precipitación global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP).

PLATA, A. Isótopos en Hidrología. Madrid: ED. Alambra S.A., 1972. 328 p.

PRICE, M. Agua Subterránea. México D.F.: Editorial LIMUSA S.A., 2003. p. 188-191.

PUBLICACIONES DEL INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico: Principios y Aplicaciones. 1 ed. Madrid: Editores W.G. Mook, 2002. 595 p. ISBN-84-7840-465-1.

RODRIGUEZ, C. Estudios hidrológicos cualitativos y cuantitativos mediante isótopos estables en Colombia. En: Memorias del Seminario Interamericano de Hidrología Isotópica. (1980: Bogotá). p. 63-109, 163-177.

RODRIGUEZ, C. Isótopos en Hidrogeología. Bogotá: Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 1971. 98 p.

RODRIGUEZ, C. Línea Meteorítica Isotópica de Colombia. En: Revista Meteorología Colombiana. Numero 8 (Marzo, 2004); p. 43-51. ISSN 0124-6984.

ROMERO, L. y HERRERA, H. Estudio hidrogeológico e hidroquímico del acuífero de Morroa, Sucre. En: PRIMER CONGRESO COLOMBIANO DE HIDROGEOLOGIA. (2004: Medellín). Memorias Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. 20 p.

SALAZAR, B. Gradiente Orográfico de la Composición Isotópica del Agua Lluvia en el Valle de Aburra. Medellín, 1996, 66 p. Tesis de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil. Área de Hidrología Isotópica.

TORO, L. Inventario de los acuíferos en la zona de Maicao, por medio de la hidroquímica. En: PRIMER CONGRESO COLOMBIANO DE HIDROGEOLOGIA. (2004: Medellín). Memorias Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. 15 p.

VELEZ, M.; ARIAS, G. y GARCIA, O. Primeros resultados hidrogeológicos e hidrogeoquímicos del acuífero de Pereira. En: PRIMER CONGRESO COLOMBIANO DE HIDROGEOLOGIA. (2004: Medellín). Memorias Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. 13 p.

ANEXOS

LISTA DE MUESTRAS PARA ANALISIS DE ISOTOPOS DE LLUVIA

PAIS Y CODIGO DEL PROYECTO: Colombia

FECHA: 21/04/05

INSTITUTO: GPH Universidad Industrial de Santander UIS.

Responsable: GPH UIS

Nº	Codigo local	Fecha del muestreo DD/MM/AA	Tipo	Nº de botellas enviadas	Analisis requeridos						
					O-18	H-2	H-3	C-13	C-14	Quim	Otros
1	Piedecuesta	10/11/04	SPR	1	X	X					
2	IDEAM*	10/11/04	SPR	1	X	X					
3	San Antonio	09/11/04	SPR	1	X	X					
4	La Galvicia	09/11/04	SPR	1	X	X					
5	La Mariana	09/11/04	SPR	1	X	X					
6	El Picacho	09/11/04	SPR	1	X	X					
7	Berlín	09/11/04	SPR	1	X	X					
8	Tembladal	11/11/04	SPR	1	X	X					
9	La Casita	11/11/04	SPR	1	X	X					
10	Tona	12/11/04	SPR	1	X	X					
11	Piedecuesta	09/12/04	SPR	1	X	X					
12	IDEAM*	09/12/04	SPR	1	X	X					
13	San Antonio	07/12/04	SPR	1	X	X					
14	La Galvicia	07/12/04	SPR	1	X	X					
15	La Mariana	07/12/04	SPR	1	X	X					
16	El Picacho	07/12/04	SPR	1	X	X					
17	Berlín	07/12/04	SPR	1	X	X					
18	Tembladal	07/12/04	SPR	1	X	X					
19	La Casita	07/12/04	SPR	1	X	X					
20	Tona	07/12/04	SPR	1	X	X					
21	Piedecuesta	06/01/05	SPR	1	X	X					
22	IDEAM*	07/01/05	SPR	1	X	X					
23	Aeropuerto	06/01/05	SPR	1	X	X					
24	San Antonio	05/01/05	SPR	1	X	X					
25	La Galvicia	05/01/05	SPR	1	X	X					
26	La Mariana	05/01/05	SPR	1	X	X					
27	El Picacho	05/01/05	SPR	1	X	X					
28	Berlín	05/01/05	SPR	1	X	X					
29	Tembladal	05/01/05	SPR	1	X	X					
30	La Casita	05/01/05	SPR	1	X	X					

- a) El codigo de la muestra sobre la botella tiene que ser identico al listado de esta tabla.
b) SPR - Precipitación; SER - Embalses; GWB - Pozo profundo; GWS - Manantiales; SRI - Rio.

LISTA DE MUESTRAS PARA ANALISIS DE ISOTOPOS DE LLUVIA

PAIS Y CODIGO DEL PROYECTO: Colombia

FECHA: 21/04/05

INSTITUTO:GPH Universidad Industrial de Santander UIS.

Responsable: GPH UIS

Nº	Codigo local	Fecha del muestreo DD/MM/AA	Tipo	Nº de botellas enviadas	Analisis requeridos							
					O-18	H-2	H-3	C-13	C-14	Quim	Otros	
31	Tona	05/01/05	SPR	1	X	X						
32	Piedecuesta	08/02/05	SPR	1	X	X						
33	IDEAM	01/02/05	SPR	1	X	X						
34	Aeropuerto	08/02/05	SPR	1	X	X						
35	San Antonio	11/02/05	SPR	1	X	X						
36	La Galvicia	11/02/05	SPR	1	X	X						
37	La Mariana	11/02/05	SPR	1	X	X						
38	El Picacho	11/02/05	SPR	1	X	X						
39	Berlín	11/02/05	SPR	1	X	X						
40	Tembladal	09/02/05	SPR	1	X	X						
41	La Casita	09/02/05	SPR	1	X	X						
42	Tona	09/02/05	SPR	1	X	X						
43	Piedecuesta	09/03/05	SPR	1	X	X						
44	IDEAM	28/02/05	SPR	1	X	X						
45	Aeropuerto	09/03/05	SPR	1	X	X						
46	San Antonio	08/03/05	SPR	1	X	X						
47	La Galvicia	08/03/05	SPR	1	X	X						
48	La Mariana	08/03/05	SPR	1	X	X						
49	El Picacho	08/03/05	SPR	1	X	X						
50	Berlín	08/03/05	SPR	1	X	X						
51	La Casita	08/03/05	SPR	1	X	X						
52	Tona	08/03/05	SPR	1	X	X						
53	Piedecuesta	06/04/05	SPR	1	X	X						
54	IDEAM	01/04/05	SPR	1	X	X						
55	Aeropuerto	07/04/05	SPR	1	X	X						
56	San Antonio	08/04/05	SPR	1	X	X						
57	La Galvicia	08/04/05	SPR	1	X	X						
58	La Mariana	08/04/05	SPR	1	X	X						
59	El Picacho	08/04/05	SPR	1	X	X						
60	Berlín	08/04/05	SPR	1	X	X						
61	Tembladal	08/04/05	SPR	1	X	X						
62	Tona	08/04/05	SPR	1	X	X						

a) El codigo de la muestra sobre la botella tiene que ser identico al listado de esta tabla.

b) SPR - Precipitación; SER - Embalses; GWB - Pozo profundo; GWS - Manantiales; SRI - Rio.

LISTA DE MUESTRAS PARA ANALISIS DE ISOTOPOS LLUVIA

PAIS Y CODIGO DEL PROYECTO: Colombia

FECHA: 21/04/05

INSTITUTO: GPH Universidad Industrial de Santander UIS

Responsable: GPH UIS

N°	Codigo local	Nombre del Acuífero	Precipita cón mm	Coord. (grad,min,seg)		Altura msnm	Litología	Datos de Campo			
				Long	Latit			Cond. µS/cm	Temp. °C	pH. units	Alkal. mg/l
1	Piedecuesta		297	07°00'	73°05'	1000		13.8	13.8	5.88	
2	IDEAM*		143	07°08'41"	73°07'30"	993.43		18.1	18.7	6.14	
3	San Antonio		261	07°06'08"	73°04'10"	1531.6		15.2	14.1	5.7	
4	La Galvicia		243	07°07'32"	73°03'36"	1848		15.1	18.8	6.14	
5	La Mariana		150.5	07°07'32"	73°00'37"	2481.2		25.5	7.7	6.2	
6	El Picacho		160	07°06'46"	72°58'11"	3435.4		0	3.8	5.49	
7	Berlín		99.8	07°11'22"	72°52'18"	3306.7		41	3.8	6.3	
8	Tembladal		248	07°12'15"	72°55'53"	2869.3		33.3	3.4	6.45	
9	La Casita		330.5	07°12'30"	72°56'17"	2659.7		24.8	5.1	6.18	
10	Tona		280	07°11'55"	72°58'26"	1795.9		9.8	6.2	5.9	
11	Piedecuesta		122.4	07°00'	73°05'	1000		13.6	16.7	6.43	
12	IDEAM*		96.6	07°08'41"	73°07'30"	993.43		19	18.3	6.25	
13	San Antonio		145	07°06'08"	73°04'10"	1531.6		8.2	15.6	5.88	
14	La Galvicia		177	07°07'32"	73°03'36"	1848		13.4	17.6	5.49	
15	La Mariana		108.5	07°07'32"	73°00'37"	2481.2		11.2	16.7	5.92	
16	El Picacho		144	07°06'46"	72°58'11"	3435.4		17.7	15.5	5.95	
17	Berlín		30.1	07°11'22"	72°52'18"	3306.7		9.1	7.1	6.36	
18	Tembladal		110.18	07°12'15"	72°55'53"	2869.3		21.1	11.1	6.49	
19	La Casita		82.63	07°12'30"	72°56'17"	2659.7		11.5	9.2	5.9	
20	Tona		144	07°11'55"	72°58'26"	1795.9		10.6	13.2	6.45	
21	Piedecuesta		76	07°00'	73°05'	1000		9.9	30.6	6.49	
22	IDEAM*		150.6	07°08'41"	73°07'30"	993.43		9.4	21.6	6.09	
23	Aeropuerto		95.2	07°08'	73°11'	1189		7.7	20	6.06	
24	San Antonio		56.5	07°06'08"	73°04'10"	1531.6		8.9	17.4	5.37	
25	La Galvicia		97	07°07'32"	73°03'36"	1848		14.6	12.9	6.05	
26	La Mariana		62.3	07°07'32"	73°00'37"	2481.2		11.9	10.2	6.11	
27	El Picacho		24	07°06'46"	72°58'11"	3435.4		67.7	5.4	6.6	

LISTA DE MUESTRAS PARA ANALISIS DE ISOTOPOS DE LLUVIA

PAIS Y CODIGO DEL PROYECTO: Colombia

FECHA: 21/04/05

INSTITUTO: GPH Universidad Industrial de Santander UIS

Responsable: GPH UIS

N°	Codigo local	Nombre del Acuífero	precipitación mm	Coord. (grad,min,seg)		Altura msnm	Litología	Datos de Campo			
				Long	Latit			Cond. µS/cm	Temp. °C	pH. units	Alkal. mg/l
28	Berlín		11.9	07°11'22"	72°52'18"	3306.7		25.6	8.9	6.52	
29	Tembladal		66.11	07°12'15"	72°55'53"	2869.3		9.7	13.7	6.66	
30	La Casita		68.8	07°12'30"	72°56'17"	2659.7		6.9	19.7	6.23	
31	Tona		208	07°11'55"	72°58'26"	1795.9		112	13.6	5.96	
32	Piedecuesta		153.3	07°00'	73°05'	1000		19.1	21.6	5.97	
33	IDEAM		68.7	07°07'	73°07'	1025		22.9	20.8	5.45	
34	Aeropuerto		128.8	07°08'	73°11'	1189		12.8	17.2	5.76	
35	San Antonio		112.5	07°06'08"	73°04'10"	1531.6		8.9	17.3	5.5	
36	La Galvicia		176	07°07'32"	73°03'36"	1848		12	15.7	5.19	
37	La Mariana		140.5	07°07'32"	73°00'37"	2481.2		14.5	13.4	5.69	
38	El Picacho		104	07°06'46"	72°58'11"	3435.4		12.8	7.5	5.41	
39	Berlín		29.9	07°11'22"	72°52'18"	3306.7		14.5	12.3	5.21	
40	Tembladal		121.2	07°12'15"	72°55'53"	2869.3		7.6	9.7	5.69	
41	La Casita		112.93	07°12'30"	72°56'17"	2659.7		6.8	10.3	5.83	
42	Tona		145	07°11'55"	72°58'26"	1795.9		11	15.1	5.26	
43	Piedecuesta		325.6	07°00'	73°05'	1000		12.1	22.9	5.17	
44	IDEAM		312.6	07°07'	73°07'	1025		9.3	13.6	5.11	
45	Aeropuerto		280.6	07°08'	73°11'	1189		8.1	15	5.29	
46	San Antonio		195.5	07°06'08"	73°04'10"	1531.6		0	15.4	6.93	
47	La Galvicia		163	07°07'32"	73°03'36"	1848		6.9	16.6	5.05	
48	La Mariana		101.91	07°07'32"	73°00'37"	2481.2		6	13.3	5.21	
49	El Picacho		24	07°06'46"	72°58'11"	3435.4		7.3	9	5.66	
50	Berlín		20.3	07°11'22"	72°52'18"	3306.7		8.1	16	5.45	
51	La Casita		79.8	07°12'30"	72°56'17"	2659.7		3.6	17.3	5.26	
52	Tona		51	07°11'55"	72°58'26"	1795.9		5.8	18	5.28	
53	Piedecuesta		17.7	07°00'	73°05'	1000		25.5	22.9	5.85	

LISTA DE MUESTRAS PARA ANALISIS DE ISOTOPOS DE LLUVIA

PAIS Y CODIGO DEL PROYECTO: Colombia

FECHA: 21/04/05

INSTITUTO: GPH Universidad Industrial de Santander UIS

Responsable: GPH UIS

N°	Codigo local	Nombre del Acuífero	Precipitación mm	Coord. (grad,min,seg)		Litología	Datos de Campo				
				Long	Latit		Altura msnm	Cond. µS/cm	Temp. °C	pH. units	Alkal. mg/l
54	IDEAM		24	07°07'	73°07'	1025		13.6	20.5	5.41	
55	Aeropuerto		67.6	07°08'	73°11'	1189		13.8	20.1	4.83	
56	San Antonio		30	07°06'08"	73°04'10"	1531.6		35.9	18.6	5.05	
57	La Galvicia		22	07°07'32"	73°03'36"	1848		31.1	18.3	5.59	
58	La Mariana		27.54	07°07'32"	73°00'37"	2481.2		27.8	15.6	5.7	
59	El Picacho		2	07°06'46"	72°58'11"	3435.4		106	11.6	5.97	
60	Berlín		39	07°11'22"	72°52'18"	3306.7		80	12.5	5.3	
61	Tembladal		11	07°12'15"	72°55'53"	2869.3		43.6	15.4	6.55	
62	Tona		18	07°11'55"	72°58'26"	2659.7		24.3	14.5	5.46	
63											
64											
65											
66											
67											
68											
69											
70											
71											
72											
73											
74											
75											
76											
77											

(a) El código de la muestra sobre la botella tiene que ser idéntico al listado en esta tabla.

(b) GWB: pozo profundo; GWD: aljibe/pozo superficial; GWS: manantiales; SLA: lago; SER: embalse; SRI: río; SPR: precipitación

(c) Para análisis de química, indicar M para mayoritarios. Otros análisis (Li, B, NH₄, Br, PO₄, I, etc.) tienen que ser especificados a parte.

