



Libertad y Orden

**SERVICIO GEOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN DE GEOLOGÍA BÁSICA**

ATLAS GEOQUÍMICO DE COLOMBIA-MAPEO DE ULTRA BAJA DENSIDAD (UBD)



Asistencia técnica – Institute for Geophysical and Geochemical Exploration of China (IGGE)

Bogotá, marzo de 2005

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERÍA
INGEOMINAS



ATLAS GEOQUÍMICO DE COLOMBIA-MAPEO DE ULTRA BAJA DENSIDAD (UBD)

Por

Gloria Prieto
Gustavo García

Apoyo del Grupo de Geoquímica

Luz Myriam Gonzalez
Sonia Guiza
Raúl Muñoz
Orlando Vargas
Alvaro Espinoza
Timoleón Garzón
Giovanni Moreno
Javier Miranda
Alfredo Rosales

Participación en muestreo

LT-Geoperforaciones y Minería Ltda. (2001 y 2003)
Geominera S.A. (2003)
Goeconsulta Ltda (2003)

Asistencia técnica y análisis químicos

Institute for Geophysical and Geochemical Exploration of China (**IGGE**)

Apoyo

Laboratorio de Geoquímica de INGEOMINAS

Bogotá, marzo de 2005

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERÍA
INGEOMINAS

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	3
3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO	6
3.1. LOCALIZACIÓN	6
3.2. CLIMA	8
3.2.1. Radiación solar	11
3.2.2. Temperatura	11
3.2.3. Precipitación	12
3.2.4. Vientos	13
3.3. RECURSO HÍDRICO	14
3.3.1. Aguas superficiales	14
3.3.1.1. Hidrografía	14
3.3.1.2. Escorrentía	16
3.3.1.3. Aporte de sedimentos	17
3.3.1.4. Cuerpos de agua: lagos, lagunas, embalses, ciénagas y pantanos	17
3.3.2. Aguas subterráneas	18
3.4. RELIEVE – TOPOGRAFÍA	19
3.5. ECOSISTEMAS	20
3.5.1. Ecosistemas boscosos	21
3.5.2. Ecosistemas no boscosos	22
3.6. SUELOS	22
3.7. GEOLOGÍA	23
3.7.1. Sistema Andino	24
3.7.1.1. Cordillera Central	24
3.7.1.2. Valles de los ríos Magdalena, Cauca-Patía	24
3.7.1.3. Cordillera Oriental	26
3.7.2. Región Caribe	26
3.7.2.1. Península de la Guajira	26
3.7.2.2. Macizo de la Sierra Nevada de Santa Marta	27
3.7.2.3. Llanuras del Caribe	27
3.7.3. Llanos Orientales - Escudo Guayanés	27
3.8. TECTÓNICA	28
3.8.1. Cordillera Central	28
3.8.2. Valle Inferior del Magdalena	28
3.8.3. Valle Superior del Magdalena	29
3.8.4. Valle Medio del Magdalena	29
3.8.5. Cordillera Oriental	29
3.8.6. La Guajira	30
3.8.7. Sierra Nevada de Santa Marta	30
3.8.8. Llanos Orientales	30
3.9. GEOMORFOLOGÍA	31
3.9.1. Montaña Alta	31
3.9.2. Montaña Media	31
3.9.3. Montaña Baja	31
3.9.4. Depresiones Tectónicas Intramontanas	33
3.9.5. Litorales	33
3.9.6. Dominio Amazónico	33
3.9.7. Dominio Orinoqués	33
3.9.8. Características geomorfológicas de cuencas	34
3.9.8.1. Sectores del río Magdalena	34
3.9.8.2. Sectores del río Cauca Bajo y río Nechí	35
3.9.8.3. Sectores del río Ranchería y río Cesar	36



3.10. RECURSOS MINERALES	37
3.11. ACTIVIDAD ANTRÓPICA	40
3.11.1. Asentamientos humanos	40
3.11.2. Vías, transporte y comunicación	44
3.11.3. Servicios públicos	44
3.11.4. Actividades Productivas	45
3.11.5. Emisiones al ambiente	46
4. METODOLOGÍAS	47
4.1. METODOLOGÍA DE MUESTREO	47
4.1.1. Principios y definiciones	47
4.1.2. Selección de sitios de muestreo	48
4.1.3. Tipos de muestras	48
4.1.4. Precauciones y recomendaciones observadas durante el muestreo	51
4.1.5. Identificación de las muestras	51
4.1.6. Muestreo	52
4.1.6.1. Recolección de muestras	52
4.1.6.2. Descripción de perfil de sedimentación	53
4.1.6.3. Mediciones radiométricas	54
4.1.7. Control de muestreo	54
4.1.8. Fotografías	54
4.1.9. Preservación y envío de las muestras	54
4.2. METODOLOGÍA ANALÍTICA	54
4.2.1. Preparación de muestras	55
4.2.2. Análisis químico	55
4.2.3. Datación por ¹⁴ C	60
4.2.4. Control de calidad analítica	60
4.3. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	61
4.3.1. Análisis Preliminares	62
4.3.1.1. Revisión de coordenadas	62
4.3.1.2. Sistematización de datos geoquímicos	62
4.3.2. Procesamiento de Datos Geoquímicos	63
4.3.2.1. Análisis Exploratorio de Datos (AEDE, AED)	63
4.3.2.2. Tratamiento estadístico multi-variado	64
4.3.2.3. Análisis Geoestadístico	64
4.3.2.4. Elaboración de mapas	65
4.3.2.4.1. Mapas de distribución por cuencas	65
4.3.2.4.2. Mapas de distribución espacial	66
4.3.2.4.3. Mapas de asociaciones o factores de correlación entre elementos	67
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	68
5.1. MUESTRAS RECOLECTADAS	68
5.2. INFORMACIÓN DE CAMPO	69
5.3. ANÁLISIS DE ELEMENTOS QUÍMICOS EN LABORATORIO	69
5.3.1. Análisis químico	69
5.3.2. Datación por ¹⁴ C	74
5.4. CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS	74
5.4.1. Exactitud	76
5.4.2. Precisión	76
5.5. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GEOQUÍMICA	77
5.5.1. Datos de Campo	77
5.5.1.1. Datos del sitio de muestreo	77
5.5.1.2. Datos macroscópicos de las muestras colectadas	84
5.5.1.3. Mediciones radiométricas	85
5.5.2. Datación con ¹⁴ C	86
5.5.3. Procesamiento de Datos Geoquímicos	86
5.5.3.1. Análisis Exploratorio de Datos	87



5.5.3.1.1. Análisis Exploratorio de Datos (AED).....	87
5.5.3.1.2. Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE).....	91
5.5.3.2. Mapas de concentración de elementos por cuencas.....	99
5.5.3.3. Tratamiento estadístico multivariado.....	99
5.5.3.3.1. Correlaciones	102
5.5.3.3.2. Análisis de componentes principales y análisis de factores.....	105
5.5.3.4. Análisis Geoestadístico	111
5.5.3.4.1. Distribución de los datos	111
5.5.3.4.2. Cálculo de semivariogramas	111
5.5.3.4.3. Interpolación Kriging	112
5.5.3.4.4. Validación del método	114
5.5.3.5. Mapas de distribución espacial.....	114
5.5.3.6. Mapas de asociaciones o factores de correlación entre elementos.....	115
5.6. NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS EN SEDIMENTOS DE LLANURA DE INUNDACION.....	115
5.7. ASOCIACION ENTRE ELEMENTOS	116
5.8. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ELEMENTOS, REGIONES O PROVINCIAS DE DOMINIOS DE ELEMENTOS QUÍMICOS Y SUS ASOCIACIONES.....	118
5.8.1. Concentración de elementos por cuencas.....	119
5.8.1.1. Región Oriental	119
5.8.1.2. Región Central de Influencia del sistema cordillerano Andino	119
5.8.1.3. Región Costera del Caribe.....	120
5.8.2. Patrones de distribución espacial de elementos	121
5.8.2.1. Zonas de enriquecimiento de elementos.....	121
5.8.2.1.1. Región Oriental (Orinoquía - Amazonía).....	121
5.8.2.1.2. Región Central de influencia del sistema cordillerano Andino (influencia de las Cordilleras Oriental y Central).....	122
5.8.2.1.3. Región Costera del Caribe (Sierra Nevada de Santa Marta y Guajira).....	122
5.8.2.2. Regiones o provincias de dominio de elementos y sus asociaciones	123
5.11. DISTRIBUCION DE ELEMENTOS Y ACTIVIDADES ANTROPICAS	125
6. CONCLUSIONES.....	126
7. RECOMENDACIONES.....	131
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132

Anexo 1 Información de campo

Anexo 2. Documentación fotográfica

Anexo 3. Análisis químico

Anexo 4. Análisis estadístico

Anexo 5. Mapas de concentración de elementos por cuencas y de grupos de asociación de elementos

Anexo 6. Mapas de distribución espacial de elementos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zona de estudio	7
Figura 2. Muestreo de Ultra Baja Densidad: Fase I – Magdalena – Cauca, Caribe (2001) y Fase II Oriente-Catatumbo, Orinoquía, Amazonía (2003).....	9
Figura 3. Cuencas y sitios de muestreo.....	10
Figura 4. Áreas Hidrográficas de Colombia (IDEAM, 1998 a).....	15
Figura 5. Vista general de la geología de Colombia	25
Figura 6. Rasgos Geomorfológicos de Colombia	32
Figura 7. Celdas de la red de referenciación geoquímica global (GRN).....	49
Figura 8. Cuencas muestreadas.....	50
Figura 9. Fotografías mostrando un perfil de sedimentación descubierto sobre el río Bogotá y un apique de muestreo sobre el río Manzanares.....	52
Figura 10. Fotografía que ilustra un apique de muestreo en la planicie de inundación del río Upía, del río Manso y del río Zulia, con los elementos de muestreo.	53
Figura 11. Fotografías de diferentes perfiles de muestreo sobre el río Tua, río Manso y río Yucao	53
Figura 12. Elementos analizados y límites de detección (LD).....	57
Figura 13. Esquema de integración, análisis de información y producción de mapas.	61
Figura 14. Análisis de exactitud, patrón 3 (GAU8GSS1) para 69 elementos y patrón 18 (GPt-8) para Pt y Pd.	80
Figura 15. Detalle del análisis de exactitud, para Hg (estándar 01-GAU9GSD8), Cr (estándar 02-GAU12GSD11), Ag y Au (estándar 03-GAU8GSS1), Si (estándar 04-GAU9GSS3), K (estándar 05-GAU10GSD9), Cd y Eu (estándar 12-GAU9GSD8) y Pd y Pt (estándar 19-GPt-1).....	81
Figura 16. Análisis de precisión usando 36 duplicados para Pt y Pd y 31 para los demás elementos	82
Figura 17. Detalle del análisis de precisión para Li, Rb, Mg, Sr, Eu, Dy, Mn, Fe, Hg, Ag, Au, Cl, Br, F, I, usando 31 duplicados y para Pd, Pt, usando 36 duplicados	83
Figura 18. Curva de distribución normal (forma de campana)	92
Figura 19. Q-Q normalizado de Zn (a) y de Tl (b) en muestras de sedimentos superficiales	93
Figura 20. Q-Q normalizado de I (a) y de Sr (d) en muestras de sedimentos superficiales.	94
Figura 21. Q-Q normalizado de Br (a) y de Ca (b) en muestras de sedimentos superficiales.....	94
Figura 22. Histograma de Au (a) y de As (b) en muestras de sedimentos superficiales	97
Figura 23. Mapa de Voronoi de entropía para C (carbono) en sedimentos superficiales.....	97
Figura 24. Correlación de Spearman con diagrama de dispersión para sedimentos superficiales (A_{0-25}).....	103
Figura 25. Correlación de Spearman con diagrama de dispersión para sedimentos profundos (hasta 200 cm).	103
Figura 26. Nube de puntos del semivariograma (a), semivariograma empírico (b), y semivariograma teórico ajustado para el elemento Au en sedimentos superficiales (c).	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Inventario de cuencas hidrográficas (IDEAM, 1998 a)	16
Tabla 2. Características geológicas de los terrenos de la Cuenca del Magdalena (INGEOMINAS, 1986).	38
Tabla 3. Ocurrencias minerales en la Región Caribe	40
Tabla 4. Ocurrencias minerales en el Sistema Andino - Cordillera Central	41
Tabla 5. Ocurrencias minerales en el Sistema Andino - Cordillera Oriental	42
Tabla 6. Ocurrencias minerales en el Sistema de Guayana- Orinoquia – Amazonía	43
Tabla 7. Principales yacimientos en explotación en la zona de Estudio	43
Tabla 8. Metodologías analíticas, Límites de Detección (LD), % de resultados aceptables (Geological Survey Of China, 2001)	58
Tabla 9. Control de Calidad: Estándares de referencia y duplicados	60
Tabla 10. Ejemplo de procesamiento de coordenadas y unificación de Datums	62
Tabla 11. Muestras colectadas en las Fases I (2001) y II (2003) del muestreo de UBD	70
Tabla 12. Muestras seleccionadas para datación con ¹⁴ C	75
Tabla 13. Resultados de datación con ¹⁴ C	76
Tabla 14. Contenidos de elementos químicos en los estándares certificados de referencia utilizados para control de exactitud	78
Tabla 15. Ejemplo de estadísticas descriptivas para Ag, Au, As, B y Ba.	88
Tabla 16. Estimadores de Huber, Biponderado de Tukey, Hampel y onda de Andrew para Ag, Au, As, Ca, Mg y COrg.	89
Tabla 17. Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk para Ag, Au, As, B, Ba, Be, Bi, Yb, Zn, Zr, Si, Al, Fe, Na, Ca, Mg, COrg	90
Tabla 18. Valores anómalos mayores y menores para los elementos Ag, Au, As, B, Mo, W (extremos - outliers)	96
Tabla 19. Percentiles de los datos de concentración de los elementos en el horizonte superficial (A ₀₋₂₅)	100
Tabla 20. Percentiles de los datos de concentración de los elementos en el horizonte profundo (hasta 200cm)	101
Tabla 21. Principales correlaciones encontradas en muestras superficiales y profundas	104
Tabla 22. Matriz de correlación de vectores propios para sedimentos superficiales (primeros 20 factores) ..	107
Tabla 23. Matriz de correlación de vectores propios para sedimentos profundos (primeros 20 factores)	107
Tabla 24. Elementos relacionados con el Cp 1 (Componente principal) en muestras superficiales	107
Tabla 25. Elementos relacionados con el Cp 2 (Componente principal) en muestras superficiales	108
Tabla 26. Elementos relacionados con el Cp 1 (Componente principal) en muestras profundas	108
Tabla 27. Elementos relacionados con el Cp 2 (Componente principal) en muestras profundas	108
Tabla 28. Cargas de cada elemento al Componente principal en sedimentos superficiales	109
Tabla 29. Cargas de cada elemento al componente principal en sedimentos profundos	110

1. RESUMEN

Para suplir la carencia de información geoquímica del territorio colombiano, en un tiempo relativamente corto y a bajos costos, INGEOMINAS adoptó como estrategia el muestreo de Ultra Baja Densidad (UBD), utilizando como medio de muestreo sedimentos de planicie de inundación depositados en grandes cuencas hidrográficas (cuencas de captación de 200 a 6.000 km²).

El cubrimiento sistemático y homogéneo del territorio mediante muestreo de UBD se planeó como un proyecto a largo plazo en cuatro (4) Fases: **Fase I** – zona centro y norte del país - áreas Magdalena - Cauca y Caribe; **Fase II** – zona del oriente colombiano - áreas Orinoco, Amazonas y Catatumbo; **Fase III** – zona occidental de Colombia - área Pacífico; y **Fase IV**- zona sur del territorio - áreas Amazonas y Sur de Colombia.

En este informe técnico se presentan los resultados de las Fases I (2001) y II (2003), que corresponden a la zona centro y norte del país, en las áreas hidrográficas Magdalena - Cauca y Caribe y a la zona del oriente colombiano en las áreas hidrográficas Orinoco, Amazonas.

Tomando como referencia la red de muestreo global con celdas de 160 x 160, se demarcaron celdas de 80 x 80 km y en éstas últimas se definieron celdas de 40 x 40 km dentro de las cuáles se delineó el drenaje correspondiente. En la primera Fase se seleccionaron 104 cuencas con áreas de captación mayores a 200 km², y en la segunda Fase se seleccionaron 120 cuencas con las mismas características. En cada cuenca se recolectaron sedimentos de planicie de inundación (sedimentos de floodplain, sedimentos de sobrebanca y algunos suelos aluviales), tomando una muestra superficial (A₀₋₂₅), una muestra profunda (25 cm más profundos, hasta 200 cm) y una muestra para datación. En la primera Fase se colectaron 104 muestras superficiales con 8 duplicados, 104 muestras profundas con 8 duplicados y 104 muestras para datación con 8 duplicados. En la segunda Fase se seleccionaron se colectaron 120 muestras profundas con 23 duplicados, 120 muestras superficiales con 23 duplicados y 120 muestras para datación con 23 duplicados.

Para análisis químico se seleccionaron las cuencas más representativas de las áreas hidrográficas Magdalena - Cauca y Caribe y de la zona oriental de Colombia. Mediante convenio de cooperación bilateral entre la república de China y Colombia, el IGGE de China (Institute for Geophysical and Geochemical Exploration), efectuó análisis químico para 71 elementos en 194 muestras superficiales A₀₋₂₅, 195 muestras profundas (25 cm más profundos, hasta 2 metros), 25 duplicados de muestras superficiales y 25 duplicados de muestras profundas. Para datación con ¹⁴C se seleccionaron 20 cuencas en las cuáles las muestras presentaban altos contenidos de carbono total.

En los datos obtenidos se realizó análisis estadístico descriptivo que incluyó análisis exploratorio de datos (AED y AEDE), análisis bi-variado, análisis multivariado y análisis geoestadístico. Como parte del análisis se calcularon estadísticas de tendencia central (media, mediana), medidas de dispersión (varianza, desviación estándar) y medidas que indican la forma de la distribución de probabilidad (sesgo y curtosis). Adicionalmente se construyeron diagramas de dispersión, diagramas Q-Q y P-P, diagramas de caja e histogramas, entre otros. El análisis multivariado (análisis de agrupamiento, análisis factorial, análisis de componentes principales, etc.), permitió definir grupos de asociación de elementos.

Para observar la variación de las concentraciones de elementos en el perfil de sedimentación y en la zona estudiada, y con base en los percentiles de distribución de cada elemento, se elaboraron mapas

de contenidos de elementos por cuencas representando contenidos en superficie y contenidos en profundidad.

Para conocer la variabilidad espacial de los elementos y de los grupos de asociación encontrados, se efectuó análisis espacial mediante técnicas geoestadísticas (variogramas y kriging), proceso que posibilitó la elaboración de mapas de distribución espacial.

El muestreo sistemático del territorio utilizando sedimentos de planicie de inundación en un muestreo de Ultra Baja Densidad tomando como unidad de muestreo grandes cuencas (500 a 6000 km² de cuenca de captación), ha demostrado ser la alternativa costo-eficiente para definir las provincias, dominios y patrones de distribución de los elementos químicos en el territorio colombiano en pocos años.

La distribución espacial de los elementos en sedimentos de planicie de inundación tanto en el horizonte superficial como en el horizonte profundo, permite diferenciar tres grandes regiones o provincias de enriquecimiento de los elementos químicos: **Región Oriental, Región Central de Influencia del sistema cordillerano Andino y Región Costera del Caribe.**

Los patrones de distribución de los elementos delimitan zonas de enriquecimiento que pueden denominarse regiones o provincias de dominio de elementos o de asociaciones de elementos. Los principales dominios identificados son dominio o provincia de enriquecimiento de **Hf-Zr-Si**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Bi-Cs-Pb-Th**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Na-Sr-Cl**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Gd-Nd-Sc-Sm**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Be-Dy-Eu-Ga**, dominio o provincia de enriquecimiento de **B-Hf-Lu-Nb**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Eu-Gd-Sm-Be**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Sn-Ti-Tm-U**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Al-Tl-Tb-Sm**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Hf-Zr-Nb-Sn**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Sc-Ga-Tb**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Y-Zr**, dominio o provincia de enriquecimiento de **Tb-V**.

Los resultados obtenidos permitieron avanzar en el conocimiento geoquímico del territorio, aportar información geoquímica para definir la línea base geoquímica de Colombia y delimitar zonas y regiones de dominio o concentración de elementos de interés para exploración de recursos minerales, planeación agrícola, estudios de salud y medio ambiente y para planeación de uso del territorio.

El adelanto de éste proyecto también permitió a INGEOMINAS adquirir experiencia en muestreo de sedimentos de planicie de inundación y comprobar la validez de las metodologías de muestreo geoquímico de Ultra Baja Densidad para adquirir información geoquímica multipropósito en corto tiempo y a bajo costo.

La información y análisis generados en éste proyecto hacen necesario que se elaboren informes particulares en donde se efectúan análisis y aplicaciones específicas de los dominios, asociaciones y zonas de enriquecimiento de elementos en el territorio y se analice su correspondencia con los terrenos geológicos y su utilidad y aplicación en la búsqueda de recursos minerales, riesgos para la salud por acumulación de elementos potencialmente peligrosos (EPPs, planeación agrícola y en los planes de desarrollo y uso del territorio.

2. INTRODUCCIÓN

Los programas de reconocimiento geoquímico estratégico, también conocidos como de exploración geoquímica multipropósito, contemplan el uso de muestreo de muy baja densidad (amplio espaciamiento - 1 muestra por 100 - 10.000 km²), y están orientados a posibilitar la definición de dominios, delimitar mega provincias y provincias e identificar anomalías geoquímicas regionales y locales.

La importancia del mapeo geoquímico sistemático fue señalada desde finales de la década de los setenta por Rose et al., (1979) y desde entonces se han adelantado muchos proyectos nacionales y regionales, cuyos resultados, a pesar de los esfuerzos realizados, no son comparables ni de utilidad global; debido, entre otras razones, a la multiplicidad de medios de muestreo utilizados, a la diferencia y a la calidad en métodos analíticos empleados, y a que en cada proyecto se analizaron diferentes elementos de acuerdo con necesidades inmediatas de cada uno de ellos.

Con el objetivo fundamental de estandarizar metodologías para mapeo geoquímico a nivel global, se inició en 1988, bajo el auspicio de un Programa de Correlación Geológica Internacional de la UNESCO, el proyecto de mapeo geoquímico internacional IGCP 259. Paralelamente, geoquímicos de los países escandinavos lanzaron la idea de muestreo geoquímico de amplio espaciamiento o de ultra baja densidad (UBD) como estrategia para elaborar el mapa geoquímico del mundo. Después de finalizado el proyecto IGCP 259, y como continuación de éste, fue aprobado el proyecto de Líneas Base Geoquímicas Globales IGCP 360, el cuál oficialmente terminó en 1997. El trabajo iniciado por los proyectos anteriores, ha continuado con el Grupo de Trabajo sobre Líneas Base Geoquímicas Globales de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS), auspiciado por la Asociación Internacional de Geoquímica y Cosmoquímica (AGC).

El muestreo geoquímico de amplio espaciamiento (Ultra Baja Densidad) se ha planteado como alternativa viable para adquirir un conocimiento general de la geoquímica de amplias regiones en un corto tiempo y para proveer información que permita monitorear las “respuestas tardías a amenazas geoquímicas y planear su remediación”; así como para delinear la heterogeneidad de la tierra y delimitar bloques geoquímicos con enriquecimiento en ciertos minerales (bloque >1.000 km², Xie, 1995). La información generada por este tipo de muestreo es muy útil en la evaluación de recursos minerales y en la predicción de las regiones más favorables para descubrir grandes depósitos minerales (Ottesen, et. al., 1989).

Como resultado de los proyectos auspiciados por la UNESCO y los Servicios Geológicos del mundo, se estableció una red de trabajo de referencia geoquímica (GRN) con cerca de 5.000 celdas de 160 x 160 km, las cuales cubren toda la superficie terrestre. Las celdas tienen su origen en el Ecuador en el meridiano 0 (Greenwich) y son simétricos al norte y sur de Ecuador. Por conveniencia, las celdas están delimitadas por líneas de latitud 1 1/2° (aproximadamente 166 km). Para mantener un área constante de 25.600 km² los meridianos que definen los límites este y oeste están sistemáticamente desplazados en longitud E y W en bandas latitudinales.

Para cada celda de la red geoquímica de referencia, se han sugerido dos tipos de muestreo: uno denominado diseño de pequeñas cuencas y de muestreo multi-medio (aguas, sedimentos activos y suelos residuales), y otro de grandes cuencas y de muestreo uni-medio (sedimentos de planicie de inundación). Adicionalmente y dado que los datos obtenidos mediante muestreos geoquímicos regionales (baja densidad) son multipropósito (medio ambiente y salud, geología, agricultura, recursos minerales), se definió que cada muestra sea analizada para el máximo número de

elementos posibles (71) y haciendo uso de técnicas analíticas que permitan los más bajos límites de detección y la mejor calidad en los resultados (precisión y exactitud).

En el adelanto de programas de exploración geoquímica multipropósito se han desarrollado nuevos conceptos y tendencias, entre las cuales se destacan el concepto de patrones geoquímicos, de lo local a lo global, heterogeneidad de la Tierra, bloques geoquímicos y reducción progresiva de objetivos, entre otros, (Xie & Yin, 1993). Estas nuevas ideas han generado programas de cartografía regional que las han confirmado y validado.

Entre las experiencias exitosas en muestreos de sedimentos de planicie de inundación en grandes cuencas de drenaje, se pueden mencionar los programas del Foro de Servicios Geológicos de países Europeos – FOREGS (26 países) y el programa EGMON del IGGE de China. Este último programa fue especialmente exitoso y demostró la utilidad de este tipo de muestreos en la obtención de información sobre características geoquímicas regionales y en la delimitación de dominios y bloques geoquímicos, a bajo costo.

De acuerdo con las nuevas tendencias descritas anteriormente y con el objetivo de obtener información geoquímica de Colombia en corto tiempo y a bajos costos, el proyecto Compilación y Levantamiento de Información Geoquímica del Territorio, planeó e inició el muestreo denominado de Ultra Baja Densidad (UBD), de “grandes cuencas y uni-medio”, en el cual se colectaron muestras de sedimentos de planicie de inundación (floodplain - cuencas de captación entre 1.000 y 6.000 km² y sobrebanca – cuencas de captación entre 200 y 1.000 km²).

Para garantizar un cubrimiento espacial homogéneo y permitir el manejo de datos y su representación espacial en mapas, se diseñó una red de muestreo, y se tomó como referencia la red para muestreo geoquímico global con celdas de 160 x 160 km (de las cuales 57 le corresponden a Colombia), las que se subdividieron a su vez en celdas de 80 x 80 km. En cada celda de 80 x 80 km se delimitaron las cuencas (200 – 6.000 km²) y se seleccionan dos de ellas para recolectar las muestras correspondientes. Aleatoriamente, en una celda de 80 x 80 km se seleccionó otra cuenca para tomar una muestra duplicado de celda y en una de las cuencas muestreadas se tomaron muestras adicionales correspondientes a duplicados de muestreo.

El muestreo de todo el territorio colombiano fué planeado en 4 Fases, así: **Fase I** – zona centro y norte del país - áreas Magdalena - Cauca y Caribe; **Fase II** – zona del oriente colombiano - áreas Orinoco, Amazonas, Catatumbo; **Fase III** – zona occidental de Colombia - área Pacífico; y **Fase IV** – zona sur del territorio- áreas Amazonas y sur de Colombia.

Para facilitar el muestreo en la Fase I (2001), la zona centro y norte del país fue dividida en seis sub-zonas en las cuales se muestrearon 104 cuencas. En la Fase II (2003), para completar el muestreo en el centro y el oriente del país, se consideraron 3 grandes regiones en donde se muestrearon 120 cuencas.

En cada cuenca seleccionada se colectaron sedimentos de planicie de inundación (floodplain, sobrebanca y algunos suelos aluviales): una muestra superficial (A₀₋₂₅), una muestra profunda (25 cm más profundos, hasta 200 cm) y una muestra para datación. Adicionalmente, se tomaron duplicados de muestra.

En la primera Fase (2001), se recolectaron 104 muestras superficiales con 8 duplicados, 104 muestras profundas con 8 duplicados y 104 muestras para datación con 8 duplicados (104 cuencas).

En la segunda Fase (2003) se colectaron 120 muestras profundas con 23 duplicados, 120 muestras superficiales con 23 duplicados y 120 muestras para datación con 23 duplicados.

Cada muestra recolectada y cada sitio de muestreo fueron documentados con datos de campo y fotografías. La información se consignó en formatos de campo establecidos por el proyecto Compilación y Levantamiento de Información Geoquímica del Territorio, de acuerdo con estándares internacionales (Prieto et al, 2000; Prieto y Gonzalez, 2003 a, 2003 b).

Para análisis químico se seleccionaron las cuencas más representativas de las áreas hidrográficas Magdalena - Cauca y Caribe y de la zona oriental de Colombia, tratando en lo posible de mantener un cubrimiento sistemático y homogéneo del territorio. Las muestras seleccionadas se prepararon de acuerdo con protocolos estándar establecidos por el proyecto y se enviaron a China para el análisis de 71 elementos químicos. Mediante convenio de cooperación bilateral entre la república de China y Colombia, el IGGE de China (Institute for Geophysical and Geochemical Exploration), efectuó (2003 y 2004) análisis químico para 71 elementos en 194 muestras superficiales A₀₋₂₅, 195 muestras profundas (25 cm más profundas, hasta 2 metros), 25 duplicados de muestras superficiales y 25 duplicados de muestras profundas. Para datación con ¹⁴C se seleccionaron 20 cuencas en las cuáles las muestras presentaban altos contenidos de carbono total.

En el Capítulo 3 de este informe se presenta la descripción de las características generales de la región estudiada que incluye: localización, recursos hídricos, relieve, clima, ecosistemas, suelos, recursos minerales, geología, geomorfología, tectónica y actividad antrópica.

En el Capítulo 4 se describen las metodologías adoptadas por INGEOMINAS para cartografía geoquímica de Ultra Baja Densidad: muestreo, preparación, análisis químico (IGGE), procesamiento y análisis de información y producción de mapas.

En el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos, así como el análisis e interpretación de la información. Finalmente se presentan conclusiones, recomendaciones y las referencias bibliográficas que soportan el informe.

La información colectada en campo, sobre sitio de muestreo y características de las muestras colectadas, fue almacenada y está disponible en la base de datos de información geoquímica Oracle-SDE de INGEOMINAS. En el **Anexo 1** se presenta la información recolectada en campo para sitio de muestreo y muestra (formato por sitio de muestreo); y en el **Anexo 2** se presenta la documentación fotográfica de cada sitio de muestreo.

La información completa de los análisis químicos para 71 elementos se presenta en el **Anexo 3**. Los resultados del tratamiento estadístico efectuado se presentan en el **Anexo 4**. Los mapas de concentración de elementos por cuencas y para los grupos de asociación (factores) de elementos se presentan en el **Anexo 5** y los mapas de distribución espacial de elementos se presentan en el **Anexo 6**.

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio (**Figura 1**) comprende regiones del centro (región Andina), el caribe y el oriente del territorio colombiano, pertenecientes a las áreas hidrográficas Caribe (Guajira, Catatumbo), Magdalena – Cauca, Orinoco y una pequeña parte del extremo norte del área amazónica.

La red de drenaje es variada e incluye zonas deficitarias de agua y zonas con excedentes que están sometidas a periodos prolongados de inundación. El área hidrográfica del Caribe, está constituida por las cuencas de las corrientes que vierten sus aguas al mar Caribe, directamente o a través de los principales ríos del sistema, tales como el río Magdalena y sus afluentes (ríos Cauca, Cesar, Nechí, San Jorge, Sogamoso, Saldaña, Bogotá, Sumapaz, etc.), río Ranchería, río Palomino, río Don Diego, río Catatumbo, río Sardinata, río Cesar y otros ríos de la zona costera del Mar Caribe.

En el oriente de Colombia el drenaje conforma el área hidrográfica del río Orinoco con sus afluentes (río Guaviare, Matavén, Vichada, Tuparro, Tomo, Bitá, Meta, Arauca, Inírida afluente del sistema Orinoco-Guaviare, entre otros) y el área hidrográfica del río Amazonas (río Guainía afluente del sistema Guainía – Negro, entre otros).

El área estudiada presenta grandes diferencias de relieve con alturas que oscilan entre 0 msnm en la región costera del Caribe, 2.600 msnm en la Sabana de Bogotá y con máxima altitud en la Sierra Nevada de Santa Marta (5775 msnm); hecho que permite la ocurrencia de variaciones climáticas (cálido húmedo, hasta frío húmedo) y favorece el desarrollo de variados tipos de suelos y vegetación. En el área se han desarrollado diversas zonas de vida, entre las que se destacan el bosque húmedo premontano (bh-PM), bosque húmedo tropical (bh-T), bosque seco (bs), bosque cálido tropical (bc-T), bosque pluvial montano (b-PM) y bosque andino (b-A).

En las inmediaciones de esta amplia zona están localizadas importantes ciudades del país, como Bogotá, Barranquilla, Bucaramanga, Cúcuta, Tunja, Arauca, Riohacha, Santa Marta, y Valledupar, y numerosas poblaciones menores. En el área de influencia de las cuencas hidrográficas muestreadas, también se localizan ciudades importantes tales como Medellín, Manizales, Ibagué y Cartagena.

La actividad económica predominante es la agricultura de minifundio especialmente en los valles de los ríos principales, con presencia de cultivos semi-industrializados de palma africana y banano en la costa Caribe y de floricultura en la Sabana de Bogotá. En segundo lugar, se desarrollan actividades ganaderas, industria diversificada (corredores Bogotá – Soacha, Paipa – Sogamoso - Nobsa, Barranquilla - Vía 40 - Soledad, Mamonal, etc.) y actividades mineras entre las cuales se destacan la minería de carbón en la región Costera del Caribe, la de níquel en Córdoba y la minería de oro en la cuenca del río Cauca y en el sur de Bolívar.

3.1. LOCALIZACIÓN

La zona estudiada corresponde un área aproximada de 600.000 km², en la cuál se colectaron sedimentos de llanura de inundación con una densidad de muestreo muy baja (ultra baja densidad – UBD).



Figura 1. Zona de estudio

En la primera Fase se cubrió un área aproximada de 200.000 km², colectando muestras en drenajes pertenecientes al área hidrográfica del Caribe (vertiente del Caribe) y al área hidrográfica Magdalena-Cauca. Se muestrearon corrientes que drenan a la cuenca del río Magdalena (desde la ciudad de Girardot hasta su desembocadura en el Océano Atlántico), a la cuenca del río Cauca (desde Cáceres hasta su desembocadura en el río Magdalena) y corrientes que provienen de la Sierra Nevada de Santa Marta y drenan hacia la ciénaga Grande de la Magdalena, al Océano Atlántico y al río Cesar.

En la segunda Fase se cubrió un área aproximada de 400.000 km². En ésta fase se completó el muestreo de drenajes pertenecientes al área hidrográfica del Caribe (Guajira y Catatumbo;) y se cubrió parte de la región Andina que drena al área hidrográfica Magdalena-Cauca. Adicionalmente se colectaron muestras en corrientes que drenan al área hidrográfica del Orinoco, así como una pequeña parte de los drenajes del norte del área hidrográfica del Amazonas.

El área total cubierta en las dos fases, aparece junto con las estaciones de muestreo y las cuencas muestreadas en las **Figuras 2 y 3**.

3.2. CLIMA

La ubicación geográfica y las características fisiográficas del territorio hacen que el clima en Colombia sea muy variado tanto espacialmente como en el período anual (IDEAM, 1998 a).

En el área de estudio en particular, se presentan amplias variaciones climáticas relacionadas principalmente con cambios altitudinales (2.600 msnm en la Sabana de Bogotá y 0 msnm a nivel del mar en la región de la costa del Caribe).

De acuerdo con el índice hídrico de Thronthwaite (IDEAM, 1998 a), que involucra los parámetros evapotranspiración potencial y oferta hídrica y evalúa su comportamiento temporal, se han delimitado zonas con climas característicos que en la zona estudiada pueden resumirse así: clima superhúmedo (mayor disponibilidad hídrica en el suelo) en la cuenca Amazónica, el sur de la Orinoquía, estribaciones de la Cordillera Oriental, el bajo Cauca y parte del Magdalena medio. Los climas húmedo, semihúmedo y subhúmedo se presentan hacia las estribaciones de las tres cordilleras, y en áreas del medio Magdalena y el bajo Cauca.

Los climas seco y semiárido ocupan la mayor parte de la costa Atlántica, cuencas de los ríos Sogamoso y Chicamocha, altiplano cundiboyacense, cuenca del río Bogotá, parte de los valles del medio y alto Magdalena y áreas del medio Cauca antioqueño.

El clima árido se presenta en toda la media y alta Guajira y en inmediaciones de Cúcuta.

De acuerdo con la zonificación climática (IGAC, 1989) por regiones, la Sabana de Bogotá posee un clima de montaña húmedo de tierra fría, con temperaturas que oscilan entre 12° y 18°C.

El flanco occidental de la Cordillera Oriental corresponde a un clima de montaña húmedo de tierras templadas con alturas inferiores a los 2.100 msnm y temperaturas entre 18°C y 25°C.

El clima predominante en los Valles alto y medio del río Magdalena corresponde a cálido húmedo con precipitación media anual de 2.500 a 3.000 mm y con temperaturas mayores a los 25°C.



Figura 2. Muestreo de Ultra Baja Densidad: Fase I – Magdalena – Cauca, Caribe (2001) y Fase II Oriente- Catatumbo, Orinoquía, Amazonía (2003)



Figura 3. Cuencas y sitios de muestreo

En el Bajo Magdalena se desarrolla un clima de selva tropical lluvioso, con temperaturas que oscilan entre los 24 y 30°C y un índice pluviométrico entre los 2.000 y 10.000 mm/año. En la Orinoquía y la Amazonía el clima predominante es también de selva tropical húmeda con promedio anual de temperatura de 24°C, humedad relativa alta y periodos de máxima precipitación entre marzo y septiembre (2700 mm/a hacia el norte y 3500 mm/a hacia el sur y 4500 mm/a hacia el piedemonte). Entre mayo y julio la precipitación es menor y llega a su mínimo en enero y febrero.

El valle de los ríos Cesar y Ranchería corresponden a un clima tropical seco, donde la evaporación es superior a la precipitación y presenta una temperatura superior a 21°C.

A continuación se reseñan los fenómenos que influyen directamente en la determinación del clima, como la radiación solar, la temperatura atmosférica, la precipitación y los vientos.

3.2.1. Radiación solar

La región que recibe mayor radiación solar durante el año es la península de La Guajira, que presenta valores máximos en el mes de julio (promedios superiores a 650 cal/cm²/día) y mínimos en diciembre (530 cal/cm²/día). El mismo comportamiento lo presenta la parte media del valle del río Cauca y el valle del río Magdalena hacia la costa Caribe y la zona de Cúcuta (550 - 450 cal/cm²/día).

En la Amazonía, el valor máximo se presenta en octubre (330 cal/cm²/día).

En la región Andina sobresale el altiplano cundiboyacense con valores máximos en febrero (480 cal/cm²/día) y mínimos en julio (420 cal/cm²/día), incrementos en septiembre y descensos en noviembre. El resto del área presenta valores extremos entre 400 y 320 cal/cm²/día, para los meses de febrero y junio, respectivamente (IDEAM, 1998 a).

El Piedemonte Llanero en los alrededores de Villavicencio es una de las zonas con niveles mas bajos de radiación solar (promedio < cal/cm²/día) y poca variabilidad anual.

3.2.2. Temperatura

La situación geográfica de Colombia determina la amplitud anual de la temperatura del aire y las particularidades fisiográficas definen su variabilidad espacial. A nivel regional se presentan diferentes pisos térmicos característicos de las diferentes zonas geográficas (IDEAM, 1998 a).

En la región Andina, el régimen de la temperatura del aire se particulariza en pisos térmicos caracterizados por la disminución de la temperatura media a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar. En los valles de los ríos más caudalosos (Magdalena, Cauca y Sogamoso, entre otros), se registran altas temperaturas (24-28°C), mientras que en el altiplano cundiboyacense, así como en la zona montañosa del centro de Antioquia y en las zonas aledañas a nevados y páramos, se presentan mínimas temperaturas (8-12°C).

En la costa del Caribe, la temperatura media oscila entre 24 y 28°C en Córdoba y en el centro y norte de Sucre, mientras que en La Guajira, sur oriente de Sucre, sur y oriente de Atlántico, Magdalena (excepto la Sierra Nevada de Santa Marta) y en el valle del río Cesar, las temperaturas fluctúan entre 28 y 30°C.

En la Orinoquía y Amazonía en donde el relieve es homogéneo la temperatura media del aire es uniforme y fluctúa entre 24°C y 28°C.

3.2.3. Precipitación

Colombia por estar situada en la zona ecuatorial está influenciada por los alisios del noreste y sureste que provienen de latitudes subtropicales y confluyen en la denominada Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), que favorece el desarrollo de nubosidad y lluvias y pasa por el territorio colombiano en dos ocasiones cada año. Lo anterior unido a factores orográficos, la integración terrestre – marina y la presencia de áreas selváticas o boscosas, determinan el régimen de lluvias en cada región

La distribución de las precipitaciones permite clasificar las regiones naturales así:

Región Caribe: En ésta región, los meses más secos están comprendidos entre diciembre y marzo, y los más lluviosos entre agosto y noviembre.

En la Alta Guajira, la precipitación total es inferior a 500 mm/año y la frecuencia media de días con lluvia es inferior a 45 días por año, cifras que se incrementan hacia la parte media y baja, en donde se alcanzan los 1.000 mm en 50 días al año. La Sierra Nevada de Santa Marta conforma una zona meteorológica desligada del comportamiento de la región; en su parte norte se registran precipitaciones superiores a los 2.500 mm, mientras que en los sectores oriental y suroriental están alrededor de 1.500 mm en más de 100 días al año.

En las llanuras del Caribe, la precipitación aumenta del litoral hacia el interior, de tal modo que en Barranquilla y Cartagena se registran valores alrededor de 1.000 mm con frecuencia anual de 50 días con lluvia, mientras que en las llanuras de Córdoba, Sucre, Magdalena y Cesar la precipitación oscila entre 1.500 y 2.000 mm con la misma frecuencia.

Sobre el río Magdalena la precipitación va decreciendo a lo largo de su recorrido llegando a 1.000 mm/a cerca de su desembocadura.

En las llanuras de Córdoba, Sucre, Magdalena y Cesar se registran precipitaciones entre 1.500 y 2.500 mm/a; mientras que la Serranía de San Lucas es bastante lluviosa.

Región Andina: En ésta región los meses más secos son enero y febrero, mientras que octubre y noviembre son los más lluviosos; sin embargo, se aprecia otra temporada lluviosa en abril-mayo y otra seca de menor intensidad en julio - agosto.

En la región Andina la precipitación no supera los 3.000 mm/a con excepción del valle medio del Magdalena y de las estribaciones septentrionales de las cordilleras Occidental y Central en donde se pueden alcanzar 4.000 mm/a y en localidades secas en donde la precipitación media es de 500 mm/a o menor.

En la montaña antioqueña se presenta gran variabilidad, de tal modo que en el Valle del Aburrá se han observado precipitaciones entre 2.000 y 2.500 mm en 200 días al año, mientras que en la parte norte de Antioquia se han registrado valores entre 3.500 y 4.000 mm anuales en 250 días.

En el valle medio del río Cauca la precipitación en un promedio de 100 días no supera los 1.500 mm. Hacia la parte alta en las vertientes, las precipitaciones alcanzan valores cercanos a 2.000 mm en 150 días al año, mientras que en la parte baja oscila entre 4.000 mm/ 250 días al año en las estribaciones de las cordilleras.

La mayor pluviosidad (6.000 mm en 250 días) se registra hacia la vertiente oriental en las cabeceras del río Caquetá.

Sobre el río Magdalena, la precipitación decrece a lo largo de su recorrido y varía entre 3.000 mm en 150 días al año en Puerto Mosquito a 1.000 mm en 50 días al año cerca de su desembocadura. En la parte alta del valle del río Magdalena, desde Pitalito hasta Ambalema, inclusive, la precipitación no alcanza los 1.500 mm anuales; desde Ambalema hasta Puerto Boyacá, la lluvia se incrementa hasta alcanzar los 3.000 mm/año y de este punto hasta Puerto Wilches, los registros oscilan entre 2.500 y 3.000 mm/año. A lo largo del valle del río Magdalena, los días con lluvia varían entre 100 y 150 al año (IDEAM, 1998 a).

En la región del altiplano cundiboyacense la precipitación es menor a 1.000 mm en menos de 200 días al año; mientras que en la vertiente occidental del altiplano las precipitaciones alcanzan los 2.500 mm/año. En esta zona se presentan grandes variaciones en distancias relativamente pequeñas, tal es el caso de la sabana de Bogotá, en donde caen alrededor de 1.500 mm en las estribaciones de los cerros sur orientales, mientras que en el sector sur occidental la precipitación se reduce a 1.000 mm/año.

En la montaña santandereana, la precipitación oscila entre 1.500 y 2.000 mm entre 200 y 250 días al año. Se presenta un máximo de precipitación (4.500 mm/año) en cercanías a Oiba al sur del departamento de Santander y Girardota en las cabeceras del río Maroua al sur de Norte de Santander; y un mínimo inferior a 1.000mm en Cúcuta y sus alrededores.

Orinoquía: En los llanos orientales la precipitación decrece desde los 5.000mm en 200 días al año en la ladera de la cordillera Oriental, cerca de Villavicencio, hasta 1.500 mm/a o menos en el extremo oriental de Arauca. Hacia el sur la precipitación oscila entre 2.500 mm/a y 3.500 mm/a en Meta, Guainía y Guaviare.

La precipitación mas baja se registra entre diciembre y marzo y la mas alta entre mayo y agosto.

Amazonía: Los meses más lluviosos son diciembre y enero. La mayor precipitación (4.000 mm y 5.000 mm en 200 y 250 días al año) se registra hacia el piedemonte de la Cordillera Oriental y en el resto de la región oscila entre 3.000 y 4.000 mm/a.

3.2.4. Vientos

Colombia, por encontrarse ubicada entre el trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio, está sometida a los vientos Alisios, que soplan del noreste en el hemisferio Norte y el sureste en el hemisferio Sur; adicionalmente, por el contraste mar - tierra en las costas y por la compleja orografía, se forman sistemas de circulación de vientos locales y de meso escala. Sobre las regiones planas, como la llanura del Caribe, Orinoquía y Amazonía, se observan circulaciones definidas en el transcurso del año, directamente influenciadas por los Alisios, mientras que en los valles interandinos y en las zonas montañosas, a pesar de la influencia de los Alisios, las condiciones fisiográficas determinan la dirección y velocidad de los vientos.

3.3. RECURSO HÍDRICO

3.3.1. Aguas superficiales

3.3.1.1. Hidrografía

El sistema orográfico (geología, topografía) y climático de Colombia ha permitido el desarrollo y la conformación de cuencas hidrográficas muy variadas en tamaño, forma y rendimiento hídrico, las cuales han sido agrupadas en seis vertientes o grandes regiones hidrográficas (Caribe 15.430 m³/s, Pacífico 6.903 m³/s, Catatumbo 427 m³/s, Amazonas 22.185 m³/s, Orinoco 21.399 m³/s e Insular) y en cinco grandes áreas hidrográficas (Caribe, Magdalena – Cauca, Orinoco, Amazonas y Pacífico) (IDEAM, 1998 a) (**Figura 4**).

La orientación sur -norte que presentan las tres grandes cordilleras, ha encauzado al río Magdalena en dicha dirección, entre las cordilleras Central y Oriental; al río Cauca entre las cordilleras Central y Occidental y al río Atrato entre la Cordillera Occidental y las serranías de Baudó y Darién; y a su vez, las vertientes externas de los ramales andinos han distribuido las corrientes hacia el oriente y el occidente del territorio.

El área de estudio cuenta con un gran potencial hídrico y una amplia red de drenaje que confluye hacia las áreas hidrográficas Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco y Amazonas (Marín, 1992; IDEAM, 1998 a).

La vertiente del Caribe está constituida por las hoyas hidrográficas de las corrientes que drenan hacia el mar Caribe directamente o por medio de los principales ríos del sistema, tales como el río Magdalena y sus afluentes; los drenajes provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta; baja y alta Guajira y amplias zonas de inundación y ciénagas que se incrementan hacia la zona costera del Caribe.

La vertiente del Catatumbo está integrada por las corrientes que drenan sus aguas al Lago de Maracaibo y por los sistemas de los ríos Tarra y Zulia y de sus principales tributarios.

La vertiente del Orinoco la integran los ríos que drenan al río Orinoco, tales como Arauca, Meta, Vichada, Guaviare, Inírida, Casanare, Tomo y Tuparro, entre otros.

La vertiente del Amazonas está integrada por numerosos tributarios del Amazonas o de sus afluentes, tales como Caquetá, Putumayo, Vaupés, Guainía, Apaporis, Caguán, Orteguzaza, Yará e Iga-Paraná, entre otros.

La cuenca del río Magdalena es la unidad hidrográfica más importante del país y de la zona de estudio, con una longitud aproximada de 1.550 km, un caudal promedio anual de 7.200 m³ s⁻¹ y un área de su cuenca de captación de 260.000 km², aproximadamente. En su largo recorrido se ve afectado por factores físicos, químicos, geológicos y climáticos que influyen en la disponibilidad y características de sus aguas. El río Cauca, por otro lado, posee una longitud 1.024 km y un área de captación cercana a los 60.000 km², y se constituye en el principal tributario del Magdalena. Atraviesa el valle interandino formado por las cordilleras Occidental y Central, recorre al país en forma paralela a la cuenca del río Magdalena y vierte sus aguas al mar Caribe como afluente de este último.



Figura 4. Áreas Hidrográficas de Colombia (IDEAM, 1998 a)

Para ilustración, se presenta el inventario de cuencas hidrográficas realizado por el IDEAM (1998a), en el cual se agrupan las cuencas en 12 zonas con características hidrológicas representativas y se presentan clasificadas por su tamaño (**Tabla 1**). Las cuencas muestreadas se encuentran distribuidas en las zonas hidrográficas del bajo Magdalena - río Sinú; Sierra Nevada de Santa Marta; baja y alta Guajira; alto Magdalena; medio Magdalena; medio Cauca; cabeceras de ríos Meta y Arauca; Catatumbo; sabanas de ríos Meta y Arauca; y ríos Guaviare, Vichada, Amazonas.

3.3.1.2. Escorrentía

La zona Andina se constituye en la zona de mayor desarrollo y presión por el uso del recurso hídrico, porque en ella se conforma la cadena montañosa más importante del país que da origen a los principales ríos que bañan los campos agrícolas y surten de agua a las principales ciudades e industrias.

Tabla 1. Inventario de cuencas hidrográficas (IDEAM, 1998 a).

Zonas	< 10 km ²	10-100 km ²	100- 1000 km ²	1000- 5000 km ²	5000- 10000 km ²	10000- 50000 km ²	50000- 100000 km ²	>100000 km ²
Pacífico y Atrato	91500	3900	153	26		4		
Bajo Magdalena - Río Sinú	8570	300	59	4				
Sierra Nevada de Santa Marta	19100	170	47					
Baja y alta Guajira	3750	300	45					
Alto Magdalena	8400	320	72	16	2			
Medio Magdalena	20700	1420	142	17	4	1		
Alto Cauca	7321	370	51	4				
Medio Cauca	6420	177	89	6	2			
Cabeceras ríos Meta y Arauca	11605	216	25	4				
Catatumbo	11420	284	27	5				
Sabanas ríos Meta y Arauca	5525	510	170	34				
Ríos Guaviare, Vichada, Amazonas	520000	18900	430	33	16	10	2	3(2)
	714311	26867	1310	149	24	15	2(1)	4(3)

(1)- ríos Cauca e Inírida, (2)- ríos Guaviare, Caquetá y Putumayo, (3)- ríos Guaviare, Caquetá, Magdalena y Putumayo

La escorrentía en la cuenca del Magdalena se caracteriza por altas variaciones y una tendencia a disminuir en su tramo final, a medida que el río avanza y se aproxima al mar Caribe. En el alto Magdalena, en donde recibe aportes provenientes de la sabana de Bogotá, se presenta una escorrentía media de 310 a 1.000 mm/año, en el medio Magdalena (Cundinamarca, Santander y sur de Bolívar), la escorrentía media alcanza valores de 1.100 mm/año dado que recibe aportes de ríos caudalosos tales como Sogamoso, Lebrija, Carare, Cimitarra, Opón y Cesar; y en el bajo Magdalena (Bolívar y Magdalena) los rendimientos disminuyen notoriamente y la escorrentía llega a los 450 mm/año.

La escorrentía en el río Cauca se incrementa desde su nacimiento a medida que avanza en su recorrido hacia su desembocadura en el río Magdalena. En la zona del bajo Cauca (a partir de Caucasia), el río cruza una zona bastante húmeda en donde recibe los aportes del río Nechí y su afluente el río Porce y la escorrentía alcanza los 1.700 mm/año, sin embargo, al continuar su recorrido hacia su desembocadura, recibe como afluentes pequeños drenajes que hacen descender el valor promedio del aporte a 1.500 mm/año.

La zona Caribe no es homogénea en los rendimientos y se diferencian tres áreas específicas: La Guajira, la Sierra Nevada de Santa Marta, y las sabanas del San Jorge, Sinú y Magdalena. En la media Guajira la escorrentía oscila alrededor de 25 mm/año, mientras que en el piedemonte oriental de la Sierra Nevada de Santa Marta se incrementa a 190 mm/año y en alturas de 2.500 msnm asciende a 1.000 mm/año para luego disminuir a 200 mm/año cerca al casco glacial. En el complejo cenagoso del río Magdalena (Magdalena y Bolívar), la escorrentía anual se estima en 450 y 500 mm/año.

En la zona del Catatumbo la escorrentía fluctúa entre 1.000 y 1.500 mm, con los mayores rendimientos hacia la parte baja del río en la frontera con Venezuela.

En la Orinoquía la escorrentía decrece del piedemonte de la cordillera Oriental hacia la zona baja del río. En el piedemonte, al sur de la Serranía de la Macarena (cuencas de los ríos Caquetá y Putumayo) la escorrentía varía entre 2.500 y 1.700 mm; en la zona central (cuencas de los ríos Guatiquía, Humea, Upía) y en el alto Guaviare (ríos Guayuriba y Arriarí) la escorrentía alcanza los 1.700 mm; y en la zona norte (cuencas de los ríos Arauca – Cobugón y Margua y Casanare) hasta la frontera con Venezuela la escorrentía alcanza 1.500 mm. En las sabanas de los Llanos Orientales (bajo Meta, ríos Tuparro Vichada y Guaviare) la escorrentía fluctúa entre 1.200 y 1.500 mm. En las áreas selváticas (cuencas de ríos Caquetá, Yarí, Putumayo y bocas del río Igarapará) la escorrentía alcanza valores promedio de 1.650 mm. En las cuencas fronterizas del oriente colombiano (ríos Guainía, Vaupés y Atabapo) la escorrentía oscila entre 1.700 y 1.900 mm.

3.3.1.3. Aporte de sedimentos

En Colombia se calcula que son transportados, en promedio, cerca de 300 millones de toneladas de sedimentos al año, los cuales llegan a los océanos a través de todo el sistema hidrográfico nacional, en donde el más aportante es el río Magdalena al mar Caribe (130.000 ton/año). Más de la mitad del país presenta promedios anuales de sedimentos en sus cauces de 100 mg/l, aunque las concentraciones mayores corresponden a la zona Andina, en donde se destacan la parte baja del río Chicamocha, la cuenca del río Minero y la zona alta del río Upía, drenajes en los cuáles se alcanzan concentraciones mayores a los 2.000 mg/l. En las zonas altas del Piedemonte Llanero las concentraciones de sedimentos oscilan entre 600 a 1.500 mg/l; mientras que en las zonas boscosas como la Amazonía la concentración de sedimentos es mínima y oscila entre 0 y 100 mg/l.

3.3.1.4. Cuerpos de agua: lagos, lagunas, embalses, ciénagas y pantanos.

En Colombia existen cerca de 1.600 cuerpos de agua, identificados como lagunas, lagos y embalses, de los cuáles el 97,5% son cuerpos pequeños, con superficies hasta 100 m² y de pequeña profundidad. Existen alrededor de 1.900 ciénagas (451.419 ha) de las cuales la mayoría (320.000 ha) pertenecen a la cuenca del Magdalena, e incluyen sus afluentes los ríos San Jorge y Cauca. Gran número de ciénagas se encuentran localizadas en la zona de la costa Caribe, en los departamentos de

Bolívar, Córdoba, Magdalena y Sucre. La superficie total de los pantanos en Colombia es de 2.000.000 ha, concentradas principalmente en los departamentos de Amazonas, Guainía y Guaviare.

3.3.2. Aguas subterráneas

El área de estudio pertenece a las provincias hidrogeológicas Andina - vertiente atlántica y Costera - vertiente atlántica, Amazonas, Orinoco y Escudo septentrional (INGEOMINAS, 1987a). La provincia hidrogeológica Andina - vertiente atlántica comprende el sistema montañoso centro-occidental del país, que conforman las cordilleras Occidental, Central y Oriental, y ocupa una región entre los límites con Ecuador, en el sur, hasta las estribaciones meridionales de la serranía de Perijá, en el norte. Sedimentos con permeabilidad alta a moderada están presentes en el valle del río Cauca, constituidos por un relleno aluvial de material grueso que conforman acuíferos de extensión regional de tipo libre y confinado con agua de buena calidad química, dulce, bicarbonatada, cálcico-magnésica y moderadamente dura (pozos de 1,20 l/s). El valle del río Magdalena y la sabana de Bogotá, están conformados por sedimentos limo-arenosos con permeabilidad baja donde se desarrollan acuíferos locales de extensión variable con agua de buena a regular calidad química (pozos de 5 y 10 l/s). En la región del Magdalena medio, las rocas del Paleógeno - Neógeno de ambiente continental compuestas por conglomerados, areniscas, arcillolitas y tobas con permeabilidad alta a moderada constituyen buenos acuíferos de extensión regional con agua de buena calidad química (pozos de 8 y 10 l/s).

Hacia el núcleo de la Cordillera Oriental se encuentran formaciones cretácicas y del Paleógeno - Neógeno de origen transicional y continental conformadas por rocas cementadas y no cementadas (areniscas, limolitas, calizas y shales) con porosidad primaria y secundaria por fracturamiento, que originan acuíferos con agua de buena calidad química utilizada para consumo humano e irrigación (bicarbonatada sódica y dura, de formaciones cretácicas en la sabana de Bogotá con pozos de 20 y 1.00 l/s y bicarbonatada cálcica y dura de formaciones del Paleógeno - Neógeno con pozos de 5 l/s).

Hacia el norte de la sabana de Bogotá, en los departamentos de Boyacá y Santander, se presentan acuíferos originados en formaciones cretácicas (pozos de 40 l/s). Hacia los bordes del núcleo de la Cordillera Oriental se presentan formaciones calcáreas predominantemente shales negros, calizas y areniscas donde la porosidad secundaria por fracturamiento y disolución han desarrollado acuíferos locales con permeabilidad moderada y regular calidad química de las aguas, generalmente dura.

Hacia el nororiente del país, alrededores de Cúcuta se presentan acuíferos de tipo libre y confinado constituidos por terrazas y aluviones cuaternarios de origen fluviodeltaico (40 a 50 m de espesor) que producen agua bicarbonatada-cálcica, dura (20 l/s).

Sobre el flanco oriental de la Cordillera Central, principalmente en la parte sur y en el valle del río Magdalena, se presentan depósitos piroclásticos de edad cuaternaria con porosidad primaria, que conforman acuíferos locales, en general, de tipo libre con aguas de regular calidad química utilizada primordialmente para irrigación (pozos de 6 l/s)

En la provincia hidrogeológica costera - vertiente atlántica, los sectores permeables se encuentran en sedimentos cuaternarios de origen continental y transicional, y en rocas del Paleógeno - Neógeno de ambiente marino. El valle del río Cesar, el piedemonte suroccidental y nororiental de la Sierra Nevada de Santa Marta están cubiertos por sedimentos de origen continental con permeabilidad alta a moderada donde existen acuíferos continuos de extensión regional, compuestos por rellenos aluviales cuaternarios con espesores entre 40 y 120 m y generan acuíferos, en general, de tipo libre

con agua de buena calidad química (sódica - cálcica, dulce y moderadamente dura) utilizada para el riego y el consumo humano (pozos de 20 y 30 l/s en el valle del río Cesar y de 30 y 50 l/s en el piedemonte de la Sierra Nevada de Santa Marta). El delta del río Magdalena y la parte media y baja de la península de La Guajira están constituidos principalmente por sedimentos arenosos de granulometría media a fina y origen marino a transicional, con permeabilidad moderada a baja, donde se presentan acuíferos de tipo libre y confinado con aguas de regular calidad química, en general, salobre, utilizada para el consumo humano (pozos de 2 y 1 l/s).

Entre los departamentos de Córdoba y Sucre existen formaciones del Paleógeno – Neógeno, arenosas de ambiente continental y transicional, con acuíferos de extensión regional y agua de buena calidad utilizada para el consumo humano (pozos de 10 y 70 l/s).

Hacia la parte media del Departamento del Atlántico, entre el delta del Magdalena, el piedemonte de la Sierra Nevada de Santa Marta y la media y baja Guajira, rocas sedimentarias con permeabilidad moderada a baja y porosidad primaria, correspondientes a formaciones del Paleógeno – Neógeno, de ambiente transicional, han desarrollado acuíferos locales de extensión variable con agua de regular calidad química, utilizada para consumo humano (pozos de 1, 5 y 25 l/s). En la región de la media Guajira, este tipo de roca aparece debajo de los sedimentos cuaternarios y conforma acuíferos confinados con aguas cloruradas sódicas, salobres (pozos de 50 l/s). El agua de los acuíferos existentes entre el delta del Magdalena y la Sierra Nevada de Santa Marta es bicarbonatada cálcica a bicarbonatada sódica y es utilizada para regadío (pozos de 10 y 15 l/s).

En la provincia del Amazonas que cubre la parte suroriental del país desde la frontera con Perú y Ecuador hasta los ríos Guaviare e Inírida, la poca información disponible supone la existencia de acuíferos locales, libres y confinados, desarrollados en rocas sedimentarias de ambiente continental, poco cementadas con porosidad primaria y permeabilidad baja, los cuáles producen agua ferruginosa.

En la provincia del Orinoco que corresponde a los Llanos Orientales, desde los ríos Guaviare e Inírida hasta los límites con Venezuela, se aprovechan acuíferos libres desarrollados en depósitos eólicos (loes).

En la provincia del escudo septentrional por el tipo de litología, se infiere que la acumulación de agua subterránea es mala y por tanto las posibilidades acuíferas son remotas.

Otro tipo de fuentes de agua son las termominerales, las cuales tienen mayor ocurrencia en la región cundiboyacense en el centro del país.

3.4. RELIEVE – TOPOGRAFÍA

Las alturas topográficas en el área son muy variadas y oscilan entre 0 msnm en la vertiente del Atlántico y 2.600 msnm en la sabana de Bogotá.

El sector correspondiente al Valle Alto y Medio del Magdalena presenta, en una amplia zona, relieve ondulado a montañoso, enmarcado por las cordilleras Oriental y Central.

El relieve de la parte baja del río Magdalena se caracteriza por ser de poca altura, suavemente ondulado y constituido por pequeñas serranías cuya altitud no pasa de 200 msnm.

La península de La Guajira es un sistema orográfico aislado (0 a 150 msnm) caracterizado por lomas suaves y dunas cuyos drenajes han desarrollado poco arrastre de material fino debido a los caudales escasos y los recorridos planos y cortos.

En la región de los Llanos Orientales predomina la topografía plana a suavemente ondulada (45 a 300 msnm). Hacia el sector sur se presentan zonas de colinas intensamente disectadas por acción de aguas lluvias y el viento que se conocen como “serranías”.

En el sector de la amazonía (PRORADAM, 1979) se han desarrollado provincias de paisaje de tipo estructural (montañas con predominio de serranías, montes islas -100 a 300 msnm remanentes de erosión, colinas bajas que alcanzan los 900 msnm); provincias de paisaje de tipo denudativo (colinas redondeadas, colinas facetadas, sabanas con valles poco profundos y zonas inundables); sistema de terrazas (parte sur de la amazonía); y sistema de paisajes aluviales (llanuras fluviales de inundación)

El sector de la cuenca de los ríos Cauca y San Jorge, en su mayoría, es plano, con presencia de diferentes niveles de terrazas y planicies de inundación activas y en desarrollo.

En la parte norte se destaca la división de aguas conformada por los valles de los ríos Ranchería al norte y el valle del río Cesar más al sur. El primero converge directamente al mar a la altura de Riohacha y el segundo dirige sus aguas hacia el río Magdalena, al sur.

Las máximas elevaciones llegan a los 300 msnm y comprenden, hacia el suroriente, el pequeño valle de Codazzi situado en el piedemonte de la serranía de Valledupar y hacia el suroccidente el valle del río Ariguaní.

El sector de la Sierra Nevada de Santa Marta, en la parte suroriental de la península de La Guajira, se presenta como un sistema orográfico aislado, con alturas que varían desde el nivel del mar hasta los 5.775 msnm. Se caracteriza por crestas abruptas y desarrollos laterales de ladera de montaña, drenados por corrientes rápidas, con poco arrastre de material fino, debido al cambio brusco en la pendiente que origina recorridos planos relativamente cortos.

3.5. ECOSISTEMAS

El área de estudio comprende las regiones Andina, Caribe del territorio, en donde se concentra el mayor desarrollo industrial y urbano del país, lo que ha originado la transformación de los ecosistemas y la pérdida de la oferta ambiental natural.

La amazonía por otro lado es una región natural de importancia global con amplia variedad de recursos naturales y que ha sido objeto de procesos de colonización que han incentivado la tala y quema de árboles y por tanto han ocasionado la degradación y pérdida de ecosistemas. El descubrimiento de yacimientos petrolíferos (Caño Limán en Arauca, Apiay en Meta, Cusiana y Cupiagua en Casanare) han ocasionado pérdida y alteración de los ecosistemas de ésta región.

La zona de estudio comprende ecosistemas continentales (terrestres y acuáticos), bajo el dominio de los suelos, las tierras y las aguas dulces y que están localizados entre el litoral costero y las nieves perpetuas y comprenden ecosistemas boscosos y no boscosos.

3.5.1. Ecosistemas boscosos

Los ecosistemas boscosos son espacios naturales que presentan elementos arbóreos en un área entre el 30 y 100% de la cobertura vegetal, se caracterizan por poseer varios estratos: plántulas de especies restringidas a la parte inferior del bosque, plantas reptantes y herbáceas, y árboles frondosos de altura considerable. Se encuentran ampliamente distribuidos en el territorio nacional y comprenden bosque basal, bosque andino, bosque ripiario, manglar, especial de pantano y agroecosistemas fragmentados (IDEAM, 1996).

- **Bosque basal:** los bosques basales, están localizados entre los 0 y 1.000 m de altura y se encuentran presentes en la Amazonía (ríos Caquetá, Putumayo, Apaporis, Inírida, Vaupés), en la Orinoquía (ríos Arauca, Guaviare, Meta) región Caribe en las cuencas de la Alta Guajira, bajo Magdalena y en el occidente y norte de la Sierra Nevada de Santa Marta. Estos ecosistemas han sido muy intervenidos y se encuentran en peligro de desaparecer.
- **Bosque andino:** están ubicados por encima de los 1.000 msnm, hasta aproximadamente 4.000 msnm., incluyen el bosque subandino de clima templado y los bosques altoandinos; se encuentran distribuidos a lo largo de las cordilleras, en la Sierra Nevada de Santa Marta en la Serranía de la Macarena. La gran mayoría de estos bosques quedan como áreas relictuales localizadas en el alto y medio Magdalena, medio Cauca y Sabana de Bogotá.
- **Bosques ripiarios (galería o de cañada):** ubicados en las zonas aledañas a los cursos de agua, desempeñan un papel importante en la preservación del recurso hídrico y en la estabilización de los cauces, pueden denominarse como ripiarios representativos a los ecosistemas ubicados en la baja Guajira, río Pure, río Caquetá, cuenca baja del Meta, ríos Amazonas, Guaviare, Putumayo, Inírida, Tomo-Tuparro, Apaporis, Vaupés y Bitá.
- **Manglares:** corresponden tanto a ecosistemas continentales terrestres boscosos como a ecosistemas marinos, se caracterizan por presentar vegetación dominante de plantas arborescentes llamadas “mangle”; se encuentran sometidos a fuertes presiones antrópicas y están localizados en el delta del río Magdalena.
- **Especial de pantano:** se encuentran distribuidos en todo el territorio nacional, en particular en la región Caribe y han estado sometidos a deterioro por la ampliación de la frontera agrícola de los cultivos de banano. Se conocen como “cativales” en Antioquia, “zapales” en el río San Jorge y en la depresión Momposina y “turberas” en la zona andina. También existen pantanos en las cuencas del río Nechí, bajo Cauca y bajo y medio Magdalena y Cesar. En la Amazonía los pantanos están sobre suelos turbosos, anegados, en valles aluviales y terrazas bajas y en el Orinoco están presentes en las riberas inundables de los ríos (morichales)
- **Agroecosistemas fragmentados:** caracterizados por haber sido intervenidos por el hombre en un grado no mayor al 50% y presentar estratos arbóreos y arbustivos. Se encuentran principalmente en áreas con fácil acceso y que están cercanas a centros urbanos en la región Andina y Basal.

3.5.2. Ecosistemas no boscosos

Los ecosistemas no boscosos se caracterizan por un espacio abierto con coberturas vegetales ralas, achaparradas con estratos entre 1 y 3 que no superan los tres metros de altura y con elementos florísticos bastante especiales. Abarcan un amplio espectro climático que va desde muy seco a muy húmedo e incluye vegetación xerofítica, sabanas arboladas, arbustivas y herbáceas, aéreas de páramo y cobertura especial rupícola

- **Xerofitia:** presentes en áreas con déficit significativo de agua durante todo el año y vegetación adaptada a las condiciones de sequía y alta temperatura (cactus y matorrales espinosos); la vegetación de La Guajira es un ejemplo típico de ésta cobertura. También se presenta en los pisos Andino y Basal, parte media de La Guajira, inmediaciones de Cúcuta, cañón del Chicamocha, y en la zona de Villa de Leyva.
- **Sabanas naturales:** se caracterizan por la presencia de gramíneas mezcladas con arbustos, árboles e incluso palmeras que se desarrollan en suelos con bajo contenido de materia orgánica y ricos en óxidos de hierro y aluminio. Aparecen en la Orinoquía, la Amazonía, en el Caribe y en los valles interandinos.
- **Páramo:** caracterizado por formaciones de gramíneas perennes y pequeños grupos de chusque y chites; un paisaje de este ecosistema lo constituyen los pajonales paramunos y frailejones, son ecosistemas productores y almacenadores de agua. Ejemplos de este ecosistema son el páramo de Sumapaz, Cocuy y Sierra Nevada de Santa Marta.
- **Cobertura especial rupícola:** formaciones calcáreas sobre las cuáles se desarrolla una vegetación especializada, de porte achaparrado y compuesta, en general, de laticíferas, se presenta en la Amazonía en sustrato de cuarzo y en el Caribe sobre sustrato calcáreo entre 200 y 800 msnm, también denominada basal caribeño.

3.6. SUELOS

De acuerdo con la geomorfología y el clima en la zona de estudio se han desarrollado diferentes tipos de suelos (IGAC, 1992), entre los que se pueden mencionar los siguientes:

- **Suelos de valles:** se encuentran presentes en regiones con climas cálidos y con condiciones de humedad seca a muy seca y árida.
- **Suelos de clima cálido seco:** se ubican en el norte y centro de los departamentos de Bolívar, Magdalena y Cesar, principalmente. Se presentan en relieve plano, lo que hace posible el que, en épocas de lluvias, sufran inundaciones y encharcamientos que limitan su utilización. Estos suelos se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales actuales, son moderadamente profundos, algunos son superficiales, de reacción moderadamente ácida a neutra y de fertilidad alta a moderada.
- **Suelos de clima cálido húmedo:** se encuentran en la parte central de Bolívar y sur del Magdalena, especialmente. Están presentes en zonas de relieve plano, sufren inundaciones regulares en los períodos lluviosos y se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales

actuales. Estos suelos, por lo general, son superficiales, de drenaje imperfecto a pobre, ligeramente ácidos y de fertilidad moderada.

- **Suelos de planicie en clima cálido húmedo:** formados por acción fluvial y fluvioacustre, en clima cálido húmedo se ubican en la depresión Momposina. Son suelos superficiales, muy poco profundos, limitados por el nivel freático fluctuante, fuertemente ácidos a neutros, con alta saturación de bases y baja fertilidad (Sur del Cesar).
- **Suelos de planicie en clima cálido seco a muy seco:** originados por acción fluvial y fluvioacustre en clima cálido seco a muy seco, presentan dos niveles: el nivel bajo, que sufre inundaciones prolongadas, con suelos muy superficiales a moderadamente profundos, moderadamente ácidos y de saturación de bases y fertilidad moderados, están ubicados en las vegas y terrazas bajas de los afluentes del río Magdalena; el nivel alto constituido por terrazas, tiene suelos bien drenados, no inundables, moderadamente ácidos a moderadamente alcalinos, se presentan al sur del Atlántico y en la zona bananera entre la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta y la margen oriental del río Magdalena. Los suelos de la alta Guajira son pobres en bases, mientras que en la baja Guajira se han desarrollado en planicies marinas directamente afectados por salinidad.
- **Suelos de altillanura:** En clima seco con vegetación de sabana, a partir de sedimentos finos en relieve plano a ligeramente ondulado se han desarrollado suelos evolucionados y desaturados (ríos Meta y Vichada), en relieve cóncavo (bajos) se han desarrollado suelos pobremente drenados y en relieve fuertemente ondulado a quebrado (serranías) se han desarrollado suelos evolucionados, desaturados con afloramientos de corazas constituyendo los paleosuelos lateríticos (ríos Vichada, Meta y Guaviare). En clima húmedo y muy húmedo con vegetación de hilea se han desarrollado suelos se han desarrollado suelos ácidos
- **Suelos en planicie de inundación:** En la mayoría de las cuencas de drenaje del oriente colombiano, a partir de depósitos aluviales retrabajados, se han desarrollado suelos con texturas franco arenosas gruesas, con alto grado de acidez, contenidos bajos de calcio, magnesio y fósforo y con alto contenido de aluminio. En las cuencas de los ríos Inírida y Guainía, a partir de la cubierta del escudo Guayanés, se han desarrollado suelos locales con predominio de minerales resistentes y secundarios.

3.7. GEOLOGÍA

Colombia presenta cuatro sistemas morfotectónicos con características geológico-mineras particulares: Sistema Andino (cordilleras Occidental, Central y Oriental; serranía de San Lucas); Región Caribe (Sierra Nevada de Santa Marta; península de La Guajira); Llanos Orientales - Escudo Guayanés; y Costa Pacífica (Serranía de Baudó) que no está incluido en la zona estudiada, (INGEOMINAS, MINERCOL, UPME, 2000). El área estudiada incluye las zonas hidrográficas del Magdalena-Cauca, Caribe, Orinoquía y Amazonía que comprenden el sistema Andino con excepción de la cordillera Occidental, la región Caribe y parte de los Llanos Orientales - escudo Guayanés.

La compilación de la geología de la zona de estudio se efectuó con base en la información disponible en mapas geológicos departamentales (INGEOMINAS, 1972, 1981, 1983, 1988, 1996,

1997 a, 1997 b, 1997 c, 1997 d, 1997 e, 1998 a, 1999) y en el mapa geológico de Colombia, escala 1:500.000 (INGEOMINAS, 1988, 1997 a; Rodríguez & Ulloa, 1994; Schamel, 1991). La descripción de la geología general, junto con detalles de la geología de cada cuenca muestreada ha sido presentada en los respectivos informes de muestreo (INGEOMINAS, 2004; Prieto, Miranda, Rosales, 2002), razón por la cuál no se detallan en el presente informe.

Los rasgos geológicos generales por sistemas o regiones que están presentes en la zona de estudio (**Figura 5**) se resumen así:

3.7.1. Sistema Andino

Comprende las cadenas montañosas identificadas como cordillera Occidental (tipo oceánico) que no está comprendida en la zona de estudio, las cordilleras Central y Oriental (afinidad continental) y la Serranía de San Lucas.

3.7.1.1. Cordillera Central

Presenta un basamento metamórfico intruido por grandes batolitos mesozoicos con coberteras sedimentarias del Paleozoico al Neógeno relativamente escasas que se localizan especialmente hacia su borde oriental, aunque algunas alcanzan el valle del Magdalena. Los cuerpos intrusivos cuyas edades van del Jurásico al Neógeno se emplazaron posteriormente en las secuencias sedimentarias y metamórficas del Paleozoico (INGEOMINAS, 1997a).

El núcleo de la cordillera está constituido por neises, anfibolitas, metasedimentitas y metavulcanitas de un complejo polimetamórfico que incluye eventos metamórficos de edad precámbrica, paleozoica y mesozoica, intruido por batolitos y plutones mesozoicos. En el borde occidental afloran rocas básicas y ultrabásicas; secuencias cretácicas de toleitas con intercalaciones sedimentarias, que tienen relación genética y estructural con las rocas de la Cordillera Occidental; y rocas metamórficas de presión media a alta consideradas de la misma edad.

3.7.1.2. Valles de los ríos Magdalena, Cauca-Patía.

Presentan dirección noreste a norte y representan depresiones morfotectónicas rellenas con sedimentos del Meso – Cenozoico cuyo drenaje en su mayor parte confluye hacia el Mar Caribe.

- **El Valle Superior del Magdalena** es una depresión alargada de dirección NNE – SSW que separa la mitad meridional de las cordilleras Central y Oriental y se extiende desde Pitalito en el sur hasta Honda en el norte por una distancia aproximada de 400km y un área de unos 20000km². En Honda el fondo del valle se encuentra a unos 140msnm, en Neiva a 500msnm y a unos 1200msnm en Pitalito.

El Valle Medio del Magdalena se localiza entre las cordilleras Central y Oriental, está limitado al norte por la Falla de Bucaramanga en cercanías de la población de El Banco y al sur por la Falla de Cambao en las inmediaciones de Jerusalén y cubre un áreas de 28300km².

- **En el Valle Inferior del Magdalena**, el registro sedimentario comienza en el Cretácico superior y se extiende hasta el Cuaternario. Se trata de una cuenca de tipo borde continental con dos tipos de subcuencas: la de Plato - San Jorge y la del Sinú que se extiende costa afuera (INGEOMINAS, 1997a).



Figura 5. Vista general de la geología de Colombia

- **Valle del Cauca – Patía**, en éste valle afloran rocas sedimentarias del Terciario que indican dos ambientes deposicionales diferentes: al norte, zona de Antioquia y Caldas, es continental, mientras que al sur es marino salobre a transicional.

3.7.1.3. Cordillera Oriental

Presenta un basamento Proterozoico y se encuentra cubierto por una espesa secuencia sedimentaria del Cretácico y del Paleógeno - Neógeno. Rocas ígneas y sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico y rocas sedimentarias del Paleógeno - Neógeno definen en gran parte las características geográficas actuales. En esta cordillera se localizan algunos macizos antiguos: al sur los de Garzón y Quetame, al norte de este último ocurre una bifurcación que da lugar a la Sabana de Bogotá que limita al norte con el Macizo de Santander y al este con el Macizo de Floresta (INGEOMINAS, 1997a). Eventos geológicos tectónicos se manifiestan en la bifurcación de la cordillera en el nudo de Santurbán, en la serranía de Perijá y en la Cordillera de Mérida en Los Andes venezolanos.

- **En la zona del Catatumbo**, sector oriental del Departamento de Norte de Santander, afloran unidades localizadas al oriente de la Falla de Bucaramanga que comprenden un basamento ígneo – metamórfico del Proterozoico y del Triásico – Jurásico y una cobertera sedimentaria del Paleozoico al Neógeno. La nomenclatura estratigráfica para las rocas sedimentarias de esta zona corresponde a la de la cuenca de Maracaibo y a la de la Concesión Barco (Vargas et al 1976).
- **El área del Macizo de Santander** se encuentra conformada por las formaciones Neis de Bucaramanga, Ortoneis y Silgará (Ward et al 1973). Neis de Bucaramanga consta de paraneises pelíticos, semipelíticos y arenáceos, esquistos y cantidades menores de neises calcáreos, hornbléndicos y anfíbolitas. Incluye también zonas de migmatita, ortoneis y granulita locales y su edad es Proterozoica (WARD et al 1973).
- **La Serranía del Perijá**, comprende una zona montañosa hacia el sector oriental que desciende hasta formar los valles de los ríos Ranchería, Badillo, Cesar y Magdalena. En ésta zona se presentan rocas sedimentarias y metamórficas de bajo grado del Paleozoico; capas rojas asociadas a rocas volcánicas y capas sedimentarias tipo areniscas con intercalaciones de rocas volcánicas del Jurásico, sedimentos epicontinentales del Cretácico y depósitos fluviales del Cuaternario constituyendo depósitos de canal, terrazas y abanicos.

3.7.2. Región Caribe.

Región ubicada al norte de Colombia, bordeando el mar Caribe, desde el golfo de Urabá hasta la península de la Guajira, cuya complejidad geológica y rasgos geomorfológicos son el resultado de su ubicación durante el Mesozoico-Terciario, en la intersección de fallas, con la esquina noroeste de Suramérica.. En ésta región se ubica la Sierra Nevada de Santa Marta, la Península de la Guajira y amplias llanuras costeras.

3.7.2.1. Península de la Guajira.

Constituye la estribación más septentrional del continente suramericano en donde afloran rocas ígneo - metamórficas del Proterozoico recubiertas por rocas sedimentarias del Meso y Cenozoico.

Morfológicamente puede dividirse en la Baja Guajira y la Alta Guajira. En la Baja Guajira, limitada al sur por el sistema de Fallas de Oca, se tienen planicies bajas y monótonas segmentadas hacia el sur y sureste por la Serranía de Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta. Varias zonas escarpadas a montañosas (serranías), separadas por tierras bajas distinguen la Alta Guajira, limitada al sur por la Falla de Cuiza, en la cual se diferencian cinco macizos montañosos los cuales corresponden a la Serranía de Macuira, la Serranía de Jarara, Serranía de Carpintero, Serranía de Cocinas y Serranía de Cojoro.

3.7.2.2. Macizo de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Es un mosaico estructural de forma triangular constituido por varias provincias tectónicas: la de la Sierra Nevada, la de Sevilla y la de Santa Marta con un basamento metamórfico de diferentes edades intruido por rocas ígneas graníticas mesozoicas mientras que las rocas volcánicas y sedimentarias están principalmente hacia el sureste sobre la antigua zona cratónica y se prolongan hacia la serranía de Perijá en la Cordillera Oriental (Tschanz & Marvin, 1974)

- **La Provincia de la Sierra Nevada**, tiene un basamento de granulitas, limitadas por fallas transcurrentes que las separan de rocas metamórficas
- **La Provincia de Sevilla** consiste en un basamento simático, de posible corteza oceánica, constituido por anfíbolitas, esquistos y neises no diferenciados.
- **La Provincia de Santa Marta** esta constituida por el Batolito del mismo nombre y por rocas metamórficas, esquistos de diferentes facies.
- **El valle del Cesar – Ranchería**, separa la Sierra Nevada de Santa Marta de la Serranía de Perijá y corresponde a un relleno Meso – Cenozoico. Rocas sedimentarias de composición variada (Triásico a terciario), cubiertas ampliamente por sedimentos terciarios.

3.7.2.3. Llanuras del Caribe.

Están limitadas al oriente por la Sierra de Santa Marta y al sur por las estribaciones septentrionales de las cordilleras Central y Occidental de los Andes. La región estable, la cuál coincide con el Valle Inferior del Magdalena (cobertera sedimentaria sobre basamento ígneo- metamórfico de afinidad siálica), está limitada al occidente por los anticlinorios de San Jerónimo, San Jacinto y Luruaco. La zona de plataforma comprende cinco elementos tectónicos entre los cuales están el alto de Cicuco, alto de El Difícil, geofractura de Plato y la depresión tectónica de Sucre. La región inestable o región de geosinclinal con grandes espesores de sedimentos comprende la porción costera occidental adyacente a la plataforma; el cinturón de San Jacinto y el cinturón de Sinú.

3.7.3. Llanos Orientales - Escudo Guayanés

La región Oriental de Colombia constituye la parte mas occidental de la corteza siálica estable del continente suramericano, con su límite occidental representado en las paleosuturas de cabalgamiento asociadas a la Cordillera Oriental, denominadas fallas del Borde Llanero al sur y falla de Guaicáramo al norte y a su vez son el límite oriental del cinturón móvil de afinidad siálica miogeosinclinal (Ulloa & Rodríguez, 1979 a, 1979 b, 1981; Bruneton et al, 1983; PRORADAM, 1979; Galvis et al, 1979, entre otros).

- **En los Llanos Orientales** se presentan alturas menores a 250msnm que constituyen las cuencas hidrográficas de los ríos Orinoco y Amazonas las cuales en conjunto hacen parte del Escudo de Guayanas. En este sector se presenta una cobertera sedimentaria que aumenta en espesor hacia el occidente, constituida por unidades del Paleozoico, Cretácico y Terciario. Hacia los límites con Venezuela y Brasil aflora basamento Proterozoico de rocas ígneas y metamórficas en el que se han reconocido eventos orogénicos y tectotermiales denominados Guriense (3400 - 3700Ma), Imataca (2600 - 2700Ma), Transamazónico (2200 - 1800Ma), Nickeriense (1200Ma) y Brasileño (900 - 600Ma).
- **En el Piedemonte Llanero**, en la región noroccidental del departamento de Arauca, se localizan depósitos fluviales Cuaternarios provenientes de la cordillera Oriental.
- **En la Orinoquía – Amazonía**, zona oriental de Colombia, se presenta continuidad de las rocas precámbricas del escudo Guayanés. El escudo está constituido por rocas ígneas y metamórficas del Proterozoico, representadas por granitos, migmatitas, neises félsicos y máficos que infrayacen secuencias meta sedimentarias y metavolcánicas que han sido cortadas por diques ácidos y básicos que reflejan un magmatismo mas reciente.

El Vichada, localizado en el extremo oriental de Colombia, forma parte de los Llanos Orientales. La litología incluye rocas sedimentarias y graníticas a metamórficas de edad Proterozoico, sobre las cuales se desarrolló una cubierta sedimentaria (GALVIS et al, 1979).

3.8. TECTÓNICA

La descripción de los rasgos tectónicos mas importantes se resumen a continuación, y los detalles de cada sub-región de la zona estudiada ha sido presentada en los respectivos informes de muestreo (INGEOMINAS, 2004), razón por la cuál no se detallan en el presente informe.

3.8.1. Cordillera Central

La Cordillera Central presenta una orientación NNE – SSW y está limitada al oeste por el Valle del Río Cauca y al este por el Valle del Río Magdalena. Su flanco este se encuentra limitado de norte a sur por las fallas de La Salina, Palestina, Otú – Pericos, Calarma y Chusma, las cuales en conjunto hacen parte de un sistema compresivo; y su flanco occidental se encuentra limitado por el sistema de fallas de Silvia – Pijao las cuales conforman un sistema compresivo. De esta forma ambos flancos se encuentran limitados por fallas de cabalgamiento definiendo una estructura de tipo emergente.

3.8.2. Valle Inferior del Magdalena

El Valle Inferior del Magdalena limita al oeste con el lineamiento del Sinú y al este con la Sierra Nevada de Santa Marta. Consta de cuatro elementos morfológicos denominados cinturón de San Jacinto, Alto de Cicuco, Alto de El Dificil, zona de fractura de Plato y la depresión tectónica de Sucre (Duque, 1979).

El cinturón de San Jacinto está conformado por una serie de estructuras de dirección N – S a NNE – SSW. Se diferencian tres segmentos limitados por lineamientos regionales orientados W-NW (de

sur anorte): Anticlinal de San Jerónimo, Anticlinal de San Jacinto y Anticlinal de Turbaco. Estos anticlinales presentan orientación N – S además de pliegues y fallas de cabalgamiento con vergencia hacia el oeste.

Los altos de Cicuco y El Difícil son altos de plataforma bajo el subsuelo y coinciden con las áreas de la cuenca de San Jorge y El Difícil. Están bordeados en sus flancos por una pendiente pronunciada. La zona de fractura de Plato se extiende hacia el norte de Cicuco entre el Brazo de Mompós y el alto de El Difícil, corresponde a una depresión profunda dentro de la plataforma continental rellena de sedimentos hasta de 7km de espesor a lo largo de la zona axial. La depresión tectónica de Sucre localizada al sur del Brazo de Loba corresponde a una depresión tectónica fallada en bloques y controlada por las fallas de Loba y Sucre.

3.8.3. Valle Superior del Magdalena

El Valle Superior del Magdalena es una depresión alargada de dirección NNE – SSW que separa la mitad meridional de las cordilleras Central y Oriental y se extiende desde Pitalito el sur hasta Honda en el norte. Las estructuras presentan orientación NE – SW y en su sector este presenta un sistema de fallas de cabalgamiento imbricadas en abanico, las cuales preceden al sistema de Garzón - Suaza. El segmento norte de este flanco se extiende hasta el sistema de fallas de Girardot y se caracteriza por presentar fallas inversas con buzamiento moderadamente alto y fallas ciegas, expresadas en superficie por pliegues apretados, con cabeceo en ambas direcciones.

3.8.4. Valle Medio del Magdalena

El Valle Medio del Magdalena constituye una depresión tectónica asimétrica con dos márgenes diferentes que separa las Cordilleras Central y Oriental. Al oeste se tiene un borde pasivo instalado en parte sobre material de la Cordillera Central, caracterizado por una geometría homoclinal con notables truncaciones de las formaciones cretácicas que desaparecen en dirección a la cordillera bajo un progresivo recubrimiento de los sedimentos terciarios que buzaban preferentemente hacia el este pero con algunas interrupciones causadas por flexuras y fallas. En contraste hacia la Cordillera Oriental la deformación se incrementa de manera continua y se pasa a un complicado margen compresional.

En este sector las estructuras principales son (de oeste a este): la Falla de la Salina la cual es una falla inversa con buzamiento hacia el este y dirección NE – SW y las fallas del Suárez, de Boyacá y de Soapaga, las cuales buzaban hacia el oeste y presentan dirección NE – SW. Estas fallas originalmente actuaron como fallas normales durante el proceso de sedimentación de las unidades del Cretáceo y posteriormente fueron invertidas durante la orogenia andina. De oeste a este los pliegues más importantes del área corresponden al Sinclinal de Chiquinquirá, el Anticlinal de Oiba, el Anticlinal de Arcabuco y el Sinclinal de Tunja, todos con dirección NE – SW. Al oeste de la Falla de La Salina se desarrolla un conjunto de estructuras con orientación que varía de N – S hasta NE – SW. Desde el este hacia el oeste se suceden los sinclinales de San Luis, Colorado, La Cira Infantas y Casabe – Galán, estos anticlinales están ligados a fallas inversas que se orientan paralelamente a ellos aunque sin coincidir con su cresta.

3.8.5. Cordillera Oriental

El costado occidental de la Cordillera Oriental presenta fallas regionales de cabalgamiento con vergencia hacia el occidente (La Salina, Alto del Trigo, Cambrás y Honda), las cuáles terminan al

norte cerca a la Falla de Bucaramanga: Fallas inversas asociadas a pliegues anticlinales, a veces invertidos y amplios sinclinales, dominan el esquema estructural del sector axial de la cordillera. En el sector este de la Cordillera oriental se presentan como estructuras principales las fallas de Guaicaramo y de Borde Llanero, las cuales son de tipo inverso pero que originalmente eran de tipo distensivo. Las fallas del sector este buzaban hacia el oeste y las fallas del oeste buzaban hacia el este, definiendo una estructura de tipo emergente para toda la cordillera en la que los sistemas principales de fracturamiento buzaban de forma opuesta.

3.8.6. La Guajira

La Guajira es una zona compleja tectónicamente y hace parte del límite de placas y corresponde a la Placa Caribe. Etayo et al (1983) dividieron La Guajira en dos terrenos: la Alta y la Baja Guajira. En la Alta Guajira predominan los plegamientos de tipo isoclinal mientras que en el sector sur se presentan plegamientos con dirección E – NE y dos fases de fallamiento, uno de dirección E-NE y otro de dirección NW. La Baja Guajira corresponde a una cuenca de sedimentos marinos y continentales del Eoceno - Plioceno de aproximadamente 4.000 m de espesor limitada al sur por la Falla de Oca.

Las principales fallas de la zona son La Falla de Cuiza y la de Falla de Cocinas las cuales prestan dirección E – W a ESE. Asociadas a estas dos fallas principales se tienen las fallas de Kasipoch, Santa Ana y Puralapo las cuales presentan dirección NE y terminan hacia el norte contra la Falla de Cuiza. Las fallas de Muleru y Atrieru con dirección NW terminan hacia el norte sobre la Falla de Cocinas; la Falla de Simarua y la Falla de Ororio presentan dirección NE; y la Falla de Narap, la Falla de Macuira y la Falla de Nazareth presentan dirección NW.

3.8.7. Sierra Nevada de Santa Marta

La Sierra Nevada de Santa Marta es un bloque triangular, limitado al norte por la Falla de Oca con dirección E-W, correspondiente a un sistema transcurrente con movimiento dextrógiro, y al occidente por la Falla de Bucaramanga - Santa Marta de orientación E - W y N - W, con movimiento sinistral de aproximadamente 100 km y vertical superior a los 12.000 m.

3.8.8. Llanos Orientales

La zona oriental de Colombia (Orinoquía y Amazonía) se presenta como una zona notablemente estable, en donde las rocas sedimentarias de posible edad precámbrica se presentan horizontales y los granitos presentan diaclasamiento mínimo.

Entre los rasgos tectónicos más notables en la Orinoquía, se presentan fallas con rumbo NNE-SSW que encauzan algunos ríos y aparentemente contribuyeron al levantamiento del bloque oriental con respecto al occidental. Hacia la Amazonía y relacionadas con eventos precámbricos se reportan la falla de Naquén, estructura de dirección SWW-NEE, y la falla del río Aque, estructura de dirección SEE-NWW, las cuales determinan una dovela que conforma la Serranía de Naquén (Galvis et al, 1979). Hacia el bajo Guainía, cabe mencionar la falla de Puerto Colombia que hace parte de otro sistema de fallas poco frecuente, con dirección N70W a N80W, que afecta las rocas del cratón.

Un sistema de fallas que han sufrido reactivación en el Fanerozoico está conformado por las fallas de Mitú y del Cuairí, con dirección N40E a N50E, y las fallas de caño Chaquita y caño Garza, al este del departamento de Guainía, de dirección N50E a N60E, las cuales afectan rocas del complejo

migmatítico de Mitú. Se han referenciado otros lineamientos tales como el del Carurú y el lineamiento del Guainía Central (Galvis et al., 1979).

3.9. GEOMORFOLOGÍA

El territorio colombiano se considera de formación reciente y en proceso de respuesta a los eventos estructurales y a las modificaciones bioclimáticas generadas y aún en proceso de desarrollo; hecho que define condiciones geomorfológicas de inestabilidad real y potencial, de los diferentes espacios físicos del territorio (IDEAM, 1998 b) (**Figura 6**). Para Colombia se han definido ocho grandes unidades o macrounidades morfogénicas, cada una con características y procesos diferentes: montaña alta, montaña media, montaña baja, depresiones tectónicas intramontanas, litorales, dominio amazónico, dominio orinoqués y sistemas insulares. Las siete primeras unidades tienen expresión en diferentes áreas de la zona de estudio, mientras que los sistemas insulares no fueron incluidos en ésta fase del estudio (IDEAM, 1998b).

A continuación se describen los rasgos geomorfológicos generales correspondientes a cada una de las unidades morfogénicas que se presentan en la región estudiada, y mas adelante se presentan características particulares de las cuencas más importantes. Los detalles de cada sub-región de la zona estudiada ha sido presentada en los respectivos informes de muestreo (INGEOMINAS, 2004), razón por la cuál no se detallan en el presente informe.

3.9.1. Montaña Alta

Corresponde a las culminaciones del sistema cordillerano andino, con mayor energía disponible e inestabilidad real y potencial para transferir materiales hacia las áreas bajas, medias y periféricas. Esta unidad se presenta a lo largo del sistema Andino, con sus sistemas morfogénicos glaciar, periglaciar, modelado glaciar heredado y montaña alto-andina inestable.

3.9.2. Montaña Media

Incluye los espacios ubicados debajo de los 2.700 ± 100 msnm, pisos Andino y Subandino, e integra desde los macizos antiguos (Garzón, Floresta y Santander en la Cordillera Oriental) hasta las coberturas volcánicas y sedimentarias, y complejos metasedimentarios – volcánicos.

Incluye los altiplanos (Cundiboyacense) y sus bordes, las divisorias de cordilleras, las vertientes medias controladas por plegamientos y fallas menores, vertientes medias degradadas en posición de abrigo, superficies de aplanamiento residuales con y sin cobertura volcánica, vertientes cortas de la cordillera Occidental hacia el río Cauca, vertientes húmedas con alteritas profundas, los escarpes tectónicos en retroceso, las divisoras de aguas entre cuencas hidrográficas mayores, los cañones y los valles aluviales controlados y no controlados tectónicamente.

Por criterios de orden geomorfológico, la montaña media presenta desarrollo de lateritas debido a las condiciones bioclimáticas favorables para la alteración del substrato, depósitos fluvioglaciares, desarrollo de cañones y disección y aporte de sedimentos hacia los piedemontes y llanuras.

3.9.3. Montaña Baja

Es el conjunto formado por las estribaciones de las tres cordilleras, los escarpes de retroceso con pendiente cóncava y el macizo residual de La Guajira. La ubicación de las estribaciones de las



Figura 6. Rasgos Geomorfológicos de Colombia

cordilleras en las partes bajas de las montañas, las hace coincidir con climas cálidos, hecho que implica un potencial alto de alteración físicoquímica del substrato, aunque la fuerte pendiente propicia remoción rápida generando vertientes de retroceso con pendiente cóncava.

3.9.4. Depresiones Tectónicas Intramontanas

Corresponden a una macroforma estructural resultante del levantamiento diferencial del sistema cordillerano andino (relieves tabulares plegados con alteritas profundas, y disectados en vías de desertificación). Poco antes del levantamiento mayor, en el sistema andino emergían parcialmente las cordilleras y algunas serranías, mientras que mares interiores (mediterráneos), ciénagas y pantanos ocupaban las depresiones que hoy se conocen como Magdalena - Cesar y la llanura de la Costa.

Las depresiones intramontanas bordean paralelamente al sistema montañosos andino y corresponden a áreas sedimentarias donde se acumula gran parte de los materiales traídos por los ríos desde los relieves altos. La sedimentación ha sido un proceso continuo, pero con intensidades diferentes desde la conformación del sistema andino en el que se identifica a nivel macro, un sistema de transferencia compuesto por las cordilleras que aportan los sedimentos, la red de drenaje (generalmente encañonada) que los transfiere y las áreas bajas donde se depositan (áreas de agradación). En la zona se destacan las áreas de terrazas, conformadas por aporte de material detrítico correspondiente a los sectores intermedios de los ríos Cauca, Nechí y San Jorge.

3.9.5. Litorales

Espacio particularmente dinámico, de respuesta a los cambios globales, locales y regionales en donde interactúan procesos de la dinámica marina y continental. Los litorales de la región Caribe y la llanura fluvio-marina de la Guajira con sus pedimentos y cobertura eólica, se constituyen en espacios de alta sensibilidad por las orogenias del sistema andino, efectos geotectónicos (levantamientos, subsidencia, sismicidad), cambios climáticos, influencia antrópica tanto en el continente como en el litoral mismo y la dinámica propia del litoral bajo las acciones marino continentales. Los grandes sistemas morfológicos que se encuentran en los litorales corresponden a los acantilados, las terrazas fluvio-marinas, las rías, los estuarios y los depósitos litorales recientes, los deltas y el litoral con modelado eólico (IDEAM, 1998 b).

3.9.6. Dominio Amazónico

Como su nombre lo indica se presenta en la zona amazónica colombiana y en él tienen expresión afloramientos rocosos del escudo Guayanés bajo procesos de degradación; pedimentos tallados en el escudo, cubiertos y en vías de disección; mesetas levantadas con modelamiento eólico residual; modelado de disección moderada a profunda en la plataforma del Terciario Inferior y modelado de disección incipiente en la plataforma del Terciario Superior, (IDEAM, 1998 b).

3.9.7. Dominio Orinoqués

Tienen expresión peñoles del escudo Guayanés con procesos de degradación; pedimentos tallados en el escudo Guayanés muy degradados; altillanura plana y ondulada; llanura eólica heredada y llanura de desborde heredada, (IDEAM, 1998 b).

3.9.8. Características geomorfológicas de cuencas

Como ilustración de las condiciones morfológicas existentes en la zona estudiada se presenta los rasgos fundamentales de las cuencas del río Magdalena; Cauca bajo- Henchí; Ranchería y Cesar.

3.9.8.1. Sectores del río Magdalena

La mayor densidad de muestreo se localizó en la cuenca del río Magdalena. Con el objeto de ilustrar las condiciones morfológicas imperantes en los diferentes sectores en que se divide el río, se describen a continuación sus características más sobresalientes.

- Sector Alto Magdalena

En la región del Alto Magdalena (entre Girardot y Honda) se observan sectores de baja altitud, en donde el río Magdalena desarrolla una pendiente moderada, en estado de maduración sobre un substrato rocoso, con excavación de cauces profundos por sus ríos afluentes y con escaso desarrollo de llanuras aluviales amplias. Entre Girardot y Guataquí, el río presenta un curso recto con desarrollo de un valle relativamente estrecho en el que el río se desarrolla hacia el extremo oriental del valle. Las condiciones anteriores impiden la navegación

A partir de Guataquí, el río empieza a presentar un curso más sinuoso como consecuencia de una extensa llanura y vastos depósitos localizados en su margen izquierda y que conforman los abanicos aluviales de Venadillo, Lérída y Mariquita. El río ha adaptado su curso a las formas bajas de estos depósitos con el fin de alcanzar su nivel de equilibrio y distribuir los depósitos acumulados en espesores gruesos. Además, el substrato rocoso aflorante origina saltos que se incrementan en las proximidades de Honda y que han establecido el límite del sector navegable del río, aguas arriba de Honda.

- Sector Medio Magdalena

A partir de Honda y hasta Puerto Berrío (Magdalena Medio), el río adquiere un perfil más suave y regular, al excavar un valle amplio flanqueado por las vertientes de las cordilleras Oriental y Central, que ha permitido a sus afluentes el desarrollo de llanuras aluviales amplias (3 a 5 km de extensión), propicias para el desarrollo de sedimentos de planicie de inundación. Estas llanuras, en los sectores próximos a las desembocaduras de los afluentes al Magdalena, están sujetas a la acumulación de sedimentos por inundación y desborde del río Magdalena en temporadas de invierno.

Los valles aluviales correspondientes a los ríos de la margen derecha del río Magdalena son amplios y extensos, condición que se ve favorecida por la baja competencia que ofrecen las rocas sedimentarias de edad Cretácica y Paleógena – Neógena, mientras que los valles aluviales correspondientes a la margen izquierda del río son a menudo menos desarrollados, con pendientes más elevadas debido a que drenan sectores conformados por rocas más competentes de los complejos metamórficos, ígneos y volcánicos de la Cordillera Central.

- Sector Bajo Magdalena

Diferentes estudios (HIMAT, 1977; Martínez, 1981; Khobzi, 1985; Roberston, 1985; Caballero et al., 1988), describen la evolución dinámica reciente del río Magdalena desde Barrancabermeja hasta Barranquilla, además de la región Bajo Cauca – Nechí, y profundizan en los patrones morfológicos de los paleocauces de los ríos, como punto de partida para la comprensión, la deposición y la formación de depósitos de sedimentos en las llanuras de inundación.

La morfología del Valle Inferior del Magdalena y Bajo Cauca está relacionada con una evolución geológica y geomorfológica desde el Paleógeno - Neógeno y principalmente en el Cuaternario - Reciente. A finales del Paleógeno - Neógeno se produjo el plegamiento inicial de la pre-Cordillera Oriental seguido por un levantamiento y una intensa actividad volcánica en la Cordillera Central - serranía de San Lucas. Esto generó el aporte masivo de sedimentos gruesos a finos provenientes de estas cordilleras, al igual que los depósitos fluvio volcánicos que constituyen el relleno aluvial del presente valle (Van der Hammen et al., 1973).

Posteriormente, estos depósitos de relleno han sido erosionados y conservan formas de terrazas cubiertas por sedimentos recientes y material fino presente a lo largo de la planicie. Varios trabajos (HIMAT, 1977) indican que en épocas recientes se ha presentado una sedimentación activa en la región del Bajo Cauca y Magdalena Medio y Bajo, planicie que corresponde a una depresión tectónica reciente (Irving, 1971).

El río Magdalena, a lo largo de su curso, en particular en el tramo entre Barrancabermeja y Bocas de Ceniza, une varias depresiones de origen tectónico que han sido cubiertas con material aluvial, separadas por colinas de poca elevación. Los valles que convergen hacia la llanura del río Magdalena se encuentran obturados por los sedimentos que componen esta planicie y causan el bloqueo de las aguas, lo que origina ciénagas extensas en las zonas inmediatas de contacto.

Como tendencia generalizada, este tramo se caracteriza por la acumulación de sedimentos, la cuál es más rápida en el área de influencia del río principal con sus afluentes, como el río Sogamoso, el río Lebrija, el río Cauca y el río Nechí, comparativamente con las cuencas aledañas más pequeñas.

3.9.8.2. Sectores del río Cauca Bajo y río Nechí

Por considerarlo de importancia como afluente principal del río Magdalena se presenta los principales sectores correspondientes al río Cauca y Nechí.

- Sector planicie río Cauca, río Magdalena

La unidad geomorfológica dominante de la planicie inundable del río Cauca presenta una forma triangular, de cono, con tres pendientes principales SW - NE y SE - NW, seguidas por los principales cursos de los afluentes. Estas pendientes y la dirección del drenaje se relacionan con un relieve plano convexo con una altitud diferencial de 14 m entre las localidades de Nechí y Pinillos. Los bordes del cono constituyen la zona menos inclinada y termina contra la depresión cenagosa entre el río Magdalena y el río San Jorge y permite que los desbordamientos de estos ríos, más el bloque natural de los tributarios, provoquen remansos de agua que han labrado depresiones inundables entre sí. Esto permite la formación de un paisaje de llanura diferencial con zonas menos inundables que otras.

El río Cauca, en el área de cono, se desborda por rompederos naturales y el agua transita por lechos de desbordamientos que llegan a comunicarse con el río Magdalena y la parte baja del río San

Jorge. Debido a la convexidad de su perfil transversal, el cono de la región del bajo Cauca sólo es fuertemente inundado en sus márgenes, lo que facilita el control de los desbordamientos, de tal manera que con diques cortos y poco elevados se pueden proteger extensas áreas que hoy son útiles para la agricultura y ganadería. Por lo tanto, las zonas de inundación de los ríos Nechí, San Jorge y Cauca son causadas por rompederos en algunos tramos de éstos.

La zona inundable por el río Cauca y el río Magdalena está constituida por materiales fluvio lacustres, no consolidados, en las que se alternan limos, arcillas, arenas y, localmente, gravas, material acumulado durante los últimos 11.000 años, capas que van desde pocos metros hasta 40 m de espesor. Dicha zona inundable ha sufrido fenómenos de subsidencia, en el tiempo, y es correlativa con el último mayor levantamiento de las márgenes, que se inició entre el Plioceno y el Pleistoceno, 2,3 millones de años (Martínez, 1981). El hundimiento, más la compactación, son considerados equivalentes con la tasa de acumulación de sedimentos en esta zona.

La subsidencia en esta área se manifiesta como un fenómeno extremadamente rápido, afecta diferencialmente la zona y presenta sistemas de acumulación fluvial o fluvio lacustre típicos, los cuales originaron unidades geomorfológicas acordes con los sistemas de acumulación, inducidos por la combinación de la dinámica de subsidencia con las dinámicas fluviales y fluvio lacustres.

- Sector depresión cenagosa entre el río Magdalena, el río Cauca y el río San Jorge

El sector depresión cenagosa es una unidad drenada por los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge, de forma cóncava, de varios metros de profundidad y con una distribución longitudinal que se constituye en un gran reservorio de agua y en una trampa de buena cantidad de sedimentos, propios de la planicie inundable. Corresponde a la zona de mayor presencia de ciénagas, 80% del área.

El origen de esta depresión está relacionada con el cambio de curso NW del río Magdalena y con la erosión que ocasionaron las aguas, antes de que el lecho del brazo de Loba - Quitasol estuviera completamente formado, de tal manera que las aguas que circulaban por la superficie facilitaron la erosión en el transcurso de la formación del cauce. A partir de ese evento, el área se convirtió en una zona de acumulación de materiales de desborde.

3.9.8.3. Sectores del río Ranchería y río Cesar

Al parecer, la zona hundida en la que se desarrolla la depresión inundable indica la existencia de un bloque central en forma de graben, mientras que los bloques laterales son basculados hacia el SW y el NE. Estas acciones explican dos fenómenos: subsidencia (hundimiento) que afecta la zona, inclusive en la actualidad, y desarrollo en la superficie de la planicie inundable. El graben posteriormente en el tiempo ha podido ser drenado por paleocanales formados por el río Ranchería y el río Cesar.

Las rocas sedimentarias, calizas, base de la secuencia sedimentaria (Formación Cerrejón), afloran hacia los costados de la cuenca y están afectadas por eventos tectónicos, que contribuyeron al levantamiento o hundimiento de las secuencias. El resultado es la individualización de una serie de bloques que se hundan y que parecen afectar el zócalo y el desarrollo de la zona inundable, en forma diferencial.

En la parte central de la depresión, drenada por el río Ranchería y el río Cesar, se presenta un depósito limoarcillosoarenoso que coexiste con mantos de carbón hacia profundidad, cuya parte

superficial parece haber tenido una evolución pedológica antigua, localmente; el material in situ es interrumpido por los explayamientos aluviales antiguos del piedemonte de la serranía de Perijá y Sierra Nevada de Santa Marta. La Formación Cerrejón presenta un desarrollo pedológico, cubierto por arenas aluviales.

Es posible que en el Paleógeno - Neógeno - Cuaternario, en la cuenca se presentase un evento tectónico importante, que originó el levantamiento con basculamiento y acentuó el hundimiento (subsistencia) de la actual zona inundable, así como el levantamiento (solevantamiento) de sus márgenes y el divorcio de aguas de los ríos Cesar y Ranchería. La disminución progresiva de los niveles de agua de estos ríos, como de sus afluentes, originó acumulaciones recientes de limo arena fina a media que rellenó el valle entre la Sierra Nevada de Santa Marta y la serranía del Perijá.

Una posterior erosión de las arcillas, por la presencia de nuevos cursos de agua, provenientes de la Cordillera Oriental, originó en las zonas de depresión, deposición de materiales. Los desbordamientos del río Ranchería y sus afluentes durante el Reciente depositaron limos y arenas finas; los sedimentos finos reposan sobre gravilla de tamaño medio de origen aluvial, depositadas en anteriores procesos fluviales. En la actualidad, la unidad donde se hizo el muestreo presenta una topografía relativamente plana con basculamientos hacia el oeste y hacia el norte, debido a las acciones tectónicas que facilitaron el escurrimiento de cursos al río principal. La inclinación de la planicie aluvial en la dirección N-S favorece el desbordamiento de las aguas en la misma dirección, y la erosión de los estratos superiores.

Hacia la parte central y norte de La Guajira, se presenta una planicie baja planocóncava, con drenajes de circulación lenta y acumulación de depósitos eólicos y dunas con sedimentos aluviales de llanura de desborde. Esta secuencia conforma una faja alargada en sentido N-S, en cuya parte central desarrolla su curso el río Ranchería. En la **Tabla 2** se resumen las características geológicas más sobresalientes de los terrenos de la cuenca del Magdalena.

3.10. RECURSOS MINERALES

Geológicamente, el territorio colombiano está conformado por ambientes metalogénicos que registran gran producción de minerales y metales en el mundo: el sistema Andino y el escudo precámbrico de Guayana (INGEOMINAS, MINERCOL, UPME, 2000).

En la Cordillera Central, la actividad magmática del Jurásico - Triásico muestra variadas posibilidades metalogénicas para metales preciosos y básicos asociados con depósitos de tipo pórfido cuprífero, epitermal aurífero y skarn. En la Cordillera Oriental, los eventos magmáticos del Jurásico al Paleógeno - Neógeno, de composición ácida a intermedia, han sido considerados en parte responsables de las mineralizaciones hipogénicas que se conocen en la cordillera. La metalogenia de la Cordillera Oriental, que guarda relación con el magmatismo jura-triásico y con eventos sedimentogénicos y sedimentarios durante el Cretácico – Paleógeno - Neógeno, presenta amplias posibilidades mineras por la gran variedad de ambientes de formación que presenta.

En las **Tablas 3, 4, 5 y 6** se presenta un resumen de las principales manifestaciones minerales presentes en el área de estudio (áreas hidrográficas Magdalena – Cauca, Caribe, Orinoquía y Amazonía): Sistema Andino (Cordilleras Central y Oriental), Región Caribe (Sierra Nevada de Santa Marta, Guajira), y Sistema de Guayana (Orinoquía- Amazonía). En la **Tabla 7** se presenta una síntesis de los mas importantes yacimientos en explotación.

Tabla 2. Características geológicas de los terrenos de la Cuenca del Magdalena (INGEOMINAS, 1986).

		TERRENO	LITOLOGIA	ESTILO ESTRUCTURAL	YACIMIENTOS MINERALES
I. ANDINA	CORDILLERA ORIENTAL	Perija	Pelitas granogradadas metamorizadas, cuarcitas, meta-arcosas; intrusivo hipoabisal calcoalcalino; secuencias clásticas.		Cobre nativo en vesiculculas de flujos máficos, sulfuros de Cu en rocas sedimentarias arcósicas, venas de teluros argentíferos.
		Santander	Metamorfitas; plutonitas, vulcanitas y diques básicos; sedimentitas rudáceas, pelíticas, calizas.	Fallamiento de Bloques	Porfido cuprífero (Mo-Cu), depósitos epigenéticos filonianos: Au-U-Ag-Zn, sulfuros macivos volcanicos y pegmatitas simples.
		Floresta	Metamorfitas; plutónicas ácidas; sedimentitas clásticas.	Fallamiento de Bloques, cabalgando hacia el E.	No hay conocidos.
		Quetame	Metamorfitas; plutonitas y sedimentitas.		Cu, Au y U en capas rojas y verdes. Co y Cu en dolomitas, venas de Au en intrusivos.
		Garzón	Neises, granulitas, mármoles, migmatitas. Intrusivos granitoides.	Complejo - Desconocido.	Pegmatitas., depósitos epigenéticos de Au, Ag, relacionados con los intrusitos, estaño.
		Suprayacent e Cretácico	Sedimentitas siliclasticas. Calizas bioclásticas, evaporitas.	Pliegues de cobertura con vergencia variable.	Fosfatos, evaporitas, Zn, Pb, Ag (filones), Cu, Mn, V.
CORDILLERA CENTRAL		Puqui	Metamorfitas		
		Cauca-Romeral	Mezcla estructural con predominio de basaltos. Cuñas de matamorfitas. Fragmentos de secuencias ofiolíticas.	Fallamiento imbricado con vergencia variable.	Sulfuros masivos volcánicos, Mn volcánico, Au filoniano, Mo pórfidos, Al en lateritas, talco, asbesto y cromita.
		Campamento	Complejo ofiolítico incompleto.	Desconocido.	Asbestos, talco, sulfuros masivos volcanogénicos, cromita, lateritas niquelíferas, Mn-volcanogénico.
		Cajamarca	Intercal. de sedimentitas pelíticas, samíticas y calcáreas con derrames basicos; volcaniclásticas.	Pliegues imbricados con vergencia W y expresion subvertical del plano de falla. Fallamiento de rumbo.	Au-Ag epitermal, sstibina-Au y venas de cuarzo con Au y polisulfuros.

Tabla 2. Características geológicas de los terrenos de la Cuenca del Magdalena (INGEOMINAS, 1986). (Continuación)

		TERRENO	LITOLOGIA	ESTILO ESTRUCTURAL	YACIMIENTOS MINERALES
1. ANDINA	CORDILLERA OCCIDENTAL	Buritica	Plutones calcoalcalino y Pórfidos andesíticos. Turbiditas, shale hemipelagico, chert, tobas. Basalto	Desconocido.	Lateritas- Ni (Cerromatoso), pórfido-Cu, filon-Au, Mn-vulcanogénico, sulfuros masivos vulcanogénicos.
		Cañasgordas	Plutones calcoalcalinos, Basaltos toleíticos, Tubiditas.		Mn-vulcanogénico, sulfuros masivos, pórfido-Cu, placeres de metales preciosos, Au-filon.
		Dagua	Complejos ultramaficos, plutones calcoalcalinos, basaltos toleíticos; tubiditas, chert y calizas; piroclastitas básicas.	Pliegues imbricados con vergencia al W. Desplazamientos verticales predominantes.	Sulfuros volcanogénicos. Cu-porfido. Au-Pt. Mn-vulcanogénico, cinabrio, bauxitas, Au diseminado en turbiditas distales.
	VALLES INTER-DINOS	Payande	Metamorfitas. Sedimentitas pelíticas y samíticas. Intrusivos ácidos a intermedios.	Fallamiento con expresión subvertical de los planos de falla que delimitan bloques levantados o hundidos.	Pórfido de Cu, Mo, skarn de Cu, Fe, Pb, Zn, W, venas de barita, depositos epigénéticos, Au diseminado en calizas, Cu-subvolcanico.
		Payande (San Lucas)	Metamorfitas, limolitas, flujos de lavas y volcanoclastos; plutonitas.	Fallamiento con expresión subvertical de los planos de falla.	Depósitos epigenéticos polimetálicos, Au diseminado en calizas, minerales radioactivos.
2. CARIBE	SIERRA NEVADA DE SANTA-	Santa Marta	Metamorfitas y plutonitas.	Fallamiento de bloques.	
		Sevilla	Metamorfitas, plutonitas. Cobertura pelítica y calcarea, localmente mantos de carbón.	Fallamiento de bloques.	
		Sierra Nevada	Metamorfitas, plutonitas, vulcanitas. Pelitas, ruditas y calizas.	Fallamiento de bloques.	
	LITORAL	Cesar	Sedimentitas y volcanitas.	Fallas inversas que afectan el basamento.	Campos de gas.
		San Jorge-Plato	Rocas ígneas y metamórficas que modelan el basamento cristalino.	Tectónica de bloques.	
		San Jacinto	Vulcanitas básicas, sedimentitas terrígenas marinas, fluviales y lacustres.	Anticlinales estrechos y sinclinales amplios con fallamiento principal hacia las estructuras anticlinales. Control diapírico.	Lateritas niquelíferas, cobre, carbonatos.

Tabla 3. Ocurrencias minerales en la Región Caribe

SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA			
OBJETIVO DE EXPLORACIÓN	CARACTERIZACIÓN GEOLOGICA	TIPOS DE DEPOSITOS	MINERALES Y METALES DE INTERES ECONOMICO
Macizo	Metamorfitas del Precámbrico, metasedimentos y sedimentitas del Paleozoico afectadas por magmatismo Jura - Triásico	Epitermales de Metales Preciosos	Au, Ag, Cu, Pb, Zn
		Rocas ornamentales	Lapidarios
		Sedimentario en arenitas Sulfuros de Cu, (Pb, Zn)	diseminados
		Pórfidos cúpríferos	Cu, mO
GUAJIRA			
Serranías	Sedimentitas del Cretáceo inferior	Sedimentario Estrato confinado	Cd, Sn
		Magmatismo	Pórfidos
	Vulcanitas máficas	Epitermales de Metales Preciosos	Au, Ag, Cu, Pb, Zn
		Sulfuros masivos estratiformes	Cu, Zn

(INGEOMINAS, MINERCOL, UPME, 2000)

3.11. ACTIVIDAD ANTRÓPICA

Desde le punto de vista de intervención de los espacios por actividades humanas, la superficie del territorio colombiano se ha dividido en tres grandes áreas: las intensamente intervenidas (26%) correspondientes a agroecosistemas, áreas de explotación minera, áreas ocupadas por asentamientos humanos y áreas de bosques plantados; las parcialmente intervenidas (15%) que comprenden los agrosistemas fragmentados y las sabanas orientales ocupadas por ganadería intensiva; y las levemente o no intervenidas (59%) constituidas, principalmente, por el interior de la Amazonía, algunas áreas de la región Pacífica, zonas de difícil acceso como el tapón del Darién y zonas de ladera con fuertes pendientes.

3.11.1. Asentamientos humanos

El 80% de la población colombiana habita en asentamientos que se encuentran en la zona Andina en pisos térmicos bajos y templados, aunque Bogotá, la capital, y mayor centro poblacional, se encuentra sobre los 2.500 msnm. La región más rural es la del oriente colombiano, aunque los procesos de colonización y de explotación minera han contribuido al mayor crecimiento de la Orinoquía, la Amazonía y la región del Piedemonte Llanero.

Tabla 4. Ocurrencias minerales en el Sistema Andino - Cordillera Central

CORDILLERA CENTRAL - Flanco Oriental			
OBJETIVO DE EXPLORACIÓN	CARACTERIZACIÓN GEOLOGICA	TIPOS DE DEPOSITOS	MINERALES Y METALES
Serranía de San Lucas (Triásico-Jurásico – Cenozoico)	Metamorfitas afectadas por magmatismo Triásico-Jurásico y Cenozoico	Epitermales de Metales Preciosos	Au, Ag, Cu, Pb, Zn
Batolito Antioqueño (Cretácico)	Magmatismo calcoalcalino con facies subvolcánicas tardías	Epitermales de Metales Preciosos	Au, Ag, Cu, Pb, Zn
Batolito de Ibagué-Mocoa y Terreno Payandé (Jura-Triásico)	Magmatismo calcoalcalino con facies subvolcánicas tardías	Pórfidos Cu-Mo	Cu-Au, Mo
		Epitermales de Au -Ag	Au, Ag, Cu, Pb, Zn
		Skarn	Au, Ag, Cu, Pb, Zn, W, Mo, Fe, Mármol
Batolito del Bosque-Manzanares (Cretácico-Paleógeno)	Magmatismo calcoalcalino con facies subvolcánicas tardías	Epitermales de Metales Preciosos	Au, Ag, Cu, Pb, Zn
Nechí Bajo Cauca (Cuaternario)	Aluviones recientes	Placeres recientes	Au, Pt
Aranzazu-Salamina (Cretácico)	Secuencia volcano-sedimentaria intruida por plutones calcoalcalinos	Epitermales de metales preciosos	Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Hg
Cordillera Central-Berlín (Cretácico inferior)	Sedimentitas	Sedimentario	Uranio, Fosfatos
Planeta Rica, Uré e Ituango	Alteración de rocas ultrabásicas del cretácico	Lateritas	Ni, Fe
Marmato-Titiribí-Anzá (Cenozoico)	Metamorfitas y sedimentitas afectadas por pórfidos dacítico-andesíticos	Epitermales de metales preciosos	Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Yeso
Cuenca de Amagá-Venecia	Sedimentitas del Terciario y Cretácico	Sedimentario	Carbón
Nechí Bajo Cauca (Cuaternario)	Aluviones recientes	Placeres recientes	Au

(INGEOMINAS, MINERCOL, UPME, 2000).

Tabla 5. Ocurrencias minerales en el Sistema Andino - Cordillera Oriental

OBJETIVO DE EXPLORACIÓN	CARACTERIZACIÓN GEOLOGICA	TIPOS DE DEPOSITOS	MINERALES Y METALES
Macizo de Santander	Metamorfitas del Precámbrico, metasedimentos y sedimentitas del Paleozoico afectadas por magmatismo Jura - Triásico	Epitermales (preciosos)	Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Mo
		Rocas ornamentales	Lapidarios
		Sedimentario	Sulfuros de Cu, Pb, Zn, diseminados
		Pórfidos intermedios	Cu
Cinturón Esmeraldífero Occidental, Oriental	Sedimentitas del Cretácico inferior	Fluídos sedimentogénicos de tipo epitermal	Esmeraldas, Tierras Raras
Cuenca Cundinamarca-Boyacá	Sedimentitas del Cretáceo superior	Sedimentario	Carbón Fosfatos
	Sedimentitas del Cretáceo superior	Evaporitas	Sal
	Sedimentitas del Cretáceo inferior	Sedimentario Lodolitas negras Calizas o calcoarenitas	Cd Sulfuros masivos Zn, Pb (Cu)
		Sedimentario	Calizas
	Sedimentitas del Terciario	Sedimentario	Hierro Carbón
San Vicente- Lebrija	Sedimentitas del Cretaceo Superior	Sedimentario	Fosfatos
Cuenca del Catatumbo	Sedimentitas del Terciario Medio	Sedimentario	Carbón Fosfatos
Mesa de los Santos-Barichara	Sedimentitas del Cretáceo	Sedimentario	Calizas y rocas ornamentales
		Evaporitas	Yeso Potasa
Valle medio- San Luis	Sedimentitas del Terciario	Sedimentario	Carbón térmico coquizable
San Vicente-Lebrija	Sedimentitas del Cretáceo superior	Sedimentario	Fosfatos
California-Vetas	Magmatismo ácido a intermedio	Epitermales	Au, Cu, Pb, Zn, Co, Mo, U
Cordillera Oriental-Zapatoca	Sedimentitas del Jurásico.Fm Girón	Sedimentario	Uranio
Cordillera Oriental-California	Magmatismo ácido a intermedio	Epitermales	Uranio
Valle medio, Landazuri	Sedimentitas del Cretácico Superior	Sedimentario	Carbón Térmico coquizable

(INGEOMINAS, MINERCOL, UPME, 2000).

Tabla 6. Ocurrencias minerales en el Sistema de Guayana- Orinoquia – Amazonía

OBJETIVO DE EXPLORACIÓN	CARACTERIZACIÓN GEOLOGICA	TIPOS DE DEPOSITOS	MINERALES Y METALES
Serranía de Naquén (Precámbrico)	Complejo migmatítico de Mitú, metasedimentos auríferos del Proterozoico y placeres recientes	Metaconglomerados	Au,U
		Filones	Au
		Kerógeno	Au
		Placeres recientes	Au
Taraira (Precámbrico)	Complejo migmatítico de Mitú, metasedimentos auríferos del Proterozoico y placeres recientes	Metaconglomerados	Au,U
		Filones	Au
		Kerógeno	Au
		Placeres recientes	Au
Serranía de Caranacoa (Precámbrico)	Complejo migmatítico de Mitú, metasedimentos auríferos del Proterozoico y placeres recientes	Iron formation	Fe
		Metaconglomerados	Au
		Placeres recientes	Au
Orinoquia (Precámbrico)	Granitos rapakivi, sienitas nefelínicas	Placeres recientes	Diamantes
		Bauxitas	Al
		Carbonatitas	Tierras raras (Ce,La,Gd,Ta,Nb,Y)
		Arenas negras	Ti, Tierras raras

(INGEOMINAS, MINERCOL, UPME, 2000).

Tabla 7. Principales yacimientos en explotación en la zona de Estudio

LOCALIZACIÓN	CARACTERIZACIÓN GEOLOGICA	TIPOS DE DEPOSITOS	MINERALES Y METALES
Cerromatoso	Alteración de rocas ultrabásicas del Cretácico	Lateritas	Ni
Cuenca del río Ranchería – Guajira (El Cerrejón)	Sedimentitas del Terciario	Sedimentario	Carbón térmico
Cuenca del río Cesar (La Loma -El Descanso)	Sedimentitas del Terciario	Sedimentario	Carbón térmico
Cuenca del río Cesar (La Jagua)	Sedimentitas del Terciario	Sedimentario	Carbón térmico
Cinturón Esmeraldífero Occidental (Muzo, Coscuez, Peñas Blancas)	Sedimentitas del Cretácico inferior	Flúidos sedimentogénicos de tipo epitermal	Esmeraldas
Cuenca Cundinamarca-Boyacá. Zipaquirá, Nemocón	Sedimentitas del Cretáceo superior	Evaporitas	Sal
Cuenca Boyacá. (Paz de Río9)	Sedimentitas del Terciario superior	Sedimentario	Hierro
Cuenca Boyacá. (Paz de Río)	Sedimentitas del Cretáceo inferior	Sedimentario	Calizas oscuras
Distrito Minero del Bajo Cauca	Aluviones recientes	Placeres recientes	Au, Pt
Distrito Minero del sur de Bolívar (San Lucas)	Aluviones recientes	Placeres recientes	Au, Pt

(INGEOMINAS, MINERCOL, UPME, 2000)

En las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca se encuentran las áreas de mayor concentración de asentamientos humanos: en el triángulo de las tres ciudades más importantes del país (Bogotá – Cali - Medellín), en el corredor o eje del Caribe y en el eje que incluye el área norte del altiplano cundiboyacense y el corredor de conexión hacia el Magdalena alto y medio.

3.11.2. Vías, transporte y comunicación

La infraestructura de transporte en Colombia ha sido desarrollada básicamente en la zona de cordilleras y valles de topografía accidentada, en donde se concentra la mayoría de la población y se desarrollan las principales actividades económicas.

En la zona Andina también se concentran la mayoría de vías, aeropuertos, puertos fluviales e instalaciones ferroviarias. Para transporte interurbano se ha privilegiado el desarrollo carretable automotor y la navegación aérea. La infraestructura marítima se concentra en cuatro puertos principales, tres de los cuáles se encuentran localizados en la zona Caribe (Cartagena, Barranquilla y Santa Marta).

Las regiones Andina y Caribe disponen, en general, de un sistema vial primario y secundario bien desarrollado, compuesto por vías pavimentadas y carreteras departamentales conectadas con carretables municipales y veredales. En los Llanos Orientales la red vial terrestre es menos densa y hacia la Amazonía es muy escasa a prácticamente inexistente. El transporte aéreo comunica las principales ciudades y poblaciones con la ciudad de Bogotá y permite el traslado entre regiones.

Los ríos Magdalena y Cauca poseen tramos navegables y se constituye en alternativa importante para comunicación y transporte fluvial. La región oriental ofrece varias alternativas de transporte por vía fluvial (ríos Meta, Vichada, Guaviare, Orinoco, Arauca, Bitá, Tomo, Tuparro, Casanare, Matavén, Ele, Upía, Cusiana, Uva, Iteviare y Siare, entre otros).

La red férrea, menos utilizada, cruza de sur a norte y, aunque no es mantenida en toda su extensión, está habilitada parcialmente en algunos tramos, especialmente para transporte de carbón en la región Caribe.

Las cabeceras municipales poseen servicio de telefonía convencional y celular que permite la comunicación entre las diferentes localidades de la región.

3.11.3. Servicios públicos

En Colombia la cobertura de servicio de energía eléctrica en las áreas urbanas es de casi el 100%, mientras que en las zonas rurales se ha incrementado a cerca del 94%. En servicio de acueducto, la cobertura es de cerca del 86%, y en servicio de alcantarillado, cerca del 71%. Cerca del 65% de los hogares en la zona urbana cocinan con gas y cerca del 25% en las zonas rurales, aunque el elemento más utilizado en las zonas rurales es la leña. El cubrimiento mas bajo de acueducto está en regiones como Montería, Villavicencio, Yopal, San José del Guaviare y poblaciones de la Amazonía.

En las zonas urbanas, el 94% de los hogares cuentan con servicio de recolección de basura y los restantes las queman, entierran o arrojan a drenajes acuosos. En la zona rural, por otra parte, solamente un 12% cuentan con servicio público de aseo y el 82% la queman, entierran o arrojan a

las fuentes hídricas. En la zona rural de regiones como Antioquia y el oriente colombiano, más del 50% de los hogares arrojan la basura a ríos y quebradas.

3.11.4. Actividades Productivas

En el área de estudio se desarrollan diferentes actividades que contribuyen a ejercer presión, por demanda y uso, sobre los recursos (cuencas) y a modificar las condiciones naturales del entorno. Entre las ciudades que desarrollan el comercio como principal actividad económica están San José del Guaviare, Puerto Inírida, Puerto Carreño, Yopal, Sincelejo, Villavicencio y Santa Marta; mientras que Bogotá y Medellín lideran la producción industrial. Santa Marta y Cartagena desarrollan actividades turísticas; Cartagena y Yopal se destacan por la industria petrolera y ciudades como Valledupar, Neiva, Ibagué, Bucaramanga y Villavicencio desarrollan la agroindustria. Otros centros industriales se localizan en Manizales, Barrancabermeja, Yumbo, Itagüí, Envigado, Nobsa, Soacha y Sogamoso.

- **Actividades extractivas y de transformación**

Las mayores actividades de aprovechamiento y extracción de recursos del subsuelo en la zona de estudio, se centran en petróleo, gas, carbón, oro, esmeraldas (Boyacá, Cundinamarca), níquel (Cerro Matoso en Córdoba), minerales metálicos o base (Pb, Zn, Mn, Cu, etc.), minerales industriales (feldespato, azufre, roca fosfórica, magnesita, barita, fluorita, arena silíceo, cuarzo, arcilla, caolín, sal marina y terrestre, yeso, etc.) y materiales de construcción (alrededores de grandes ciudades).

Las áreas con exploración y explotación petrolera están situadas en toda la región estudiada, en cuencas sedimentarias a lo largo de las cordilleras. La actividad exploratoria se concentra en la cuenca media y superior del valle del río Magdalena. El gas natural asociado al petróleo se explota en Santander, La Guajira y Casanare; en la plataforma marina en la región costera de La Guajira se encuentran activas explotaciones de gas (Chuchupa, Ballenas y Riohacha).

Las actividades de exploración y explotación carbonífera se encuentran distribuidas en las cordilleras Oriental y Central y en la costa Atlántica (La Guajira, Cesar, Córdoba, Cundinamarca, Boyacá, Norte de Santander, Antioquia, etc.).

El oro se explota en Antioquia (Segovia, Remedios y valles de ríos Nechí, Porce, Cauca) Caldas, Santander, Bolívar, Guainía, Amazonas.

- **Actividad agropecuaria:**

Las áreas intervenidas con el objetivo de desarrollar procesos de producción agrícola y pecuaria se denominan agroecosistemas, y en el caso de la zona de estudio, su mayor desarrollo se centra en la región Andina (zonas interandinas ubicadas en los valles de los ríos Magdalena y Cauca), seguida de la región Caribe (llanuras).

Las zonas intensamente intervenidas se distribuyen a lo largo de las cordilleras y de la Sierra Nevada de Santa Marta e incluyen el altiplano cundiboyacense en el flanco occidental de la Cordillera Oriental y las dos vertientes de la Cordillera Central. Los agroecosistemas parcialmente intervenidos están localizados en los páramos y los agroecosistemas fragmentados están localizados

en el sur y alrededor de la serranía de San Lucas y en los alrededores de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Los cultivos permanentes de la región Andina se encuentran ubicados por encima de los 1.000 msnm y los cultivos restantes en la zona basal e interandina. La gran mayoría de los cultivos transitorios se encuentran en los valles interandinos y en altitudes superiores a los 1.000 msnm.

3.11.5. Emisiones al ambiente

Colombia, por ser un país con relativamente baja densidad de población y con un sector productivo dinamizado a partir de sectores de extracción de recursos, las emisiones al ambiente corresponden a dichas características, de tal modo que las emisiones de dióxido de carbono por uso de combustibles fósiles representan menos del 0,3% del total emitido a nivel global.

Debido a que las fuentes emisoras (procesos de combustión de fuentes fijas y móviles) se concentran en los centros urbanos con mayor densidad de población (la mayoría de las cuales están localizadas en el área de influencia de la zona estudiada), las sustancias más relevantes emitidas a la atmósfera son de efecto potencial local y están representadas en material particulado, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono.

La principal problemática de los recursos sólidos en Colombia y en la zona de estudio es su disposición final, la cual se realiza en botaderos a cielo abierto, los cuales no poseen control de emisiones a la atmósfera y a los cuerpos acuosos.

Las actividades socioeconómicas (actividades domésticas, comerciales, industriales, agropecuaria) descargan a los cuerpos acuosos residuos sólidos, compuestos químicos, materia orgánica, metales y material vegetal, entre otros, las cuales afectan los ecosistemas y restringen el uso del recurso hídrico.

4. METODOLOGÍAS

Las metodologías utilizadas en el levantamiento de información geoquímica mediante muestreo de Ultra Baja Densidad (UBD) en la zona de estudio, que comprende el centro (región Andina), el caribe y el oriente del territorio colombiano, pertenecientes a las áreas hidrográficas Caribe (Guajira, Catatumbo), Magdalena – Cauca, Orinoco y el extremo norte del área amazónica, se ajustan a las normas y requerimientos de los proyectos internacionales IGCP 259 y 360 para muestreo de sedimentos de planicie de inundación, *floodplain* y sedimentos de sobrebanca, *overbank*, (Darnley et al., 1995; Salminen et al., 1998), las cuales han sido adaptadas a las condiciones particulares del territorio colombiano.

4.1. METODOLOGÍA DE MUESTREO

En éste aparte se presentan consideraciones sobre bases, diseño, tipo de muestras, procedimientos y precauciones que se tomaron durante el muestreo. Los protocolos y estándares para la recolección de muestras y la toma de información en campo se encuentran detallados en la Norma Técnica NT1 de INGEOMINAS para “Muestreo de Sedimentos de Planicie de Inundación” (Prieto y Gonzalez, 2003a)

4.1.1. Principios y definiciones

Los sedimentos se definen como el material sólido, detrítico y clástico (producto meteorizado menos soluble), que es transportado por las aguas y depositado a lo largo del lecho y cauce de una corriente. Entre los principales tipos de sedimentos usados en estudios geoquímicos y ambientales están los sedimentos de fondo de cauce o lagos, de planicie de inundación (*floodplain* y sobrebanca), sedimentos activos y sedimentos en suspensión.

La planicie de inundación de un río es la zona adyacente al canal del río, donde se depositan sedimentos en los períodos de inundación del régimen estacional de descarga de la corriente. Estos sedimentos están constituidos por materiales que han sido transportados por la corriente y depositados fuera del canal principal, pueden encontrarse en terrazas aluviales o en la planicie de inundación activa, representan el aporte de la cuenca de captación del drenaje correspondiente, son depositados durante eventos de inundación en ambientes de baja energía y están compuestos principalmente por sedimentos de grano fino, limoarcilloso y arcillolimoso.

Para adelantar el muestreo de Ultra Baja Densidad (UBD) en Colombia se colectaron sedimentos de las planicies de inundación de cuencas con áreas de captación entre 500 y 1.000 km² (sobrebanca) y entre 1.000 y 6.000 km² (*floodplain*). En zonas muy montañosas, en las que los ríos o drenajes no son muy grandes (entre 100 y 500 km²) y en donde se ha posibilitado la formación de planicies de inundación que han dado lugar al desarrollo de suelos aluviales (de origen fluvial), se incluyó este tipo de muestras con el objetivo de tener un cubrimiento espacial sistemático del territorio.

La secuencia o perfil del sedimento de llanura de inundación representa el aporte de la cuenca de captación a lo largo del tiempo de evolución (eventos de inundación). Aunque la historia o cronología de eventos que dieron origen a la secuencia del sedimento puede ser muy compleja, la porción más superficial, entre 0 y 25 cm después de retirada la capa vegetal (A_{0-25}), está generalmente influenciada por actividades antrópicas recientes y la porción más profunda (25 cm más profundos por encima de la tabla de agua o del nivel de gravas) refleja normalmente la variación natural (*background*) de la cuenca de captación.

4.1.2. Selección de sitios de muestreo

Para adquirir información geoquímica con base en un muestreo de Ultra Baja Densidad (UBD) se definieron como unidades básicas de muestreo las cuencas de drenaje cuya área de captación esté entre 1.000 y 6.000 km², en cuyo caso se recolectan sedimentos de *floodplain*, y a cuencas de drenaje con áreas de captación entre 500 y 1.000 km², en cuyo caso se recolectan sedimentos de sobrebanca u *overbank*.

Para garantizar un cubrimiento espacial homogéneo y permitir el manejo de datos, se ha diseñado una red de muestreo, que toma como referencia la red de muestreo geoquímico global con celdas de 160 x 160 km (**Figura 7**), las cuales se subdividen a su vez en celdas de 80 x 80 km. En cada celda de 80 x 80 km se delimitaron las cuencas y se seleccionan dos de ellas para coleccionar las muestras correspondientes. Aleatoriamente, en una celda de 80 x 80 km se tomó otra cuenca para recolectar una muestra duplicado de celda y en una de las cuencas muestreadas se tomó un punto para coleccionar duplicados de muestreo.

El sitio de recolección de la muestra debe estar localizado en la llanura aluvial de la cuenca seleccionada en el punto más bajo de la cuenca de drenaje (ápice), cerca al punto de confluencia de la corriente (de orden menor), con el río principal (de orden mayor).

Tomando como referencia la red de muestreo y con base en la red hidrográfica del área de estudio se definieron aleatoriamente cuencas en las cuáles se localizaron los sitios en donde se coleccionaron muestras de sedimentos de planicie de inundación (**Figura 8**). Todos los puntos de muestreo se georeferenciaron haciendo uso de planchas cartográficas y posicionador geográfico GPS.

4.1.3. Tipos de muestras

En el muestreo de Ultra Baja Densidad adelantado, se tomaron muestras de sedimentos de planicie de inundación (*floodplain*) en cuencas de drenaje con áreas entre 1.000 y 6.000 km² y sedimentos de sobrebanca (*overbank*) en cuencas de drenaje con áreas entre 500 y 1.000 km². En algunas zonas, en donde solamente se encontraron cuencas con áreas de captación entre 100 y 500 km², se tomaron algunos suelos aluviales.

En cada sitio de muestreo se recolectaron los siguientes tipos de sedimentos de planicie de inundación:

- 2 kg de muestra superficial (A₀₋₂₅)
- 2 kg de muestra profunda (25 cm más profundos hasta 200 cm o hasta el nivel de gravas o tabla de agua – mínimo 60 cm).
- 2kg de muestra profunda para datación (¹⁴C) del estrato o capa con mayor contenido orgánico (carbonáceo, turba, etc.)
- En cuencas de drenaje seleccionadas aleatoriamente (10% del número de cuencas), se tomaron duplicados de celda
- En el 10% de cuencas muestreadas se tomaron duplicados de muestreo

En cada sitio, a lo largo del perfil muestreado y en donde las condiciones lo permitieron, se levantó información radiométrica con un detector de centelleo.

Figura 7. Celdas de la red de referenciación geoquímica global (GRN)



Figura 8. Cuencas muestreadas

4.1.4. Precauciones y recomendaciones observadas durante el muestreo.

Para garantizar integridad, evitar contaminación y permitir organización de las muestras colectadas, durante el muestreo se observaron las siguientes medidas:

- Todos los sitios de muestreo se georreferenciaron (coordenadas geográficas y planas) por medio de GPS y se efectuó corrección de las coordenadas sobre planchas topográficas (IGAC).
- Cada muestra de sedimento de llanura de inundación se recolectó de un solo sitio.
- Los sitios de muestreo se localizaron lejos de fuentes evidentes de contaminación por actividades antrópicas. A distancias prudenciales de carreteras (mínimo 50 - 100 m).
- Para la muestra de datación, se tuvo la precaución de no tomar muestra expuesta al aire o visiblemente alterada.
- Para efectuar el muestreo y evitar posibles contaminaciones con metales, se utilizaron instrumentos de materiales plásticos o de madera sin pintar y herramientas en acero inoxidable (aleaciones no contaminantes).
- Para manipular las muestras se utilizaron guantes desechables.
- Al coleccionar muestras superficiales y profundas, se tomó la muestra profunda primero y luego se recolectó la muestra superficial.

4.1.5. Identificación de las muestras

La identificación de cada sitio de muestreo se definió previamente a la recolección de la muestra en campo y se revisaron los códigos para su ingreso a la base de datos de geoquímica.

Cada muestra se identificó con un código que contiene cuatro dígitos (ABCD) para indicar el número de la cuenca muestreada, tres letras (XXX) para identificar el tipo de muestra y dos letras (DD) adicionales en caso de duplicados.

- A y B - Dos dígitos que indican el número de celda de 160 x 160 km de la red geoquímica de referencia global, que para Colombia se han numerado del 01 al 57.
- C y D - Dos dígitos que indican el número de la cuenca a muestrear. La numeración de las cuencas se empieza de oeste a este y de norte a sur con referencia a cada celda de 160 x 160 km y dentro de ellas con referencia a las subceldas de 80 x 80 km en que han sido subdivididas.
- SFS - Para sedimento de llanura de inundación superficial.
- SFP - Para sedimento de llanura de inundación profundo.
- DC - Para duplicado de celda
- DM - Para duplicado de muestreo
- DAT - Para muestra profunda para datación

Como ejemplo, para una muestra de sedimento de llanura de inundación, superficial y duplicado de muestreo, colectada en la celda 21, cuenca 02, el código asignado es 2102-SFSDM. La muestra para datación se identifica como muestra profunda y se le añade las letras DAT, en cuyo caso el código es 2102-SFPDAT.

Los detalles de la codificación aparecen en la Norma Técnica NT1 de INGEOMINAS para “Muestreo de Sedimentos de Planicie de Inundación” (Prieto y Gonzalez, 2003a)

4.1.6. Muestreo

En cada sitio se colectó una muestra de sedimento de planicie de inundación superficial (A_{0-25}), una muestra de sedimento profundo y una muestra para datación.

4.1.6.1. Recolección de muestras

Las muestras de sedimento de planicie de inundación se colectaron excavando un apique (hasta 200 cm de profundidad y mínimo de 60 cm) en la llanura de inundación de la cuenca seleccionada. En los casos en que se presentó un perfil descubierto se procedió a limpiar el perfil, excavando hasta 50 cm al interior del perfil, y se procedió a coleccionar las muestras correspondientes (**Figura 9**).

El muestreo se efectuó siguiendo los protocolos establecidos por el proyecto “Compilación y Levantamiento de Información Geoquímica del Territorio” para muestreo de Ultra Baja Densidad – UBD, los cuáles se encuentran detallados en la Norma Técnica NT1 de INGEOMINAS para “Muestreo de Sedimentos de Planicie de Inundación” (Prieto y Gonzalez, 2003a).

Conjuntamente con la recolección de muestras se levantó información en campo, la cuál se registró en el formato estándar presentado en la Norma Técnica NT1 de INGEOMINAS para “Muestreo de Sedimentos de Planicie de Inundación” (Prieto y Gonzalez, 2003a)

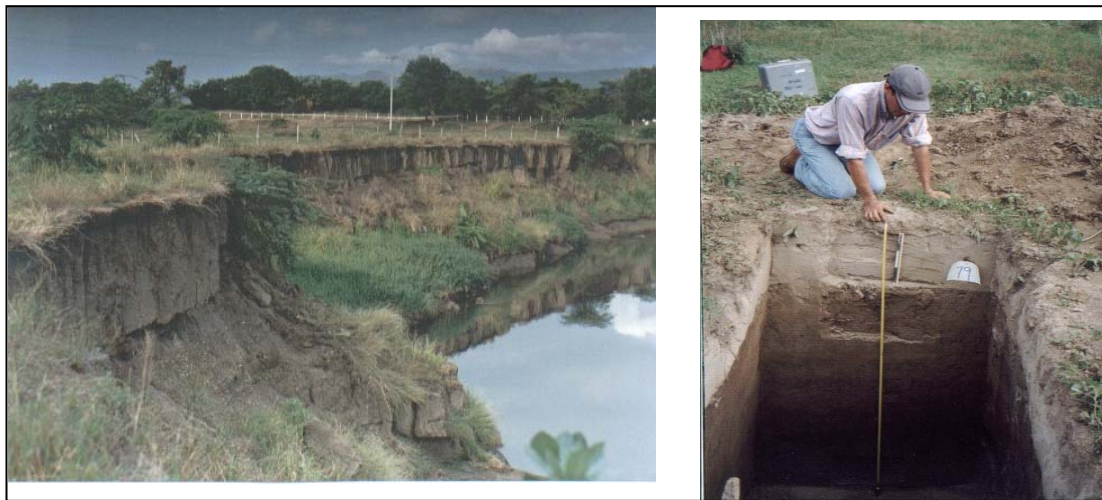


Figura 9. Fotografías mostrando un perfil de sedimentación descubierto sobre el río Bogotá y un apique de muestreo sobre el río Manzanares.

La información de campo recolectada sobre el sitio de muestreo, contempló condiciones climáticas, paisaje, uso de suelo, geología de la cuenca muestreada, ocurrencias minerales, vegetación y actividades antropogénicas, entre otras.

En campo y siguiendo protocolos estándar (**Figura 10**) se determinaron propiedades físico-mineralógicas macro de cada una de las muestras colectadas, tales como composición, forma, tamaño de partícula y humedad.



Figura 10. Fotografía que ilustra un apique de muestreo en la planicie de inundación del río Upía, del río Manso y del río Zulia, con los elementos de muestreo.

4.1.6.2. Descripción de perfil de sedimentación

Como parte de la documentación del sitio de muestreo y de las muestras colectadas, se adelantó una descripción detallada del perfil de sedimentación y se levantó la correspondiente columna (hasta 200 cm) a escala 1:10 (**Figura 11**).



Figura 11. Fotografías de diferentes perfiles de muestreo sobre el río Tua, río Manso y río Yucaó

4.1.6.3. Mediciones radiométricas

A lo largo del perfil, en donde las condiciones lo permitieron, se levantó información radiométrica con un detector de centelleo. El procedimiento para la toma de ésta información se presenta detallado en la Norma Técnica NT1 de INGEOMINAS para “Muestreo de Sedimentos de Planicie de Inundación” (Prieto y Gonzalez, 2003a). Ver (**Anexo 1**).

4.1.7. Control de muestreo

En una de las celdas de 80 x 80 km se seleccionó aleatoriamente una cuenca adicional para tomar una muestra que se tomó como duplicado de celda (10% del número total de cuencas muestreadas). La muestra se colectó siguiendo los mismos protocolos para toma de muestras, detallados en la Norma Técnica NT1 de INGEOMINAS.

En cada celda de 160 x 160 km se seleccionó aleatoriamente una cuenca en la cual se tomó un duplicado de muestreo y se abrió otro apique, a una distancia no mayor de 10 metros (en la misma margen) del sitio original. La muestra se tomó siguiendo los mismos protocolos para toma de muestras, detallados en la Norma Técnica NT1 de INGEOMINAS.

4.1.8. Fotografías

En cada sitio de muestreo se tomaron fotografías (mínimo 2): una presentando una vista general del sitio de muestreo con relación a la corriente/ canal del río y la otra de un acercamiento del apique mostrando el perfil de sedimentación con los horizontes de muestreo. Antes de tomar la segunda fotografía, se marcaron las capas del perfil de sedimentación que se podían diferenciar. Se colocó sobre la superficie del apique una cinta métrica de madera coloreada alternadamente por secciones (cada 10 cm), como escala de referencia. Se procuró mostrar en lo posible, las capas y las características texturales del perfil muestreado.

En algunos sitios, en donde se consideró necesario, por existir rasgos geomorfológicos, geológicos o texturales de interés, se tomaron fotografías adicionales y se registró el número de fotos en el formato de captura de datos de campo.

4.1.9. Preservación y envío de las muestras

Las muestras de sedimentos de llanuras de inundación debidamente rotuladas y empacadas, es decir, con su código de identificación y dentro de doble envoltura plástica, se colocaron en cajas de plástico (convenientemente identificadas) y se remitieron a la mayor brevedad posible a los laboratorios de INGEOMINAS (semanalmente o cada 15 días) en donde se sometieron a preparación primaria para obtener una submuestra que fue enviada al laboratorio de geoquímica del IGGE de China en donde se efectuaron los análisis químicos requeridos.

4.2. METODOLOGÍA ANALÍTICA

Las muestras de sedimento de planicie de inundación recolectadas fueron recibidas en los laboratorios de INGEOMINAS, en donde fueron sometidas a preparación primaria siguiendo el procedimiento establecido en la Norma Técnica NT2 de INGEOMINAS, para “preparación

primaria para sedimentos de planicie de inundación” (Prieto y Gonzalez, 2003b) y posteriormente fueron transferidas para análisis químico en laboratorios del IGGE de China.

4.2.1. Preparación de muestras

Durante el secado y almacenamiento de las muestras se dispuso de espacios específicos, limpios, libres de corrientes de aire y protegidos de cualquier tipo de precipitación atmosférica, con lo cuál se garantizó la integridad de la muestra y se evitó contaminación cruzada entre muestras, contaminación con otro tipo de muestras o contaminación con precipitaciones de la atmósfera. Lo anterior se consideró crítico, teniendo en cuenta que las muestras fueron analizadas para 71 elementos a niveles de trazas y ultra-trazas (μg , ng).

El proceso de preparación incluyó las siguientes operaciones:

- Extracción de las muestras de las bolsas plásticas y ubicación en recipientes de material no contaminante (plástico o acero inoxidable), completamente limpios, secos y rotulados. Retiro manual de los materiales que no hacen parte de la muestra tales como hojas, raíces, tallos, plásticos u otros.
- Secado de las muestras, en el espacio acondicionado para secado a una temperatura que no exceda los 40°C .
- Disgregación de las muestras ya secas (en caso que estén aglomeradas) con un artefacto plástico o de madera (martillo) y retiro manual del material (raíces, tallos, etc.) que no hace parte de la muestra y que aún permanezca en la misma.
- Homogeneización manual usando material plástico.
- Tamizado pasando todo el material por un tamiz libre de contaminantes (malla de nylon con borde de madera) de malla # 20 (serie Tyler) y descarte del material que no pase la malla mencionada (- malla # 20).
- Homogeneización manual usando una lámina de material plástico (homogeneización diagonal).
- Cuarteo y pesada hasta obtener 250 g de muestra.
- Empaque de las muestras en recipientes plásticos, rotulados con el código asignado y re-empaque en bolsa de lona también rotulada y envío a los laboratorios del IGGE (Institute of Geophysical and Geochemical Exploration) de China.

4.2.2. Análisis químico

Para análisis químico se seleccionaron las cuencas más representativas de las áreas hidrográficas Magdalena - Cauca y Caribe y de la zona oriental de Colombia. Mediante convenio de cooperación bilateral entre la república de China y Colombia, el IGGE de China (Institute for Geophysical and Geochemical Exploration), efectuó análisis químico para 71 elementos en 194 muestras superficiales A_{0-25} , 195 muestras profundas (25 cm más profundos, hasta 2 metros), 25 duplicados de muestras superficiales y 25 duplicados de muestras profundas.

Las muestras restantes, no procesadas en ésta etapa, fueron archivadas y podrán ser analizadas posteriormente siguiendo normas, estándares y requerimientos de levantamiento de información geoquímica.

Para ejecutar los análisis químicos se tuvieron en consideración requerimientos establecidos por el IGGE de China y por los servicios geológicos involucrados en cartografía geoquímica, los cuáles se sintetizan en los siguientes puntos:

- Los límites de detección (LD) de los elementos traza deben ser inferiores a sus valores de abundancia en la corteza terrestre, de tal modo que se pueda tener acceso al máximo de información geoquímica de las muestras colectadas y, a su vez, los datos obtenidos puedan ser aplicados con múltiples propósitos.
- La desviación analítica entre los diferentes laboratorios debe ser reducida al máximo, de tal modo que los datos obtenidos sean comparables entre regiones y entre países.
- Para garantizar la exactitud de las mediciones obtenidas, los protocolos analíticos deben estar enmarcados en un programa de control de calidad analítica que incluya el uso de materiales patrón (estándar), primarios y secundarios.
- Se debe utilizar un método de análisis multi-elemento, como base para cubrir un gran número de elementos mayores, menores y trazas simultáneamente.
- Los elementos con baja abundancia en la corteza deben ser tratados separadamente y analizados por el método más apropiado disponible (menores límites de detección y máxima precisión y exactitud).
- Los laboratorios deben estar calificados para adelantar mediciones que garanticen el control de calidad analítica (sistema de calidad analítica).

Los análisis químicos se efectuaron con metodologías que permitieron cuantificar los 71 elementos con los más bajos límites de detección posibles (**Figura 12, Tabla 8**), de tal modo que fueron obtenidos valores en el 95% de las muestras analizadas. Los análisis se efectuaron durante el año 2003 (130 muestras) y 2004 (309 muestras), cumpliendo con los requerimientos enumerados anteriormente, siguiendo protocolos estandarizados (IGGE- Geological Survey of China, 2001) y aceptados por los servicios geológicos participantes en el levantamiento de información geoquímica global (Working Group on Geochemical Baselines).

En el IGGE de China las muestras fueron sometidas a un esquema de análisis “multi-método” para determinación de contenidos de elementos totales, el cuál incluyó utilización de técnicas no destructivas en muestras sólidas, métodos de fusión-solubilización mediante ataque multiácido (HCl, HNO₃, HF, H₂SO₄, HClO₄), extracción con resinas y solventes orgánicos (MIBK, etc.) y cuantificación con varias técnicas instrumentales. Los protocolos analíticos utilizados se encuentran detallados en los estándares analíticos del IGGE (**Tabla 8**) (Geological Survey of China, 2001).

Entre los métodos no destructivos utilizados están, difracción de rayos X (XRF), fluorescencia de rayos X (XRF) y activación neutrónica (INAA). Para la determinación de elementos en solución se utilizaron espectrometría de fluorescencia atómica (AFS), espectrometría de emisión óptica con fuente acoplada de plasma (ICP-OES), espectrometría de masas con fuente acoplada de plasma (ICP-MS), espectroscopia de emisión atómica (AES), electrodo de ión selectivo (ISE), espectrometría de absorción atómica (AAS), espectrometría de absorción atómica con hormo de grafito (GFAAS), absorción atómica por generación de hidruros (HGAAS), colorimetría (COL), método de Kjeldahl (K-Method) para nitrógeno y conductividad térmica (Fired-conductivity) para carbono. Para análisis de Pd y Pt se empleó la técnica de preconcentración con espuma y cuantificación con espectrometría de absorción atómica con hormo de grafito (CP-GF-AAS).

H																	He
Li 1.0	Be 0.1											B 2.0	C 0.1	N 20	O 20	F 50	Ne
Na 0.01	Mg 0.002											Al 0.01	Si 0.1	P 20.0	S 20	Cl 10.0	Ar
K 0.002	Ca 0.02	Sc 0.10	Ti 20.0	V 2.0	Cr 3.0	Mn 10	Fe 0.02	Co 0.5	Ni 0.5	Cu 0.5	Zn 2.0	Ga 1.0	Ge 0.1	As 0.1	Se 0.01	Br 0.1	Kr
Rb 2.0	Sr 5.0	Y 0.1	Zr 2.0	Nb 2.0	Mo 0.02	Tc	Ru	Rh	Pd 0.01	Ag 10	Cd 1.0	In 0.0005	Sn 0.4	Sb 0.1	Te	I 0.1	Xe
Cs 1.0	Ba 5.0	La* 1.0	Hf 0.2	Ta 0.05	W 0.002	Re	Os	Ir	Pt 0.05	Au 0.2	Hg 2.0	Tl 0.05	Pb 2.0	Bi 0.01	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac**	Ku Unq	Ha Unp	Unh												

La* 1.0	Ce* 1.0	Pr 0.1	Nd 0.1	Pm	Sm 0.1	Eu 0.1	Gd 0.1	Tb 0.05	Dy 0.1	Ho 0.05	Er 0.1	Tm 0.02	Yb 0.1	Lu 0.05
Ac**	Th 0.1	Pa	U 0.2	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw

LD – Límite de Detección	
	% como óxidos
	ppm
	ppb

Figura 12. Elementos analizados y límites de detección (LD)

Tabla 8. Metodologías analíticas, Límites de Detección (LD), % de resultados aceptables (Geological Survey Of China, 2001)

Serie	Elemento	Método usado		L.D.		LD	unidad	% de resultados aceptables	
		2003	2004	2003	2004			Estándar	Duplicado
1	Ag	ES	ES	20,00	10,00	ppb	100	94	
2	As	AFS	AFS	1,00	0,10	ppm	100	100	
3	Au	AAN	CP-GF-AAS	0,20	0,20	ppb	100	94	
4	B	ES	ES	2,00	2,00	ppm	100	100	
5	Ba	<u>ICP-OES</u>	<u>ICP-MS</u>	<u>10,00</u>	<u>5,00</u>	ppm	100	100	
6	Br	XRF	XRF	<u>1,50</u>	<u>0,10</u>	ppm	100	94	
7	Be	ICP-OES	ICP-OES	0,20	0,10	ppm	100	100	
8	Bi	<u>ICP-OES</u>	<u>ICP-MS</u>	0,05	0,01	ppm	100	100	
9	C	F-C	F-C	0,10	0,10	%	100	100	
10	Cd	ICP-MS	ICP-MS	30,00	1,00	ppb	100	100	
11	Ce	ICP-MS	ICP-MS	1,00	1,00	ppm	100	100	
12	Cl	XRF	XRF	20,00	10,00	ppm	100	100	
13	Co	<u>ICP-MS</u>	<u>XRF</u>	1,00	0,50	ppm	100	100	
14	Cr	<u>ICP-OES</u>	<u>XRF</u>	<u>3,00</u>	<u>5,00</u>	ppm	100	100	
15	Cs	ICP-MS	ICP-MS	1,00	1,00	ppm	100	94	
16	Cu	<u>ICP-MS</u>	<u>XRF</u>	<u>1,00</u>	<u>0,50</u>	ppm	100	100	
17	Dy	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,10	ppm	100	100	
18	Er	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,10	ppm	100	100	
19	Eu	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,10	ppm	100	100	
20	F	ISE	ISE	100,00	50,00	ppm	100	100	
21	Ga	XRF	XRF	1,00	1,00	ppm	100	100	
22	Ge	AFS	AFS	0,10	0,10	ppm	100	100	
23	Gd	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,10	ppm	100	100	
24	Hg	AFS	AFS	2,00	2,00	ppb	100	100	
25	Hf	ICP-MS	ICP-MS	0,20	0,20	ppm	100	100	
26	Ho	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,05	ppm	100	100	
27	I	COL	COL	<u>0,10</u>	<u>0,50</u>	ppm	100	100	
28	In	ICP-MS	ICP-MS	0,100	0,0005	ppm	100	100	
29	La	ICP-MS	ICP-MS	1,00	1,00	ppm	100	100	
30	Li	ICP-OES	ICP-OES	1,00	1,00	ppm	100	100	
31	Lu	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,05	ppm	100	100	
32	Mn	ICP-OES	ICP-OES	10,00	5,00	ppm	100	100	
33	Mo	ICP-MS	ICP-MS	0,20	0,02	ppm	100	100	
34	N	K-method	K-method	20,00	20,00	ppm	100	100	
35	Nb	<u>ICP-MS</u>	<u>XRF</u>	<u>5,00</u>	<u>2,00</u>	ppm	100	100	

Tabla 8. Metodologías analíticas, Límites de Detección (LD), % de resultados aceptables
(Geological Survey Of China, 2001) (Continuación)

Serie Elemento	Método usado		L.D. LD		unidad	% de resultados aceptables	
	2003	2004	2003	2004		Estándar	Duplicado
36 Nd	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,10	ppm	100	100
37 Ni	<u>ICP-MS</u>	<u>XRF</u>	<u>0,50</u>	<u>2,00</u>	ppm	100	100
38 P	<u>ICP-OES</u>	<u>XRF</u>	<u>100,00</u>	<u>20,00</u>	ppm	100	100
39 Pb	<u>ICP-MS</u>	<u>XRF</u>	<u>3,00</u>	<u>2,00</u>	ppm	100	100
40 Pr	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,10	ppm	100	100
41 Rb	XRF	XRF	<u>5,00</u>	<u>2,00</u>	ppm	100	100
42 S	XRF	XRF	50,00	20,00	ppm	100	100
43 Sb	AFS	AFS	0,10	0,10	ppm	100	100
44 Sc	ICP-MS	ICP-MS	1,00	0,10	ppm	100	100
45 Se	AFS	AFS	0,01	0,01	ppm	94	100
46 Sm	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,10	ppm	100	100
47 Sn	ES	ES	1,00	0,40	ppm	100	100
48 Sr	<u>ICP-OES</u>	<u>XRF</u>	5,00	5,00	ppm	100	100
49 Ta	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,05	ppm	100	100
50 Tb	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,05	ppm	100	100
51 Th	ICP-MS	ICP-MS	1,00	0,10	ppm	100	100
52 Ti	<u>ICP-OES</u>	<u>XRF</u>	<u>100,00</u>	<u>20,00</u>	ppm	100	100
53 Tl	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,05	ppm	100	100
54 Tm	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,02	ppm	100	100
55 U	ICP-MS	ICP-MS	0,20	0,20	ppm	100	100
56 V	<u>ICP-OES</u>	<u>XRF</u>	5,00	2,00	ppm	100	100
57 W	ICP-MS	ICP-MS	0,200	0,002	ppm	100	100
58 Y	<u>ICP-MS</u>	<u>XRF</u>	<u>0,10</u>	<u>1,00</u>	ppm	100	100
59 Yb	ICP-MS	ICP-MS	0,10	0,10	ppm	100	100
60 Zn	<u>ICP-OES</u>	<u>XRF</u>	<u>3,00</u>	<u>2,00</u>	ppm	100	100
61 Zr	XRF	XRF	<u>10,00</u>	<u>2,00</u>	ppm	100	100
62 Na ₂ O	ICP-OES	ICP-OES	<u>0,010</u>	<u>0,050</u>	%	100	100
63 MgO	ICP-OES	ICP-OES	<u>0,002</u>	<u>0,050</u>	%	100	100
64 Al ₂ O ₃	XRF	XRF	0,01	0,10	%	100	100
65 SiO ₂	XRF	XRF	0,10	0,10	%	100	100
66 K ₂ O	<u>ICP-OES</u>	<u>XRF</u>	<u>0,002</u>	<u>0,050</u>	%	100	100
67 CaO	<u>ICP-OES</u>	<u>XRF</u>	<u>0,020</u>	<u>0,050</u>	%	100	100
68 Fe ₂ O ₃	XRF	XRF	<u>0,100</u>	<u>0,020</u>	%	100	100
69 Org.C	F-C	F-C	0,100	0,050	%	100	100
70 Pd	CP-GF-AAS	CP-GF-AAS	0,20	0,010	ppb	100	100
71 Pt	CP-GF-AAS	CP-GF-AAS	0,20	0,05	ppb	100	100

4.2.3. Datación por ^{14}C

Como complemento de la documentación de las muestras de sedimentos de planicie de inundación y para analizar la evolución y edad del perfil de sedimentación de donde se colectaron las muestras y por tanto el aporte de la cuenca de drenaje muestreada se colectaron muestras para datación con carbono-14 (^{14}C).

Del total de muestras colectadas se seleccionaron 20 cuencas en donde las muestras presentaban alto contenido de carbono orgánico total (>1%), la cuál es una condición necesaria para efectuar la datación por ^{14}C . La datación fue efectuada en los laboratorios de la Subdirección de Ensayos y Servicios Tecnológicos de INGEOMINAS (Laboratorio de Geología - ^{14}C), siguiendo estándares metodológicos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para datación por ^{14}C .

El proceso de datación incluyó pre-tratamiento físico-químico, síntesis de benceno en varias etapas y lectura en espectrofotómetro de centelleo líquido.

4.2.4. Control de calidad analítica

La calidad de los análisis químicos efectuados se controló mediante el uso de patrones certificados primarios y secundarios (exactitud), efectuando análisis duplicados (precisión) y re-analizando muestras con muy altos o muy bajos contenidos de un elemento (**Tabla 9**); todo lo anterior como parte del programa de control de calidad establecido por el laboratorio de geoquímica aplicada del IGGE de China (China Geological Survey, 2001).

Tabla 9. Control de Calidad: Estándares de referencia y duplicados

Control de Exactitud			
Estándar	Identificación	Estándar	Identificación
01(69 elementos)	GAU9GSD8	12(69 elementos)	GAU9GSD8
02(69 elementos)	GAU12GSD11	13(69 elementos)	GAU9GSD9
03(69 elementos)	GAU8GSS1	14(Pd, Pt)	GBW07290
04(69 elementos)	GAU9GSS3	15(Pd, Pt)	GBW07288
05(69 elementos)	GAU10GSD9	16(Pd, Pt)	GBW07292
06(69 elementos)	GAU11GSD10	17(Pd, Pt)	GBW07294
07(69 elementos)	GAU9GSD1a	18(Pd, Pt)	GPt-8
08(69 elementos)	GAU9GSD2	19(Pd, Pt)	GPt-1
09(69 elementos)	GAU9GSD4	20(Pd, Pt)	1/2Gpt-2
10(69 elementos)	GAU9GSD5	21(Pd, Pt)	GPt-2
11(69 elementos)	GAU9GSD6		
Datación ^{14}C	SRM4990C – Oxalic Acid, estándar NBS		
Control de Precisión			
Elementos	Número de Duplicados		
Pd y Pt	36		
69 elementos restantes	31		
Datación ^{14}C	1		
Control de Muestreo			
Duplicados de Muestras	25 horizonte superficial		
	25 horizonte profundos		

La precisión y exactitud de los resultados, fue evaluada con los datos obtenidos en el programa de control de calidad analítico (patrones y duplicados) haciendo uso del software Geosoft-Oasis-Módulo Címera, Control de Calidad Analítica (versión 5.1.8).

La calidad de las dataciones con ^{14}C efectuadas fue controlada con duplicados y patrones certificados, siguiendo los protocolos del laboratorio de Geología - ^{14}C del INGEOMINAS de acuerdo con los estándares del OIEA

Los listados completos de las muestras duplicados y los valores de referencia de los patrones certificados se presentan en el capítulo de resultados (numeral 5).

4.3. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

El proceso general de integración, análisis de información y producción de mapas, se esquematiza en la **Figura 13**.

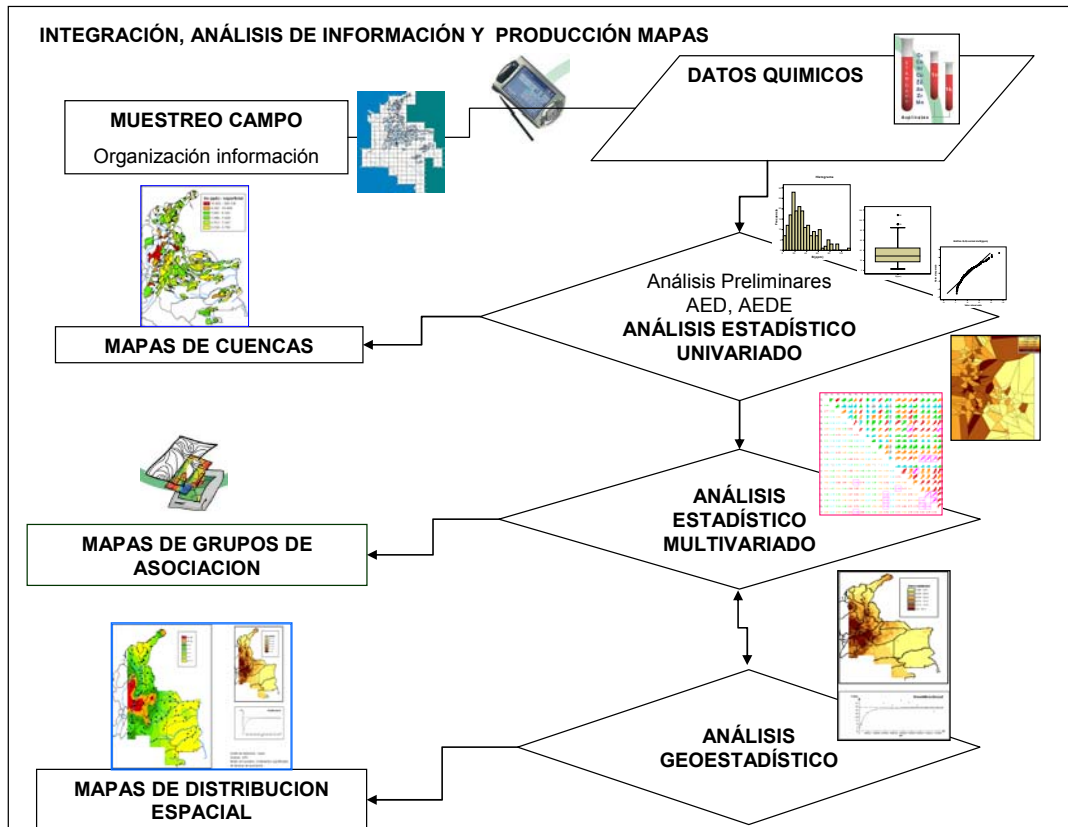


Figura 13. Esquema de integración, análisis de información y producción de mapas.

4.3.1. Análisis Preliminares

En primer lugar se realizó una revisión geodésica de las coordenadas de los puntos de muestreo, de acuerdo a los datos de los informes originales de campo. El parámetro de revisión es la determinación del datum de toma de coordenadas de cada uno de los GPS utilizados en la ubicación del punto de muestreo. Luego se procedió a la sistematización e ingreso de los datos a la base de datos de geoquímica Oracle-SDE, y a su verificación mediante la generación de reportes.

4.3.1.1 Revisión de coordenadas

Un datum puede ser definido como una serie de parámetros y puntos de control para determinar y definir con máxima precisión la forma de la tierra (Thurston et al., 2003). El propósito de unificar el datum de trabajo es el poder involucrar la forma de la tierra en los datos espaciales tanto de los puntos de muestreo geoquímico, como de la cartografía digital existente a través de un único datum. No todos los GPS despliegan los datos de latitud y longitud con la misma precisión y repetibilidad que se requiere en un estudio de este tipo, en el que se debe integrar la información de diferentes grupos de trabajo, en diferentes zonas de estudio. Además cuando los datos provenientes del GPS son integrados con la cartografía digital del IGAC, se presenta un desalineamiento ligero pero apreciable. La razón de esto, es que el mapa del IGAC se ha generado utilizando datos basados en el datum International de Hayford, que es diferente al datum utilizado en el GPS (generalmente el WGS84). El software GIS utilizado para realizar el cambio de datum fue ArcMap v. 8.1.

Como segundo paso, se transformaron las coordenadas a un sólo origen de coordenadas planas, el origen Bogotá. Debido a que se realizaron muestreos en una amplia zona del país, la cual comprende varios orígenes de coordenadas falsas, se utilizó el software GIS ArcMap v 8.1 para realizar los cambios entre ejes de coordenadas y preservar la calidad del dato de coordenadas. La **Tabla 10** muestra un ejemplo del resumen de los resultados de los dos procesos anteriores.

Tabla 10. Ejemplo de procesamiento de coordenadas y unificación de Datums

MUESTRA,C,00DLT,C,14	ALFREDO,C,1JAMERC,11	LATITUD,N,11,1	LONGITUD,N,11,2	ALTURA,N,11,3	NORIE,N,11,4	ESTIE,N,11,5	NORIEC,N,11,6	ESTIEC,N,11,7	NORIE1,N,11,8	ESTIE1,N,11,9
01	2101-2802-2801-2801-	4	-75	321	962173.39	907844.85	962173	907845	0.37	-0.11
02	2102-2801-2801-2801-	4	-75	450	972500.56	923632.94	972501	923660	-0.13	-27.49
03	2103-2803-2803-2803-	4	-75	314	961178.89	925877.05	961179	925877	0.23	0.08
04	2104-2115-2115-2115-	5	-75	302	994823.54	924600.21	994824	924600	-0.12	0.29
05	2105-2116-2116-2116-	5	-74	2580	994404.07	979941.23	994404	979941	0.42	0.11
06	2106-2114-2114-2114-	5	-75	290	1020903.79	916741.98	1020973	916742	30.9	0.3
07	2107-2113-2113-2113-	5	-75	295	1032549.41	916865.47	1032550	916866	-0.11	-0.05
09	2409-2102-2102-2102-	6	-74	1960	1134669.91	1041114.89	1134670	1041115	0.18	0.07
13	2313-2104-2104-2104-	6	-74	212	1128260.85	955527.25	1128261	955527	-0.05	0.07
14	2314-2103-2103-2103-	6	-74	196	1130592.25	956479.56	1130590	956480	12.7	0.02
16	2316-2106-2106-2106-	6	-75	191	1126892.07	927817.56	1126892	927818	0.32	-0.02
19	2319-1516-1516-1516-	6	-75	230	1159558.08	940957.06	1159558	940957	-0.02	-0.02
19DM	2319DM-1516DM-1516DM-	6	-75	230	1159530.76	940960.02	1159531	940963	0.01	-2.57
20	2320-1512-1512-1512-	6	-75	181	1178401.67	941556.64	1178401	941557	0.35	-0.23
21	2321-1511-1511-1511-	6	-75	190	1180732.67	952110.14	1180733	952110	0.07	0.01
23	2323-1515-1515-1515-	6	-74	216	1168688.6	996094.22	1168690	996095	-1.08	-0.79

4.3.1.2. Sistematización de datos geoquímicos

La información colectada en campo sobre características de los sitios de muestreo, muestras colectadas, perfil de sedimentación y documentación fotográfica, fue sistematizada y archivada en la base de datos de información geoquímica Oracle-SDE del Instituto. Los datos obtenidos en el

muestreo de UBD fueron procesados y analizados recogiendo experiencias, recomendaciones y estándares internacionales, con la asistencia técnica del IGGE de China y adicionalmente tomando como base metodologías adaptadas y/o generadas por el proyecto “Compilación y Levantamiento de Información Geoquímica del Territorio”, (XIE & Yin, 1993; Darnley et al, 1995; Reimann et al, 1998; SPSS versión 11.5; Geological Survey of China, 2001, Geosoft – Oasis, Chimera, versión 5.1.8).

4.3.2. Procesamiento de Datos Geoquímicos

En el procesamiento de datos de las muestras de sedimentos de planicie de inundación de UBD se parte de la hipótesis principal de que el análisis espacial es bidimensional (Yunchuan, X. 2001) dada la naturaleza del muestreo que se realizó, tanto para los datos de muestras superficiales como para muestras profundas.

Independientemente de la complejidad de los datos disponibles y del procedimiento estadístico que se utilice, una exploración minuciosa de los datos previa al inicio de cualquier análisis permite identificar, posibles errores, valores extremos (valores que se alejan demasiado del resto), patrones extraños en los datos (valores que se repiten demasiado), variabilidad no esperada (demasiados casos en una de las dos colas de la distribución, demasiada concentración en torno a un valor), entre otros.

Para estimar la forma de distribución de los datos y extraer patrones de distribución preliminares se realizaron análisis preliminares, análisis exploratorio de datos (AED) y análisis exploratorio de datos espaciales (AEDE). Como resultado de esta fase de análisis se obtuvieron estadísticas de medición central y de dispersión; así como patrones de distribución espacial. Se elaboraron mapas de isoconcentración de elementos químicos delimitados por cuencas, los cuales permiten observar el patrón aproximado de distribución de los elementos analizados.

Se estudió la distribución geográfica de los elementos químicos en el área muestreada para cada medio mediante la técnica geoestadística kriging que permite estimar la concentración del elemento analizado, a partir de la incidencia observada en unos pocos puntos estratégicamente distribuidos, en cualquier punto del territorio aunque en dicho punto no exista notificador. Se calculó el error de la estimación para los casos en donde fué posible y se generaron los mapas asociados y de distribución espacial por elemento o por asociación

4.3.2.1. Análisis Exploratorio de Datos (AEDE, AED)

El análisis exploratorio de datos se realizó en dos frentes: Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE) con las herramientas gráficas; y Análisis Exploratorio de Datos (AED), con las medidas de tendencia central.

- **Análisis Exploratorio de Datos (AED)**

El análisis exploratorio es de gran utilidad para tratar datos geoquímicos y además no requiere hacer presunciones que impliquen una distribución normal o gaussiana de los datos, permite apreciar fácilmente las características de cada grupo de datos y usa estadísticas robustas y gráficos muy simples, pero efectivos (Kurlz, 1988). Como parte del análisis se calcularon estadísticas de tendencia central (media, mediana), medidas de dispersión (varianza, desviación estándar) y medidas que indican la forma de la distribución de probabilidad (sesgo y curtosis). Adicionalmente

se construyeron diagramas de dispersión, diagramas Q-Q y P-P, diagramas de caja e histogramas, entre otros. La finalidad de estos diagramas es visualizar las características del conjunto de datos.

- **Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE)**

Mediante el análisis Exploratorio de datos espaciales (AEDE) es posible tener una idea más profunda del fenómeno en estudio, antes de tomar decisiones con base en los datos. El AEDE está diseñado para explorar tendencias espaciales, y algunas de las tareas necesarias en estas exploraciones son:

- ❖ Exploración de la distribución de los datos
- ❖ Determinación de “outliers” globales y locales
- ❖ Determinación de tendencias globales
- ❖ Examinación de la autocorrelación espacial
- ❖ Determinación de la covariación entre los datos superficiales y profundos

El análisis Exploratorio de datos espaciales (AEDE) para las muestras de sedimentos profundos y superficiales de llanuras de inundación se realizó con el software SPSS, para el análisis de histogramas, Q-Q normales, covariación y autocorrelación espacial. Para el cálculo de polígonos de Voronoi se utilizó el software ArcGIS, y para el cálculo de polígonos de Voronoi se utilizó el software ArcGIS, y para el cálculo de tendencias globales se graficaron los valores de concentración de cada elemento versus el valor de la coordenada en X (y luego en Y) para la determinación del polinomio de tendencia global.

4.3.2.2. Tratamiento estadístico multi-variado

Para el cálculo multivariado de estadísticas se realizaron correlaciones bivariadas, análisis de factores y conglomerados jerárquicos. Con los datos transformados a logaritmo (debido a que la mayoría de los datos presentan skewness positivos) se efectuaron cálculos de correlación entre los elementos en cada medio de muestreo superficial y profundo. Se calcularon correlaciones bivariadas y se ejecutaron análisis de factores y conglomerados jerárquicos. Las correlaciones se evaluaron con el método de Pearson. El análisis de factores se desarrolló usando componentes principales y rotación varimax. El análisis de conglomerados se usó como otra forma de encontrar relaciones entre elementos químicos en cada medio, para lo cual se utilizó el método de conglomerados jerárquicos intergrupos usando coeficientes de correlación para agrupar las variables (71 elementos químicos) en grupos y para la interpretación de éste análisis se usó el dendograma

4.3.2.3. Análisis Geoestadístico.

Para llevar a cabo los análisis geoestadísticos se dispuso del programa Geosoft. La elección del mismo se debe, primeramente, a que con él se pueden efectuar todas las fases de un estudio geoestadístico (análisis exploratorio de los datos, análisis estructural y estimaciones). Sin embargo por cuestiones de presentación los mapas se generaron con el software ArcGIS y los semivariogramas se realizaron con el software Variowin.

La distribución geográfica de los elementos químicos en el área muestreada para cada medio fue analizada mediante la técnica geoestadística kriging que permite estimar la concentración del elemento analizado, a partir de la incidencia observada en unos pocos puntos estratégicamente distribuidos, en cualquier punto del territorio aunque en dicho punto no exista notificador. En algunos casos no se pudo aplicar la técnica de estimación Kriging y se utilizaron métodos alternos tales como Interpolación Local Polinomial (LPI) o se aplicaron Funciones de Base Radial (RBF).

Para el cálculo de los elementos asociados se utilizó la técnica cokriging con hasta cuatro asociaciones. En ningún caso se aplicaron métodos de cálculo determinístico como IDW (Inverso a la Distancia).

Se calculó el error de la estimación para los casos en donde fué posible y se generaron los mapas asociados y de distribución espacial por elemento o por asociación.

4.3.2.4. Elaboración de mapas

La producción de mapas se adelantó siguiendo los estándares desarrollados por el proyecto “Compilación y Levantamiento de Información Geoquímica del Territorio”, y las recomendaciones del IGGE y de otros servicios geológicos participantes en el programa de mapeo geoquímico global.

Para la elaboración de mapas se utilizó el software Arc-info, Arc-Gis 8.3, y Autocad; así como las bases cartográficas del DANE, IGAC e INGEOMINAS.

El formato de presentación de los mapas se adaptó de los “Estándares para la Presentación del Atlas Geoquímico de Colombia en Formato Digital, Escala 1:500.000”.

4.3.2.4.1. Mapas de distribución por cuencas

Los mapas de concentración de elementos por cuencas representan una clasificación de los valores de concentración encontradas en las muestras en la zona de estudio. La clasificación se realizó con base en seis percentiles, los cuales son rangos de concentración que dividen el grupo de datos de acuerdo al porcentaje de casos en los que se presentan. Dependiendo del tipo de distribución (sesgamiento) se usaron los siguientes rangos:

- Rango 1: Del valor mínimo al percentil 25%
- Rango 2: Del percentil 25% + 1 hasta el percentil 50%
- Rango 3: Del percentil 50% + 1 hasta el percentil 75%
- Rango 4: Del percentil 75% + 1 hasta el percentil 90%
- Rango 5: Del percentil 90% + 1 hasta el percentil 95%
- Rango 6: Del percentil 95% + 1 hasta el valor máximo.

El valor se representa gráficamente en el mapa con el polígono de la cuenca de muestreo que está relleno con un color sólido que varía de acuerdo a una gama de colores que varía entre el amarillo (valores más bajos) y el verde (valores intermedios) hasta el rojo (valores más altos). Las tonalidades en valores RGB están definidas así:

- Rango 1: R=255 G=255 B=0
- Rango 2: R=170 G=255 B=0
- Rango 3: R=85 G=255 B=0
- Rango 4: R=76 G=230 B=0
- Rango 5: R=255 G=170 B=0
- Rango 6: R=255 G=0 B=0

Los mapas de concentración de elementos químicos por cuencas se realizaron utilizando el software ArcGis 8.3, y se presentan en mosaico diferenciando contenidos en el horizonte superficial (A_{0-25}) y contenidos en el horizonte más profundo (últimos 25 cm hasta 2m de profundidad).

En el **Anexo 5** se presentan los mapas de concentración de elementos por cuencas con datos de media, mediana, desviación estándar, histogramas y diagramas de caja, que muestran la distribución de los datos y los datos extremos, para cada elemento analizado.

4.3.2.4.2. Mapas de distribución espacial

Los mapas de distribución espacial se construyen a partir de los resultados de los análisis geoestadísticos de cada elemento en cada medio de muestreo. En cada plancha se presenta el mapa resultado del análisis geoestadístico para cada elemento en el horizonte superficial o en el horizonte profundo y se muestran los resultados principales del análisis geoestadístico: el semivariograma, el mapa del error de estimación y los datos analíticos del elemento analizado.

Los rangos para cada mapa de distribución pueden variar entre 6 clases y 7 clases. Las 7 clases se realizan para resaltar un patrón de distribución que sea peculiar e interesante. En este caso se agrega el nuevo rango con un color intermedio entre el naranja (rango 5) y el rojo (rango 7). El valor se representa gráficamente en el mapa con el polígono de la cuenca de muestreo que está relleno con un color sólido que varía de acuerdo a una gama de colores que varía entre el amarillo (valores más bajos) y el verde (valores intermedios) hasta el rojo (valores más altos). Las tonalidades en valores RGB están definidas así:

- Rango 1: R=255 G=255 B=0
- Rango 2: R=170 G=255 B=0
- Rango 3: R=85 G=255 B=0
- Rango 4: R=76 G=230 B=0

- Rango 5: R=255 G=170 B=0
- Rango 6: R=255 G=0 B=0

4.3.2.4.3. Mapas de asociaciones o factores de correlación entre elementos

Para el cálculo de los mapas de asociaciones se utilizó el método de Cokriging, con múltiples datasets (hasta 4) y la verificación preliminar de la correlación cruzada y de la autocorrelación entre elementos.

Los mapas de correlación de factores entre elementos se presentan con rangos de colores diferentes para diferenciarlos de los mapas de distribución espacial por elemento. Los mapas se realizaron de acuerdo a los resultados de los análisis multivariados y se muestran así:

- Mapa de asociación 1: Be – Dy – Eu – Ga
- Mapa de asociación 2: Gd – Nd – Sc- Sm
- Mapa de asociación 3: Al – Tl – Tb - Sm
- Mapa de asociación 4: B – Hf – Lu – Nb
- Mapa de asociación 5: Sn – Ti – Tm – U
- Mapa de asociación 6: Eu – Gd – Sm – Be
- Mapa de asociación 7: Sc – Ga – Tb
- Mapa de asociación 8: Hf – Zr – Nb – Sn
- Mapa de asociación 9: Na – Sr – Cl
- Mapa de asociación 10: Na – Hf
- Mapa de asociación 11: Bi – Cs – Pb – Th
- Mapa de asociación 12: Tb – V
- Mapa de asociación 13: Y – Zr
- Mapa de asociación 14: Zr – Si

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

En la primera Fase de muestreo de Ultra Baja Densidad (2001) se cubrió un área aproximada de 200.000 km², de las zonas central y norte de Colombia, áreas hidrográficas Magdalena - Cauca y Caribe. En la segunda fase (2003) se cubrieron aproximadamente 400.000 km² de la zona norte y oriente del país en las áreas hidrográficas Caribe, Orinoco y Amazonas.

Para facilitar el desplazamiento y cubrir la zona de estudio en el menor tiempo posible, se dividió el área en sub-zonas, que fueron cubiertas simultáneamente por varios grupos de muestreo: seis (6) grupos en la primera fase y ocho (8) grupos en la segunda fase.

En la Fase I (2001), la zona centro y norte del país fue dividida en seis sub-zonas en las cuales se muestrearon 104 cuencas. En la Fase II (2003), para completar el muestreo en el centro y el oriente del país, se consideraron 3 grandes regiones en donde se muestrearon 120 cuencas.

En cada cuenca seleccionada se colectaron sedimentos de planicie de inundación (floodplain, sobrebanca y algunos suelos aluviales): una muestra superficial (A₀₋₂₅), una muestra profunda (25 cm más profundos, hasta 200 cm) y una muestra para datación. Adicionalmente, se tomaron duplicados de muestra.

La localización de cada sitio de muestreo en las cuencas correspondientes se presenta en la **Figura 3**.

Para análisis químico se seleccionaron las cuencas más representativas de las áreas hidrográficas Magdalena - Cauca y Caribe y de la zona oriental de Colombia. Mediante convenio de cooperación bilateral entre la república de China y Colombia, el IGGE de China (Institute for Geophysical and Geochemical Exploration), efectuó análisis químico (2003 y 2004) para 71 elementos en 194 muestras superficiales A₀₋₂₅, 195 muestras profundas (25 cm más profundos, hasta 2 metros), 25 duplicados de muestras superficiales y 25 duplicados de muestras profundas.

5.1. MUESTRAS RECOLECTADAS

En la primera Fase, el muestreo fue adelantado durante el año 2001 y se recolectaron 104 muestras superficiales con 8 duplicados, 104 muestras profundas con 8 duplicados y 104 muestras para datación con 8 duplicados (104 cuencas).

En la segunda Fase, el muestreo fue adelantado durante el año 2003 y se recolectaron 120 muestras profundas con 23 duplicados, 120 muestras superficiales con 23 duplicados y 120 muestras para datación con 23 duplicados.

Con referencia a las celdas de 160 x160 km, de la red muestreo geoquímica global (GRN), con el muestreo adelantado en el centro, norte y oriente del país, en las Fases I y II de muestreo, se han cubierto 29 celdas que corresponden a un 50% del total de 57 pertenecientes al territorio colombiano.

En la **Tabla 11** se presenta el listado de las muestras recolectadas en la primera y segunda campaña de muestreo. En el **Anexo 1** se presentan los datos correspondientes a las muestras colectadas.

5.2. INFORMACIÓN DE CAMPO

Cada sitio y cada muestra recolectada fueron documentados con información de campo, contenida en el formato de “Captura de Información en Campo para Muestreo de Sedimentos de Planicie de Inundación”.

La información colectada en campo comprende datos sobre el sitio de muestreo (georeferenciación - coordenadas planas y geográficas, altitud, localización geopolítica, condiciones climáticas, zonas de vida, paisaje, vegetación, actividades antrópicas, usos del suelo, posibles fuentes de contaminación), datos sobre la cuenca muestreada (rasgos geomorfológicos, clima, unidades geológicas, ocurrencias minerales), datos sobre las muestras colectadas (características mineralógicas, texturales, humedad, mediciones radiométricas efectuadas), y perfil de sedimentación muestreado, con su respectiva descripción.

La información de campo, datos y fotografías, fue almacenada en una base de datos de Access y se integró a la base de datos geoquímicos de INGEOMINAS. Los formatos de campo originales junto con la documentación fotográfica de cada sitio y de las muestras, se presentan como anexos al presente informe (**Anexos 1 y 2**)

Los datos completos sobre cada sitio de muestreo y sobre las características de las muestras colectadas se han presentado en los informes de avance de muestreo y están archivadas en la base de datos geoquímicos de INGEOMINAS. y se presentan.

5.3. ANÁLISIS DE ELEMENTOS QUÍMICOS EN LABORATORIO

Para realizar análisis químico y con el fin de optimizar costos, se optó por seleccionar las cuencas que representaban el cubrimiento más homogéneo de la zona, evitando concentración de puntos de muestreo en unas regiones en detrimento de otras áreas que contaban con pocas muestras (ver Tabla 11). Adicionalmente se hizo necesario descartar cuencas muy pequeñas que ya estaban representadas regionalmente por cuencas mayores.

5.3.1. Análisis químico

De las muestras colectadas en las dos fases se seleccionaron 194 sitios de muestreo, cuyas muestras fueron sometidas a preparación primaria siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo de metodología (numeral 4) del presente informe y posteriormente fueron enviadas para análisis en los laboratorios de geoquímica del Institute for Geophysical and Geochemical exploration, IGGE de China.

Siguiendo metodologías estandarizadas (Ver **Tabla 8 y numeral 4**) por el IGGE, se determinaron contenidos totales de 71 elementos en 194 muestras superficiales A₀₋₂₅, 195 muestras profundas (25 cm más profundos, hasta 2 metros), 25 duplicados de muestras superficiales y 25 duplicados de muestras profundas. Los resultados obtenidos para los 71 elementos químicos en las 439 muestras de sedimentos de planicie de inundación que fueron analizadas, se presentan en el **Anexo 3**.

Las muestras que no fueron procesadas analíticamente en ésta etapa, fueron archivadas y podrán ser analizadas en el momento en que INGEOMINAS lo requiera.



Tabla 11. Muestras colectadas en las Fases I (2001) y II (2003) del muestreo de UBD

Muestreo 2002		'LTGeoperforaciones (LT- I Fase)				Muestreo 2003			'LTGeoperforaciones (LT- II Fase)		
Análisis 2003						Análisis 2004			Geominera (GM-II Fase)		
									Geoconsulta (GC-II Fase)		
Celda GRN	Muestra serie	Código Campo	Código Celda	Fase	Empresa	SFS	SFP	DAT	Coordenadas Geograficas		Rio/Cuenca
									Latitud	Longitud	
02	1	0201	0201	II	LT	X	X	X	12 21 47,98	-71 36 58,55	Ary. Parashiru
	2	0202	0202	II	LT	X	X	X	12 21 29,36	-71 26 47,03	Ary. Jorotuy
	3	0203	0203	II	LT	X	X	X	12 9 11,50	-71 54 0,095	Ary. Yuruapua
03	4	1580	0301	I	LT	X	X	X	11 17 44,6	-73 54 5,3	R. Piedras
	5	1581	0302	I	LT	X	X	X	11 15 18,2	-73 45 55,7	R. Buritaca
	6	1581DC	0302DC	I	LT	X	X	X	11 16 25,9	-73 51 53,3	R. Mendihuaca
	7	1582	0303	I	LT	X	X	X	11 14 47,8	-73 34 9,5	R. Palomino
	8	1579	0304	I	LT	X	X	X	11 13 58,6	-74 9 46,8	R. Manzanares
	9	2977	0305	I	LT	X	X	X	11 1 45,5	-74 12 15,6	R. Córdoba
	1D	2977DM	0305DM	I	LT	X	X	X	11 1 45,6	-74 12 15,3	R. Córdoba
	10	2972	0306	I	LT	X	X	X	11 1 2,6	-74 52 55,8	Ary. Grande
	2D	2972DM	0306DM	I	LT	X	X	X	11 1 2,6	-74 52 55,7	Ary. Grande
	11	2978	0307	I	LT	X	X	X	10 49 56,1	-74 14 28,7	R. Sevilla
	12	2975	0308	I	LT	X	X	X	10 34 38,1	-74 10 3,4	R. Aracataca
	3D	2975DC	0308DC	I	LT	X	X	X	10 42 45,5	-74 19 23,9	R. Aracataca
	13	2974	0309	I	LT	X	X	X	10 39 53	-74 13 28,3	R. Tucurínca
	14	2973	0310	I	LT	X	X	X	10 39 39,4	-74 47 58,5	Ary. Grande
	15	2976	0311	I	LT	X	X	X	10 29 1,6	-74 7 24,3	R. Fundación
04	16	1586	0401(I)	I	LT	X	X	X	11 30 42,01	-72 49 23,1	R. Ranchería
	17	0401(II)	0401(II)	II	LT	X	X	X	11 48 19,01	-72 20 40,33	Ary. Cutamahana/Chemarrain
	18	1587	0402(I)	I	LT	X	X	X	11 30 17,5	-72 51 32	Q. de Moreno
	19	0402(II)	0402(II)	II	LT	X	X	X	11 45 8,57	-72 27 24,00	Ary. Limón/Itú
	20	1585	0403	I	LT	X	X	X	11 24 44,82	-73 3 33,52	R. Camarones
	21	1584	0404	I	LT	X	X	X	11 17 43,4	-73 11 42,9	R. Tapias
	22	1583	0405	I	LT	X	X	X	11 15 19	-73 29 9,06	R. Ancho
	23	1588	0406	I	LT	X	X	X	10 55 48,6	-72 48 21,4	R. Ranchería
	24	1588DC	0406DC	I	LT	X	X	X	10 57 27,8	-72 46 38,1	Ary. La Quebrada
	25	2889	0407	I	LT	X	X	X	10 33 58,5	-73 7 33,5	R. Badillo
	26	0408	0408	II	LT	X	X	X	10 56 35,10	-72 43 42,07	R. Palomino
	4D	0408DM	0408DM	II	LT	X	X	X	10 56 35,10	-72 43 42,07	R. Palomino
05	27	0501	0501	II	LT	X	X	X	11 50 17,85	-71 24 0,370	R. Sillimahana
	28	0502	0502	II	LT	X	X	X	11 39 55,78	-71 52 40,03	R. Cashushi
06	29	2969	0601	I	LT	X	X	X	10 17 12,5	-75 0 49	Ary. Grande
07	30	2970	0701	I	LT	X	X	X	10 12 48,2	-74 43 41,79	Q. Zapayán
	31	2871	0702	I	LT	X	X	X	10 5 9,42	-74 0 44,69	Ary. Mallorquín
	32	2592	0703	I	LT	X	X	X	10 4 47,7	-73 31 25,3	R. Arenoso
	33	2893	0704	I	LT	X	X	X	9 58 22,9	-73 35 48,3	R. Garupal
	34	2968	0705	I	LT	X	X	X	9 52 49,4	-74 53 13,3	Ary. Grande
	35	2898	0706	I	LT	X	X	X	9 50 56,3	-73 38 34,5	R. Garupal
	36	2895	0707	I	LT	X	X	X	9 48 2,5	-73 34 40,4	R. Fernambuco
	37	2967	0708	I	LT	X	X	X	9 46 36,2	-74 52 5,9	Ary. Alferez
	38	2896	0709	I	LT	X	X	X	9 45 3,8	-73 34 47,6	R. Casacara
	39	2966	0710	I	LT	X	X	X	9 40 27,3	-74 52 2,7	Ary. Mancomoján
	40	2897	0711	I	LT	X	X	X	9 38 18,3	-73 38 0,4	R. Calenturitas
	5D	2897DM	0711DM	I	LT	X	X	X	9 38 18,3	-73 38 0,4	R. Calanturitas
	41	2800	0712	I	LT	X	X	X	9 37 34,4	-73 45 50,1	R. Ariguani
	42	2599	0713	I	LT	X	X	X	9 32 8,3	-73 47 49,2	R. Cesar
	43	2565	0714	I	LT	X	X	X	9 28 23,5	-74 32 41,3	Q. Chimuica
	44	2564	0715	I	LT	X	X	X	9 24 13,6	-74 29 57,1	Q. Corozal
	45	2563	0716	I	LT	X	X	X	9 20 35,2	-74 23 6,7	Q. Culebra
	46	2550	0717	I	LT	X	X	X	9 13 10,1	-73 35 19,5	Q. Animito
	47	2555	0718	I	LT	X	X	X	9 2 59,7	-74 45 25,9	R. San Jorge (Magangué)
	48	2552	0719	I	LT	X	X	X	9 1 5,3	-74 39 12,1	C. El Roble
08	49	2890	0801	I	LT	X	X	X	10 27 42	-73 13 24,1	R. Guatapurí
	50	2891	0802	I	LT	X	X	X	10 20 32,9	-73 10 8,1	R. Chiriamo
	51	2694/2894	0803	I	LT	X	X	X	10 6 4,9	-73 23 20,7	R. Majiriamo
	52	0805	0805	II	LT	X	X	X	9 22 6,602	-73 28 36,02	R. Anime Grande
	53	0806	0806	II	LT	X	X	X	9 41 39,25	-73 27 39,08	R. Maracas
	6D	0806DM	0806DM	II	LT	X	X	X	9 41 39,25	-73 27 39,08	R. Maracas
	54	0807	0807	II	LT	X	X	X	10 11 9,14	-73 19 21,70	R. Tocaimo



Tabla 11. Muestras colectadas en las Fases I (2001) y II (2003) del muestreo de UBD (continuación).

Celda GRN	Muestra serie	Código Campo	Código Celda	Fase	Empresa	SFS	SFP	DAT	Coordenadas Geográficas		Rio/Cuenca
									Latitud	Longitud	
10	55	2560	1001	I	LT	X	X	X	8 18 21,9	-75 15 10,5	R. San Jorge (Ayapel)
	56	2561	1002	I	LT	X	X	X	7 55 20,3	-75 14 56,31	R. Man
	57	2662	1003	I	LT	X	X	X	7 44 14,3	-75 15 28,3	R. Tamaaná
	7D	2662DM	1003DM	I	LT	X	X	X	7 44 14,3	-75 15 28,3	R. Tamaaná
11	58	2551	1101	I	LT	X	X	X	8 54 47,5	-74 27 17,6	R. San Martín de Loba
	59	2549	1102	I	LT	X	X	X	8 51 56,4	-73 59 51,4	Q. Grande
	60	2548	1103	I	LT	X	X	X	8 50 27,2	-73 45 3,4	Q. La Floresta
	61	2553	1104	I	LT	X	X	X	8 42 47,5	-74 31 9,4	R. Cauca (Achi)
	62	2544	1105	I	LT	X	X	X	8 37 19,1	-73 43 34,5	Q. Simaña
	63	2347	1106	I	LT	X	X	X	8 36 15,6	-73 54 23,5	Q. La Oscura
	64	2546	1107	I	LT	X	X	X	8 26 57,9	-73 39 48,5	Q. Caimán
	65	2545	1108	I	LT	X	X	X	8 21 10,1	-73 55 15,7	Q. La Honda
	66	2554	1109	I	LT	X	X	X	8 19 33,7	-74 31 47,4	R. Caribona
	67	2343	1110	I	LT	X	X	X	8 14 6,7	-73 42 40,9	Q. Buturama
	68	2341	1111	I	LT	X	X	X	8 9 56,9	-73 55 11,9	Q. Orotia
	69	2342	1112	I	LT	X	X	X	8 8 3,3	-73 44 42,3	Q. Guaduas
	70	2559	1113	I	LT	X	X	X	8 2 52,3	-74 51 36,4	R. Cauca (Colorado)
8D	2559DC	1113DC	I	LT	X	X	X	8 1 55,9	-74 57 49	R. Cauca (Margento)	
71	2756	1114	I	LT	X	X	X	8 1 20,9	-74 47 27,1	R. Nechi	
72	2338	1115	I	LT	X	X	X	8 1 26,4	-73 56 57,6	R. El Juncal	
73	2339	1116	I	LT	X	X	X	8 1 8,5	-73 43 48,4	R. Lebrija (Aguachica)	
74	2340	1117	I	LT	X	X	X	7 55 28,7	-73 37 40,7	Q. Torcoroma	
9D	2340DM	1117DM	I	LT	X	X	X	7 55 28,4	-73 37 40,6	Q. Torcoroma	
75	2337	1118	I	LT	X	X	X	7 53 8,5	-73 57 18	R. Boque	
76	2335	1119	I	LT	X	X	X	7 40 37,9	-73 56 14,7	R. Sto Domingo	
77	2336	1120	I	LT	X	X	X	7 40 28,1	-73 42 27,2	R. Lebrija (Rionegro)	
78	2758	1121	I	LT	X	X	X	7 33 23,4	-74 48 13,7	R. Tigüí	
12	79	1201	1201	II	LT	X	X	X	8 36 56,07	-73 10 56,51	R. Catatumbo
	80	1202	1202	II	LT	X	X	X	8 38 20,18	-73 3 15,21	R. Tarra
	81	1203	1203	II	LT	X	X	X	8 35 52,53	-72 39 56,54	R. Nuevo Presidente
	10D	1203DM	1203DM	II	LT	X	X	X	8 35 52,53	-72 39 56,54	R. Nuevo Presidente
	82	1204	1204	II	LT	X	X	X	8 21 43,87	-72 35 15,15	R. San Miguel
	11D	1204DM	1204DM	II	LT	X	X	X	8 21 43,87	-72 35 15,15	R. San Miguel
	83	1205	1205	II	LT	X	X	X	8 18 48,12	-72 27 4,132	Zulia
	84	1206	1206	II	LT	X	X	X	8 4 44,73	-72 48 24,32	R. Riecito
	85	1207	1207	II	LT	X	X	X	7 54 30,35	-72 38 24,91	R. Paralonso
86	1208	1208	II	LT	X	X	X	7 50 33,87	-72 38 35,06	R. Zulia (12km Salazar)	
87	1209	1209	II	LT	X	X	X	7 34 38,48	-73 19 31,35	R. Cachira del Esp. Santo	
15	88	2757	1501	I	LT	X	X	X	7 26 16,8	-74 54 22,6	R. Porce
	89	2333	1502	I	LT	X	X	X	7 17 30,13	-74 0 31,9	R. Yanacué
	90	2432	1503	I	LT	X	X	X	7 14 12,8	-73 44 31,9	R. Sogamoso (San Pablo)
	91	2334	1504	I	LT	X	X	X	7 6 29,28	-74 6 18,53	R. Cimitarra
	92	2431	1505	I	LT	X	X	X	7 4 2,2	-73 45 19,9	Q. Vizcaíno
	93	2330	1506	I	LT	X	X	X	6 56 18	-73 51 9,4	R. La Colorada
	94	2329	1507	I	LT	X	X	X	6 49 47,7	-73 56 31,01	R. Opón
	95	2328	1508	I	LT	X	X	X	6 43 16	-74 24 39,7	R. San Bartolomé
	96	2327	1509	I	LT	X	X	X	6 41 25,9	-74 9 52,2	R. San Juan
	97	2326	1510	I	LT	X	X	X	6 39 33,4	-74 5 49,9	R. Carare (Pto Parra)
	98	2321	1511	I	LT	X	X	X	6 13 59,5	-74 30 49,1	R. Ermitaño
	99	2320	1512	I	LT	X	X	X	6 12 43,3	-74 36 32,3	R. Nare
	100	2322	1513	I	LT	X	X	X	6 12 32,4	-74 45 36	R. Samaná Norte
	101	2324	1514	I	LT	X	X	X	6 9 31,1	-74 5 1,8	R. Horta
	102	2323	1515	I	LT	X	X	X	6 7 28,1	-74 6 58,3	R. Minero
	103	2319	1516	I	LT	X	X	X	6 2 29,9	-74 36 51,2	R. Cocorná
12D	2319DM	1516DM	I	LT	X	X	X	6 2 29,01	-74 36 51,02	R. Cocorná	
104	2425	1517	I	LT	X	X	X	6 0 23,5	-73 35 24,7	R. Suarez (Guepsa)	
16	105	1601	1601	II	LT	X	X	X	7 23 11,09	-73 16 32,68	R. Cachirí
	106	1602	1602	II	LT	X	X	X	7 16 24,95	-72 29 4,836	R. Chitagá
	107	1603	1603	II	LT	X	X	X	7 10 39,64	-72 27 17,94	R. Valegrá
	13D	1603DM	1603DM	II	LT	X	X	X	7 10 39,64	-72 27 17,94	R. Valegrá
	108	1604	1604	II	LT	X	X	X	7 10 28,35	-73 5 16,48	R. Suratá
	109	1605	1605	II	LT	X	X	X	7 2 55,90	-73 10 18,51	R. De Oro
	110	1606	1606	II	LT	X	X	X	7 2 40,23	-73 22 18,28	R. Chucurí
	111	1609	1609	II	LT	X	X	X	6 30 25,24	-73 7 45,99	R. Fonce
	112	1610	1610	II	LT	X	X	X	6 26 34,90	-72 39 40,24	R. Nevado
	113	1611	1611	II	LT	X	X	X	6 15 34,31	-73 19 21,51	R. Obita

Tabla 11. Muestras colectadas en las Fases I (2001) y II (2003) del muestreo de UBD (continuación).

Celda GRN	Muestra serie	Código Campo	Código Celda	Fase	Empresa	SFS	SFP	DAT	Coordenadas Geográficas		Rio/Cuenca
									Latitud	Longitud	
17	114	1703	1703	II	GM	X	X	X	6 45 10.1	-70 24 47.1	C. Aguailinda
	115	1704	1704	II	GM	X	X	X	6 30 34	-70 44 46.7	R. Cravo Norte (Cuiloto)
	116	1705	1705	II	GM	X	X	X	6 34 50.8	-70 42 59.9	R. Elle
	117	1707	1707	II	LT	X	X	X	6 15 35.11	-71 39 23.48	R. Tocaragua
	14D	1707DM	1707DM	II	LT	X	X	X	6 15 35.11	-71 39 23.48	R. Tocaragua
	118	1708	1708	II	GM	X	X	X	6 10 15.2	-70 40 21	C. Samuco
	119	1709	1709	II	GM	X	X	X	6 5 48.2	-70 49 27.7	R. Chire
	120	1709b	1709b	II	GM	X	X	X	6 3 0.8	-71 19 0.6	R. Chire Viejo
18	121	1801	1801	II	GM	X	X	X	6 18 4.3	-70 9 1.7	C. Samuco
	122	1802	1802	II	GM	X	X	X	6 7 52.9	-70 8 50.1	C. Las Vacas
18BIS	123	18BIS01	18BIS01	II	GM	X	X	X	6 6 7.7	-68 11 56.9	C. Juripe
	124	18BIS02	18BIS02	II	GM	X	X	X	6 2 20.1	-67 40 53.4	C. Negro
21	125	2101	2101	II	LT	X	X	X	5 57 9.90	-73 33 50.18	R. Ubaza
	126	2409	2102	I	LT	X	X	X	5 49 0.2	-73 42 34.9	R. Suarez (Puente Nacional)
	127	2409DC	2102DC	I	LT	X	X	X	5 48 20.3	-73 42 20.8	R. Quebrada Otero
	128	2314	2103(I)	I	LT	X	X	X	5 46 47	-74 28 25.8	R. Guaguaquí
	129	2103(II)	2103(II)	II	LT	X	X	X	5 55 9.53	-73 35 47.13	R. Moniquirá
	130	2313	2104	I	LT	X	X	X	5 45 31.5	-74 28 56.7	R. Negro (Salgar)
	131	2315	2105	I	LT	X	X	X	5 45 36.5	-74 35 54.4	R. Negro (Pto Boyacá)
	132	2316	2106	I	LT	X	X	X	5 44 46.1	-74 43 57.2	R. Samaná Sur
	133	2318	2107	I	LT	X	X	X	5 42 8.9	-74 45 24	R. Samaná Sur
	134	2317	2108	I	LT	X	X	X	5 38 34.3	-74 47 14.6	R. La Miel
	135	2317DC	2108DC	I	LT	X	X	X	5 39 38.5	-74 46 49.6	R. Manso
	136	2312	2109	I	LT	X	X	X	5 29 8.2	-74 42 45	R. Doña Juana
	137	2311	2110	I	LT	X	X	X	5 19 2.8	-74 50 41.3	R. Guarín
	138	2310	2111	I	LT	X	X	X	5 14 48.7	-74 48 55.5	R. Guail
	139	2108	2112	I	LT	X	X	X	5 3 2.3	-74 45 25	R. Sabandija
	140	2107	2113	I	LT	X	X	X	4 53 34.7	-74 49 49.4	R. Lagunilla
	141	2106	2114	I	LT	X	X	X	4 47 15.6	-74 49 53	R. Recio
	142	2104	2115	I	LT	X	X	X	4 33 6.9	-74 45 37.2	R. Seco
	143	2105	2116	I	LT	X	X	X	4 32 54.3	-74 15 42	R. Bogotá (Sibaté)
22	144	2201	2201	II	LT	X	X	X	5 45 17.96	-72 56 12.78	R. Chicamocha
	15D	2201DM	2201DM	II	LT	X	X	X	5 45 17.96	-72 56 12.78	R. Chicamocha
	145	2202	2202	II	LT	X	X	X	5 18 58.60	-72 5 45.16	R. Tocaria
	146	2203	2203	II	LT	X	X	X	5 17 39.74	-72 8 20.43	R. Cravo Sur
	147	2204	2204	II	LT	X	X	X	4 53 6.998	-73 2 39.95	Upia
	148	2205	2205	II	LT	X	X	X	4 49 57.89	-73 7 36.39	Lengua
	149	2206	2206	II	LT	X	X	X	4 47 4.892	-72 15 30.11	R. Cusiana
	150	2207	2207	II	LT	X	X	X	4 45 8.015	-73 18 31.54	R. Garagoa
	151	2208	2208	II	LT	X	X	X	4 46 54.63	-72 12 20.85	R. Charate
	152	2209	2209	II	LT	X	X	X	4 32 33.08	-72 45 0.186	R. Tua
23	153	2301	2301	II	GM	X	X	X	5 58 43.2	-71 20 47.4	R. Muese
	16D	2301DM	2301DM	II	GM	X	X	X	5 58 43.2	-71 20 47.4	R. Muese
	154	2302	2302	II	GM	X	X	X	5 38 40.1	-70 39 27.2	C. La Hermosa
	155	2303	2303	II	GM	X	X	X	5 27 2.1	-70 43 45.3	R. Guachiría
	17D	2303DM	2303DM	II	GM	X	X	X	5 27 2.1	-70 43 45.3	R. Guachiría
	156	2304	2304	II	GM	X	X	X	5 18 18.8	-70 52 36.6	R. Yatea
	157	2305	2305	II	GM	X	X	X	5 10 7.2	-70 55 36.5	R. Pauto
	18D	2305DM	2305DM	II	GM	X	X	X	5 10 7.2	-70 55 36.5	R. Pauto
	158	2306	2306	II	GM	X	X	X	4 53 58.7	-71 9 11.9	C. Duya
	159	2307	2307	II	GM	X	X	X	4 41 9.4	-71 37 14.4	C. Maremare (Moral)
	160	2308	2308	II	GM	X	X	X	4 38 27.3	-71 44 16	C. Surimena (Matepiña)
24	161	2401	2401	II	GM	X	X	X	6 1 41.8	-69 52 13.3	R. Aguaclara (C. Mochuelo)
	162	2402	2402	II	GM	X	X	X	5 47 55.8	-69 20 36.5	R. Vita (C. Pendare)
	163	2403	2403	II	GM	X	X	X	5 40 1	-70 13 23.6	C. Picapico (La Fortaleza)
	164	2404	2404	II	GM	X	X	X	5 16 31.9	-70 5 14.6	C. Gavilán (Elvita)
	19D	2404DM	2404DM	II	GM	X	X	X	5 16 31.9	-70 5 14.6	C. Gavilán (Elvita)
	165	2404A	2404A	II	GM	X	X	X	5 20 17.9	-70 5 37.6	C. Veredita (Guarima)
	166	2405	2405	II	GM	X	X	X	4 53 49.2	-70 11 23	R. Tomo
	167	2406	2406	II	GM	X	X	X	4 53 3.7	-69 51 11.7	C. Beberí
	168	2407	2407	II	GM	X	X	X	4 45 2.2	-69 1 27.2	R. Tuparro
	169	2408	2408	II	GM	X	X	X	4 42 4.7	-69 10 16.9	C. Arreita
25	170	2501	2501	II	GM	X	X	X	6 7 43.6	-68 51 58.5	C. Muco
	20D	2501DM	2501DM	II	GM	X	X	X	6 7 43.6	-68 51 58.5	C. Muco
	171	2502	2502	II	GM	X	X	X	5 45 38.3	-67 40 18.8	C. Dagua
	172	2503	2503	II	GM	X	X	X	5 37 18.2	-67 40 48	C. Mesetas
	173	2504	2504	II	GM	X	X	X	5 35 2.5	-68 31 22.2	C. Terecay
	174	2508	2508	II	GM	X	X	X	4 33 10	-69 0 50.2	C. Laribá



Tabla 11. Muestras colectadas en las Fases I (2001) y II (2003) del muestreo de UBD (continuación).

Celda GRN	Muestra serie	Código Campo	Código Celda	Fase	Empresa	SFS	SFP	DAT	Coordenadas Geográficas		Rio/Cuenca	
									Latitud	Longitud		
27	175	2704	2704	II	GM	X	X	X	3 58 22.7	-75 5 59	R. Cucuana	
	21D	2704DM	2704DM	II	GM	X	X	X	3 58 22.7	-75 5 59	R. Cucuana	
	176	2705	2705	II	GM	X	X	X	3 41 34.4	-75 18 18.1	R. Saldaña	
	177	2707	2707	II	GM	X	X	X	3 24 48.7	-75 12 21.2	R. Patá	
	178	2708	2708	II	GM	X	X	X	3 15 59	-75 15 22.5	R. Aipe	
28	179	2102	2801(LT)	I	LT	X	X	X	4 21 0.2	-74 46 7	R. Bogotá (Ricaurte)	
	180	2801(GM)	2801(GM)	II	GM	X	X	X	3 52 4.6	-73 32 20.9	R. Orotoy	
	181	2101	2802(LT)	I	LT	X	X	X	4 15 23.5	-74 54 39.5	R. Coello	
	182	2802(GM)	2802(GM)	II	GM	X	X	X	3 48 18.3	-73 33 24.5	R. Guamal	
	183	2103	2803	I	LT	X	X	X	4 14 51.7	-74 44 54.8	R. Sumapaz	
	184	2804	2804	II	GM	X	X	X	3 30 19.1	-73 51 19	R. Guapé	
	185	2805	2805	II	GM	X	X	X	3 26 24.1	-73 40 18.3	C. Urichara	
	186	2806	2806	II	GM	X	X	X	3 46 15.3	-74 55 32.5	R. Prado	
	187	2808	2808	II	GM	X	X	X	3 17 8.2	-74 58 40.8	R. Cabrera	
	22D	2808DM	2808DM	II	GM	X	X	X	3 17 8.2	-74 58 40.8	R. Cabrera	
	29	188	2901	2901	II	LT	X	X	X	4 20 15.35	-72 10 25.69	C. Emma
189		2902	2902	II	LT	X	X	X	4 19 53.25	-72 10 1.112	R. Yucao	
190		2903	2903	II	GM	X	X	X	4 10 22.7	-73 1 37.5	R. Humea	
191		2904	2904	II	GM	X	X	X	4 10 32.2	-73 6 24.5	R. Guatiquía	
23D		2904DM	2904DM	II	GM	X	X	X	4 10 32.2	-73 6 24.5	R. Guatiquía	
192		2905	2905	II	GM	X	X	X	3 57 20.5	-73 16 19.2	R. Guayuriba	
193		2906	2906	II	GM	X	X	X	3 42 16.4	-73 22 3.8	R. Humadea	
24D		2906DM	2906DM	II	GM	X	X	X	3 42 16.4	-73 22 3.8	R. Humadea	
194		2907(G)	2907(G)	II	GM	X	X	X	3 19 40.8	-73 25 38.1	C. Iraca	
195		2907(LT)	2907(LT)	II	LT	X	X	X	4 24 53.04	-72 18 56.72	R. Guira	
196		2908	2908	II	LT	X	X	X	4 8 46.49	-72 57 50.71	R. Negro	
197		3001	3001	II	GM	X	X	X	4 30 39.3	-71 34 43.4	R. Muco	
198		3002	3002	II	GM	X	X	X	4 17 8.5	-71 5 55.6	R. Guarrojo	
199		3003	3003	II	GM	X	X	X	4 1 6.5	-71 16 40.8	R. Planas	
30	200	3004	3004	II	GM	X	X	X	3 48 17	-71 23 43	C. Rubiales	
	25D	3004DM	3004DM	II	GM	X	X	X	3 48 17	-71 23 43	C. Rubiales	
	201	3005	3005	II	GM	X	X	X	3 41 16	-71 25 55	R. Tillabá	
	26D	3005DM	3005DM	II	GM	X	X	X	3 41 16	-71 25 55	R. Tillabá	
	202	3101	3101	II	GM	X	X	X	4 26 7.5	-70 12 51.5	R. Guacamayas	
	203	3102	3102	II	GM	X	X	X	4 24 7.5	-69 18 50.3	C. Tume	
	204	3110	3110	II	GC	X	X	X	3 16 33.63	-68 52 33.16	C. Bocón	
	205	3110A	3110A	II	GC	X	X	X	3 19 44.97	-68 49 38.13	C. Cuica	
	32	206	3203	3203	II	GC	X	X	X	3 50 02	-67 58 05	C. Canubén
		207	3204	3204	II	GC	X	X	X	3 32 26.66	-68 30 57.34	C. Suarez
208		3205	3205	II	GC	X	X	X	3 25 30.53	-68 4 30.36	C. San Joaquín	
209		3206	3206	II	GC	X	X	X	3 11 53.73	-68 15 28.36	C. Piapoco	
210		3208	3208	II	GC	X	X	X	3 1 13.29	-68 22 32.37	C. Nabuquén	
27D		3208DM	3208DM	II	GC	X	X	X	3 1 13.29	-68 22 32.37	C. Nabuquén	
211		3209	3209	II	GC	X	X	X	3 41 45.6	-67 33 46.11	C. Chaquita	
37	212	3701	3701	II	GM	X	X	X	2 52 27	-72 11 33	C. Ovejas (C. El muerto)	
	28D	3701DM	3701DM	II	GM	X	X	X	2 52 27	-72 11 33	C. Ovejas (C. El muerto)	
	213	3702	3702	II	GM	X	X	X	2 44 35	-72 26 22	C. Melón (El Agrado)	
	29D	3702DM	3702DM	II	GM	X	X	X	2 44 35	-72 26 22	C. Melón (El Agrado)	
39	214	3901	3901	II	GC	X	X	X	2 43 45.94	-69 9 53.24	C. Minas	
	215	3907	3907	II	GC	X	X	X	1 47 5.027	-69 32 51.14	Q. Arara	
	30D	3907DM	3907DM	II	GC	X	X	X	1 47 5.027	-69 32 51.14	Q. Arara	
	216	3908	3908	II	GC	X	X	X	1 43 11.71	-69 52 25.1	R. Isana	
	217	3909	3909	II	GC	X	X	X	1 42 44.6	-69 52 28.92	R. Surubí	
	218	3910	3910	II	GC	X	X	X	1 17 1.42	-70 13 58.83	R. Querary	
40	219	4001	4001	II	GC	X	X	X	2 58 46.45	-68 53 7.944	C. Wifía	
	48	4801A	4801A	II	GC	X	X	X	1 29 45.34	-70 12 1	R. Pirabotón (1kmQuerary)	
48	221	4802	4802	II	GC	X	X	X	1 29 15.1	-70 12 4.427	C. Cuduyarí	
	222	4803	4803	II	GC	X	X	X	0 43 47.92	-69 29 52.44	R. Macú	
	31D	4803DM	4803DM	II	GC	X	X	X	0 43 47.92	-69 29 52.44	R. Macú	
	223	4804	4804	II	GC	X	X	X	0 40 9.4	-69 41 26.34	R. Cuyucuyú	
	224	4805	4805	II	GC	X	X	X	0 34 11.17	-70 4 8.86	R. Papurí Alto	

R = río, Ary = arroyo, Q = quebrada, C = caño

5.3.2. Datación por ^{14}C

Como complemento de la documentación de las muestras de sedimentos de planicie de inundación y para tener idea acerca de la evolución y edad del perfil de sedimentación de donde se colectaron las muestras y por tanto el aporte de la cuenca de drenaje muestreada, se colectaron muestras para datación con carbono-14 (^{14}C).

Del total de muestras colectadas se seleccionaron 20 cuencas (**Tabla 12**) en donde alguna de sus muestras (superficial, profunda o para datación) presentaban alto contenido de carbono orgánico total (>1%), la cuál es condición necesaria para efectuar la datación por ^{14}C . Los resultados de datación efectuada en los laboratorios de la Subdirección de Ensayos y Servicios Tecnológicos de INGEOMINAS (Laboratorio de Geología - ^{14}C), siguiendo estándares metodológicos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) se presentan en la **Tabla 13**.

- De las muestras 2801SFS, 2801DAT, 0301DAT, y 2105DAT, no se obtuvo la cantidad suficiente de gas CO_2 (primera etapa del proceso de síntesis) para continuar el proceso de datación.
- Las muestras 2801SFS y 2801DAT presentaron bastante efervescencia durante su pre-tratamiento ácido lo que muestra que el % de carbono se debió más a presencia de carbonatos y bicarbonatos que a materia orgánica.
- Las muestras 1504SFS y 2105SFS requirieron ser procesadas en su primera etapa (combustión) dos veces para obtener la cantidad suficiente de gas CO_2 y poder continuar el proceso.

5.4. CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS

Se realizó control de calidad de la información, mediante verificación de ubicación (revisión de coordenadas - Datums) y codificación de cada muestra, chequeo de valores de concentración versus límite de detección, evaluación de datos perdidos y datos extremos -“outliers” y evaluación de duplicados (Ver numeral 5.5).

La calidad de los análisis químicos efectuados se controló mediante el uso de patrones certificados primarios y secundarios (exactitud), efectuando análisis duplicados (precisión) (**Tabla 9**); y re-analizando muestras con muy altos o muy bajos contenidos de un elemento hasta seleccionar el mejor método de cuantificación. Todo lo anterior como parte del programa de control de calidad establecido por el laboratorio de geoquímica aplicada del IGGE de China (China Geological Survey, 2001). La calidad analítica de las dataciones con ^{14}C efectuadas fue controlada con duplicados y patrones certificados, siguiendo los protocolos del laboratorio de Geología - ^{14}C del INGEOMINAS de acuerdo con los estándares del OIEA

A partir de los resultados obtenidos con patrones certificados y con los duplicados, se evaluó la calidad analítica haciendo uso del software Geosoft-Oasis- Módulo Chimera, Control de Calidad Analítica (versión 5.1.8).

En el **Anexo 3** se presentan los resultados de los análisis químicos para 71 elementos para los estándares o patrones certificados de referencia y para los duplicados.

Tabla 12. Muestras seleccionadas para datación con ^{14}C .

Código campo	Código celda	C(%), LD 0.05 INGEOMINAS	C (%) LD 0.1 IGGE-China	C Org (%) LD 0.1 IGGE-China	Río/Quebrada
2102 SFS	2801	1,79	1,45	0,77	R. Bogotá
2102 DAT	2801	1,34			R. Bogotá
2101 SFS	2802	0,14	0,66	0,24	R. Coello
2101 DAT	2802	0,19			R. Coello
1588 SFS	0406	0,67	0,54	0,41	R. Ranchería
1588 DAT	0406	1,04			R. Ranchería
2897 SFS	0711	1,64	1,52	1,27	R. Calenturitas
2897 DAT	0711	2,13			R. Calenturitas
1580 SFS	0301	0,07			R. Piedras
1580 DAT	0301	1,45			R. Piedras
2972 SFS	0306	0,16			Arroyo Grande
2972 DAT	0306	< LD			Arroyo Grande
2893 SFS	0704	0,21			R. Garupal
2893 DAT	0704	< LD			Río Garupal
2967 DAT	0708	1,18	1,94S/1,80P	1,53S/0,21P	Arroyo Alferez
2599 SFS	0714	0,45	0,65	0,29	R. Cesar
2599 DAT	0714	0,09			R. Cesar
2559 SFS	1113	1,32			R. Cauca
2559 DAT	1113	0,06			R. Cauca
2555 SFS	0718	0,51	0,73	0,63	R. San Jorge
2555 DAT	0718	0,26			Río San Jorge
2756 SFS	1114	0,54	0,91P	0,66P	R. Nechi
2756 DAT	1114	0,26			R. Nechi
2337 SFS	1118	0,05	1,98	1,78	R. Boque
2337 DAT	1118	0,67			R. Boque
2340 SFS	1117	0,78			Q. Torcoroma
2340 DAT	1117	0,39			Q. Torcoroma
2334 SFS	1504	1,95	1,01	0,92	R. Cimitarra
2334 DAT	1504	0,78			R. Cimitarra
2326 SFS	1510	1,50			R. Carare
2326 DAT	1510	0,80			R. Carare
2319 SFS	1516	1,40	1,26	0,98	R. Cocorna
2319 DAT	1516	0,80			R. Cocorna
2315 SFS	2105	2,06			R. Negro
2315 DAT	2105	1,23			R. Negro
2106 SFS	2114	1,76	2,37	1,64	R. Recio
2106 DAT	2114	1,64			R. Recio
1580 DAT	301	1,45			R. Piedras

R = Río Q = Quebrada

Tabla 13. Resultados de datación con ^{14}C .

Muestra	Muestra Recibida (g)	Muestra Sintetizada (g)	Síntesis C_6H_6	Lab #	Wat #	Factor Dilución	d.p.m.	Datación Años BP	C.M. (%)
0711SFS	333,26	259,16	-	-	-	-	-	-	-
2801DAT	462,93	344,76	-	15	-	-	-	-	-
0711DAT	248,6	205,8	1,3163	14	9	0,499	435,5	7650 +/-280	38,59 +/-1,63
0301DAT	370,43	300	*	25	-	-	-	-	-
1504SFS	421,06	350	1,8648	22/23	16	0,704	498	8700 +/-230	33,84 +/-0,98
1510SFS	-	230	1,8882	24	17	0,714	415,06	11100 +/-300	25,12 +/-0,94
2114SFS	220,08	200	2,6384	17	13	1	666,4	8810 +/-170	33,40 +/-0,72
2114DAT	201,36	187	1,6481	18	14	0,625	467,83	8680 +/-190	33,95 +/-0,83
2105SFS	465,85	375	1,805	19/20	15	0,68	360,06	12500 +/-360	21,15 +/-0,98
2105DAT	171,63	158,22	*	21	-	-	-	-	-

Notas:

5.4.1. Exactitud.

Para el análisis de exactitud se utilizaron 21 estándares o patrones certificados de referencia de los cuales 8 fueron para Pd y Pt y los 13 restantes para los demás elementos (ver **Tabla 9**). La exactitud se evaluó tomando un límite de tolerancia de error correspondiente a 2 desviaciones estándar. En la **Tabla 14** se presentan los datos correspondientes a los contenidos de elementos químicos en los estándares de referencia utilizados.

En las **Figuras 14 y 15** que visualiza el análisis de la exactitud con dos patrones de referencia, se observa que para todos los elementos la exactitud de los análisis se encuentra dentro del límite de tolerancia de error de 2 desviaciones estándar. Los diagramas de exactitud para todos los 21 patrones certificados de referencia se presentan en el **Anexo 4**.

5.4.2. Precisión.

Para el análisis de precisión se utilizaron 36 duplicados para Pd y Pt y 31 para los demás elementos (ver **Tabla 9**). La precisión se evaluó tomando un límite de tolerancia de error del 10% para elementos mayores y de 20% para menores y trazas.

En la **Figuras 16 y 17** que visualiza el análisis de la precisión, se observa que para todos los elementos la precisión de los análisis está dentro del límite de tolerancia de error del 10 y del 20 %, con pequeñas excepciones de algunos ensayos que fluctúan alrededor de éste límite. Los elementos que presentan duplicados con mayor desviación alrededor del límite de tolerancia de error establecido, son los elementos preciosos Ag, y Au, elementos del grupo del platino Pd, Pt, elementos de transición del grupo del Pb, Sn y Ge y elementos del grupo de los halógenos Cl, Br, F y el I, (**Figura 17**). El diagrama de precisión se presenta en el **Anexo 4**.

5.5. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GEOQUÍMICA

Los datos de concentración de 71 elementos químicos analizados en cada una de las muestras de sedimentos de planicie de inundación se presentan en el **Anexo 5**.

En el noventa y cinco por ciento (95%) de las muestras de sedimentos de planicie de inundación analizadas fue posible obtener cuantificar los 71 elementos de interés obteniendo datos por encima de los límites de detección de los métodos empleados (**Anexo 3**).

Toda la información de campo y laboratorio fue sistematizada, archivados y está disponible en la base de datos de información geoquímica Oracle-SDE del Instituto y se presenta en el **Anexo 1** de información de campo, en el **Anexo 2** de documentación fotográfica y en el **Anexo 3** de datos de laboratorio.

Previo al procesamiento de la información se revisó su calidad mediante verificación de ubicación (revisión de coordenadas - Datums) y codificación de cada muestra, chequeo de valores de concentración versus límite de detección, evaluación de datos perdidos y datos extremos -“outliers” y evaluación de duplicados (ver numeral 4.3 análisis preliminares). La calidad de los análisis químicos efectuados se controló mediante el uso de patrones certificados primarios y secundarios (exactitud), efectuando análisis duplicados (precisión) (**Tabla 9**); y re-analizando muestras con muy altos o muy bajos contenidos de un elemento hasta seleccionar el mejor método de cuantificación (ver numeral 5.4 sobre control de calidad de los datos).

5.5.1. Datos de Campo

La información de campo documenta las particularidades del sitio de muestreo, las condiciones existentes en el momento de coleccionar las muestras y la descripción macroscópica de cada muestra. El perfil de sedimentación que acompaña cada muestra permite visualizar la rata de acumulación de los sedimentos en cada planicie de inundación.

5.5.1.1. Datos del sitio de muestreo

Las muestras fueron coleccionadas en época de finales de la época de lluvias o inicio de la época seca, condición que permitió coleccionar muestras ya estabilizadas con el último aporte de material transportado por las crecidas torrenciales de los cuerpos acuosos. Aunque para muestreo de sedimentos de planicie de inundación no es crítico el que en el momento del muestreo el clima no sea lluvioso, solamente en un 5% de los casos se encontró ésta condición lluviosa: zona de la Orinoquía y Amazonía y algunas cuencas afluentes del río Magdalena en su cuenca media.



Tabla 14. Contenidos de elementos químicos en los estándares certificados de referencia utilizados para control de exactitud.

Serie	Estándar	Ag(ppb)	Au(ppb)	As(ppm)	B(ppm)	Ba(ppm)	Be(ppm)	Bi(ppm)	Br (ppm)	C(%)	Cd(ppb)	Ce(ppm)	Cl(ppm)	Co(ppm)	Cr(ppm)	Cs(ppm)
Estándar-01	GAU9GSD8	62	1,5	2,4	3,6	480	2,00	0,19	0,0	0,35	81	54		3,6	8	3,6
Estándar-02	GAU12GSD11	3200	21,5	188	68	260	26,00	50,00	2,3	0,27	2300	58	290	8,5	40	17,4
Estándar-03	GAU8GSS1	350	0,5	34,0	50	590	2,5	1,20	2,9	2,11	4300	70,0	66	14,2	62,0	9,0
Estándar-04	GAU9GSS3	91	1,5	4,4	23	1210	1,4	0,17	4,3	0,55	59	39,0	60	5,5	32,0	3,2
Estándar-05	GAU10GSD9	89	5,3	8,4	53	430	1,8	0,42	1,0	1,61	260	78,0	50	14,4	85,0	5,1
Estándar-06	GAU11GSD10	270	11,40	25,0	26,0	42	0,90	0,38	2,4	0,51	1120	38	53	15,3	136	2,3
Estándar-07	GAU9GSD1a	34	1,5	2,7	10	920	2,9	0,49	0,0	0,00	110	81,0	84	20,0	126,0	5,5
Estándar-08	GAU9GSD2	66	1,5	6,2	11	185	17,1	1,64	3,0	0,42	65	192,0	0	2,6	12,2	16,6
Estándar-09	GAU9GSD4	84	1,5	19,7	52	470	2,4	0,64	0,0	2,60	190	78,0	0	18,0	81,0	10,0
Estándar-10	GAU9GSD5	360	1,5	75,0	51	440	2,3	2,40	0,0	2,30	820	89,0	0	18,9	70,0	9,4
Estándar-11	GAU9GSD6	360	1,5	13,6	50	330	1,7	5,00	0,0	0,91	430	68,0	0	24,4	190,0	9,1
Estándar-12	GAU9GSD8	62	1,5	2,4	4	480	2,0	0,19	0,0	0,35	81	54,0	0	3,6	7,6	3,6
Estándar-13	GAU9GSD9	89	1,5	8,4	53	430	1,8	0,42	1,5	1,61	260	78,0	50	14,4	85,0	5,1
Estándar-14	GBW07290															
Estándar-15	GBW07288															
Estándar-16	GBW07292															
Estándar-17	GBW07294															
Estándar-18	GPI-8															
Estándar-19	GPI-1															
Estándar-20	I/2Gpt-2															
Estándar-21	GPI-2															
Serie	Estándar	Cu(ppm)	Dy(ppm)	Er(ppm)	Eu(ppm)	F(ppm)	Ga(ppm)	Gd(ppm)	Ge(ppm)	Hf(ppm)	Hg(ppb)	Ho(ppm)	I(ppm)	In(ppm)	La(ppm)	Li(ppm)
Estándar-01	GAU9GSD8	4	2,6	1,80	0,56	204	10,8	3,5	0,94	14,5	42	0,90		0,040	30	13,2
Estándar-02	GAU12GSD11	79	7,2	4,60	0,60	1650	18,5	5,9	1,81	5,4	72	1,40	2,0	1,900	30	70,6
Estándar-03	GAU8GSS1	21,0	4,60	2,60	1,00	506	19,3	4,60	1,34	6,8	32,0	0,87	1,80	0,080	34	35,0
Estándar-04	GAU9GSS3	11,4	2,60	1,50	0,72	246	13,7	2,90	1,17	6,8	60,0	0,53	1,30	0,031	21	18,4
Estándar-05	GAU10GSD9	32,1	5,10	2,80	1,33	494	14,0	5,50	1,30	9,7	83,0	0,96	0,63	0,056	40	30,0
Estándar-06	GAU11GSD10	23	2,2	1,30	0,47	149	6,4	2,2	0,40	1,8	280	0,45	1,6	0,067	13	13,0
Estándar-07	GAU9GSD1a	29,0	4,30	2,30	1,70	860	23,6	5,60	1,60	9,1	31,0	0,79	0,00	0,000	41	32,0
Estándar-08	GAU9GSD2	4,9	11,00	8,00	0,49	1980	27,4	9,50	1,70	20,0	40,0	2,60	2,90	0,046	90	101,0
Estándar-09	GAU9GSD4	37,3	4,60	2,40	1,30	740	20,5	5,00	1,40	5,8	44,0	1,00	0,00	0,085	40	51,0
Estándar-10	GAU9GSD5	137,0	5,00	3,10	1,40	585	20,3	6,40	1,40	6,5	100,0	0,95	0,00	0,130	46	45,0
Estándar-11	GAU9GSD6	383,0	3,80	2,10	1,50	690	16,7	5,50	1,30	4,9	45,0	0,76	0,00	0,140	39	40,0
Estándar-12	GAU9GSD8	4,1	2,60	1,80	0,56	204	10,8	3,50	0,94	14,5	42,0	0,90	0,80	0,040	30	13,2
Estándar-13	GAU9GSD9	32,1	5,10	2,80	1,33	494	14,0	5,50	1,30	9,7	83,0	0,96	0,63	0,056	40	30,0
Estándar-14	GBW07290															
Estándar-15	GBW07288															
Estándar-16	GBW07292															
Estándar-17	GBW07294															
Estándar-18	GPI-8															
Estándar-19	GPI-1															
Estándar-20	I/2Gpt-2															
Estándar-21	GPI-2															
Serie	Estándar	Lu(ppm)	Mn(ppm)	Mo(ppm)	N (ppm)	Nb(ppm)	Nd(ppm)	Ni(ppm)	P(ppm)	Pb(ppm)	Pr(ppm)	Pt(ppb)	Pd(ppb)	Rb (ppm)	S (ppm)	Sb(ppm)
Estándar-01	GAU9GSD8	0,38	335	0,54	375	35	21,0	2,7	140	21,0	5,8			132	80	0,24
Estándar-02	GAU12GSD11	0,78	2490	5,90	384	25	27,0	14,4	255	636,0	7,4			408	170	14,90
Estándar-03	GAU8GSS1	0,41	1760	1,40	1870	16,6	28,00	20,4	735	98	7,5			140	310	0,87
Estándar-04	GAU9GSS3	0,29	304	0,30	640	9,3	18,40	12,0	320	26	4,8			85	120	0,45
Estándar-05	GAU10GSD9	0,45	620	0,64	440	17,7	34,00	32,3	670	23	9,2			80	150	0,81
Estándar-06	GAU11GSD10	0,19	1010	1,20	430	7	11,8	30,2	271	27,0	3,2			9	90	6,30
Estándar-07	GAU9GSD1a	0,38	910	1,05	0	31,0	36,00	56,0	1520	31	9,3			126	150	0,30
Estándar-08	GAU9GSD2	1,60	240	2,00	363	95,0	62,00	5,5	200	32	18,6			470	89	0,46
Estándar-09	GAU9GSD4	0,47	825	0,86	0	18,0	32,00	40,0	470	30	9,3			130	354	1,84
Estándar-10	GAU9GSD5	0,46	1160	1,20	0	19,0	35,00	34,0	630	112	9,9			118	410	3,90
Estándar-11	GAU9GSD6	0,34	970	7,70	0	12,0	33,00	78,0	1020	27	8,4			107	784	1,25
Estándar-12	GAU9GSD8	0,38	335	0,54	340	35,0	21,00	2,7	140	21	5,8			132	80	0,24
Estándar-13	GAU9GSD9	0,45	620	0,64	440	17,7	34,00	32,3	670	23	9,2			80	150	0,81
Estándar-14	GBW07290											4,6	6,4			
Estándar-15	GBW07288											0,3	0,3			
Estándar-16	GBW07292											11,3	20,0			
Estándar-17	GBW07294											15,2	14,7			
Estándar-18	GPI-8											0,7	0,6			
Estándar-19	GPI-1											0,26	0,26			
Estándar-20	I/2Gpt-2											1,15	0,8			
Estándar-21	GPI-2											2,3	1,6			

Tabla 14. Contenidos de elementos químicos en los estándares certificados de referencia utilizados para control de exactitud. (Continuación).

Serie	Estándar	Sc(ppm)	Se(ppm)	Sm(ppm)	Sn(ppm)	Sr(ppm)	Ta(ppm)	Tb(ppm)	Th(ppm)	Ti(ppm)	Tl(ppm)	Tm(ppm)	U(ppm)	V(ppm)	W(ppm)	Y(ppm)
Estándar-01	GAU9GSD8	5,7	0,11	3,80	9,4	52	3,7	0,54	13,4	3640	0,78	0,33	3,0	26	2,00	18
Estándar-02	GAU12GSD11	7,4	0,20	6,20	370,0	29	5,7	1,13	23,3	2100	2,90	0,74	9,1	47	126,00	43
Estándar-03	GAU8GSS1	11,2	0,14	5,20	6,1	155	1,40	0,75	11,6	4830	1,00	0,42	3,30	86,0	3,10	25,0
Estándar-04	GAU9GSS3	5,0	0,09	3,30	2,5	380	0,76	0,49	6,0	2240	0,50	0,28	1,30	36,0	0,95	15,0
Estándar-05	GAU10GSD9	11,1	0,16	6,30	2,6	166	1,30	0,87	12,4	5500	0,49	0,44	2,60	97,0	1,80	26,6
Estándar-06	GAU11GSD10	4,1	0,28	2,40	1,4	25	0,5	0,42	5,0	1270	0,21	0,20	2,1	107	1,60	14
Estándar-07	GAU9GSD1a	14,0	0,11	6,70	3,4	480	3,00	0,81	27,0	5370	0,70	0,34	4,60	115,0	1,00	22,0
Estándar-08	GAU9GSD2	4,4	0,20	10,80	29,0	28	15,30	1,80	70,0	1380	1,90	1,55	17,00	16,5	24,00	67,0
Estándar-09	GAU9GSD4	15,4	0,29	6,20	4,0	142	1,40	0,90	14,6	5340	1,20	0,46	2,60	118,0	2,50	26,0
Estándar-10	GAU9GSD5	14,5	0,40	6,60	4,6	204	1,40	0,89	15,2	5370	1,16	0,46	2,60	109,0	3,20	26,0
Estándar-11	GAU9GSD6	17,0	0,30	5,60	2,8	266	0,75	0,69	9,0	4640	1,08	0,35	2,40	142,0	25,00	20,2
Estándar-12	GAU9GSD8	5,7	0,11	3,80	9,4	52	3,70	0,54	13,4	3640	0,78	0,33	3,00	26,0	2,00	18,0
Estándar-13	GAU9GSD9	11,1	0,16	6,30	2,6	166	1,30	0,87	12,4	5500	0,49	0,44	2,60	97,0	1,80	26,6
Estándar-14	GBW07290															
Estándar-15	GBW07288															
Estándar-16	GBW07292															
Estándar-17	GBW07294															
Estándar-18	GPt-8															
Estándar-19	GPt-1															
Estándar-20	I/2Gpt-2															
Estándar-21	GPt-2															
Serie	Estándar	Yb(ppm)	Zn(ppm)	Zr (ppm)	Si(%)	Al(%)	Fe(%)	K(%)	Na(%)	Ca(%)	Mg(%)	OrgC(%)				
Estándar-01	GAU9GSD8	2,10	43	490	38,75	4,08	1,54	2,36	0,35	0,18	0,15	0,33				
Estándar-02	GAU12GSD11	5,10	373	153	35,63	5,49	3,07	2,73	0,34	0,34	0,37	0,24				
Estándar-03	GAU8GSS1	2,7	680	245	29,25	7,50	3,63	2,16	1,23	1,23	1,09	1,80				
Estándar-04	GAU9GSS3	1,7	31	246	34,92	6,48	1,40	2,53	2,01	0,91	0,35	0,51				
Estándar-05	GAU10GSD9	2,8	78	370	30,32	5,60	3,40	1,66	1,07	3,82	1,44	0,46				
Estándar-06	GAU11GSD10	1,20	46	70	41,54	1,50	2,70	0,11	0,03	0,50	0,07	0,40				
Estándar-07	GAU9GSD1a	2,3	90	320	27,66	8,15	4,55	2,33	2,52	2,86	1,99	0,00				
Estándar-08	GAU9GSD2	11,0	44	460	32,66	8,32	1,32	4,33	2,25	0,18	0,13	0,39				
Estándar-09	GAU9GSD4	2,9	101	188	24,54	8,29	4,13	1,86	0,22	5,37	0,63	1,05				
Estándar-10	GAU9GSD5	2,9	243	220	26,34	8,13	4,10	1,75	0,30	3,81	0,59	1,30				
Estándar-11	GAU9GSD6	2,1	144	170	28,61	7,49	4,11	2,03	1,71	2,76	1,81	0,36				
Estándar-12	GAU9GSD8	2,1	43	490	38,75	4,08	1,54	2,36	0,35	0,18	0,15	0,33				
Estándar-13	GAU9GSD9	2,8	78	370	30,32	5,60	3,40	1,66	1,07	3,82	1,44	0,46				
Estándar-14	GBW07290															
Estándar-15	GBW07288															
Estándar-16	GBW07292															
Estándar-17	GBW07294															
Estándar-18	GPt-8															
Estándar-19	GPt-1															
Estándar-20	I/2Gpt-2															
Estándar-21	GPt-2															

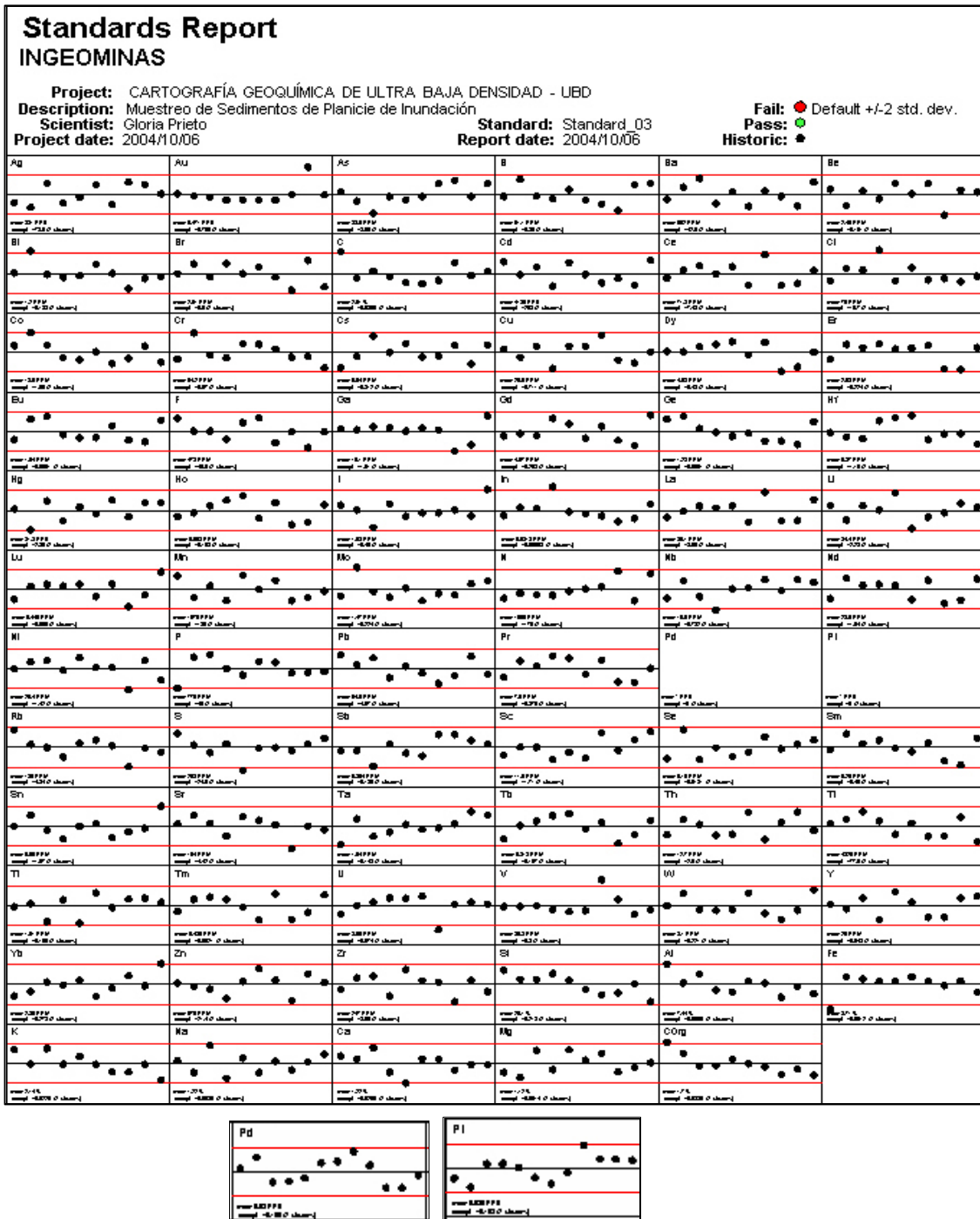


Figura 14. Análisis de exactitud, patrón 3 (GAU8GSS1) para 69 elementos y patrón 18 (Gpt-8) para Pt y Pd.

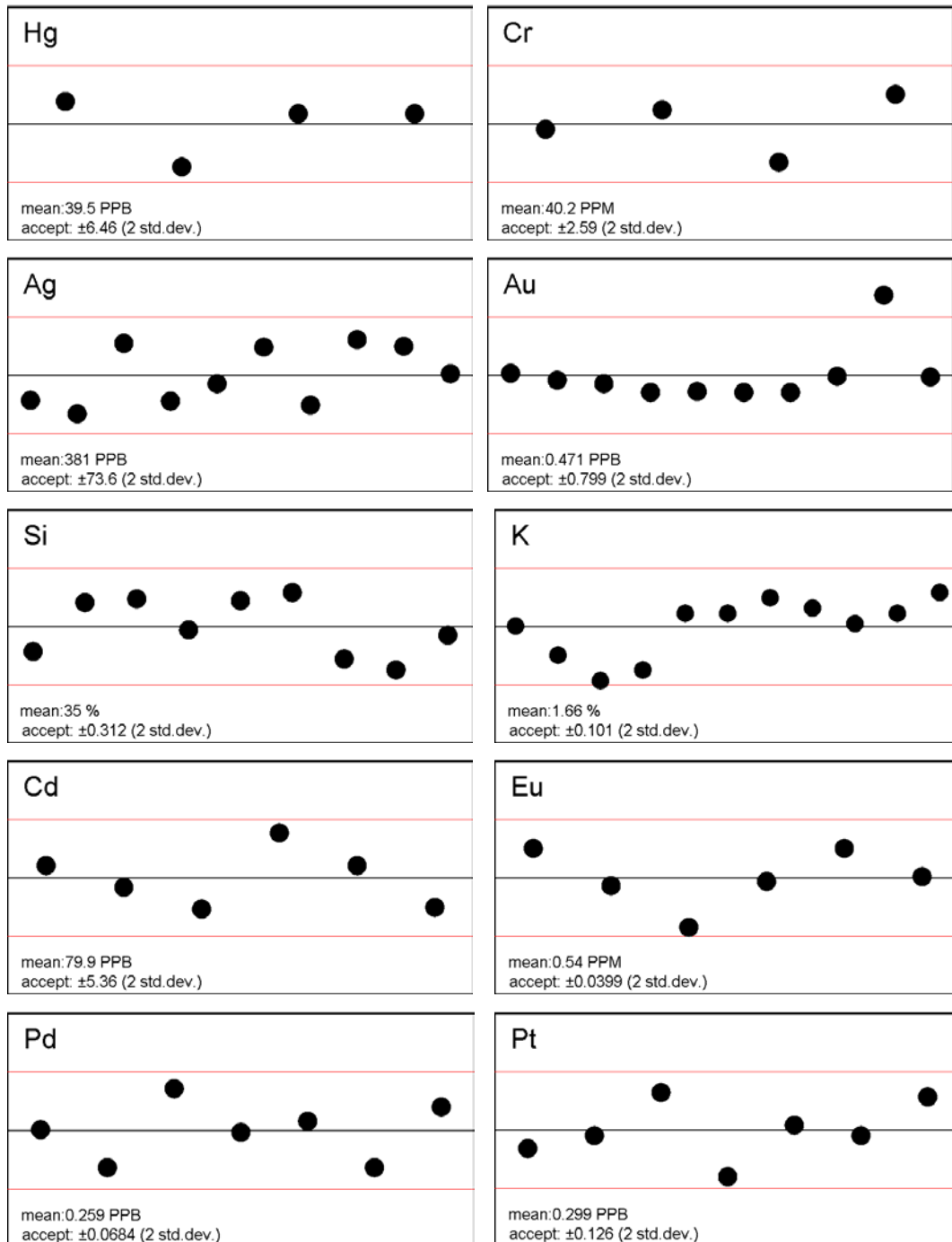


Figura 15. Detalle del análisis de exactitud, para Hg (estándar 01-GAU9GSD8), Cr (estándar 02-GAU12GSD11), Ag y Au (estándar 03-GAU8GSS1), Si (estándar 04-GAU9GSS3), K (estándar 05-GAU10GSD9), Cd y Eu (estándar 12-GAU9GSD8) y Pd y Pt (estándar 19-GPt-1).

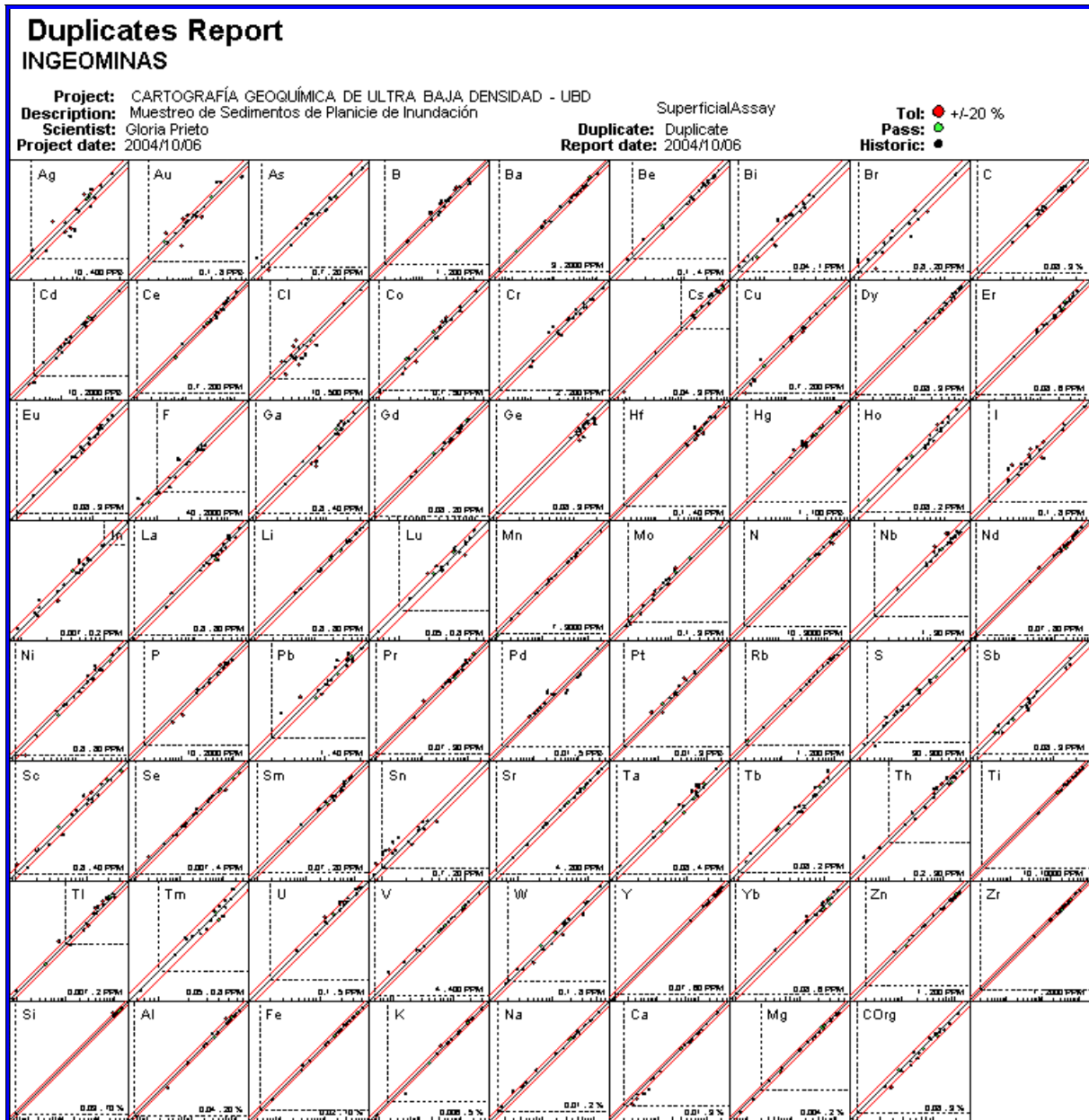


Figura 16. Análisis de precisión usando 36 duplicados para Pt y Pd y 31 para los demás elementos.

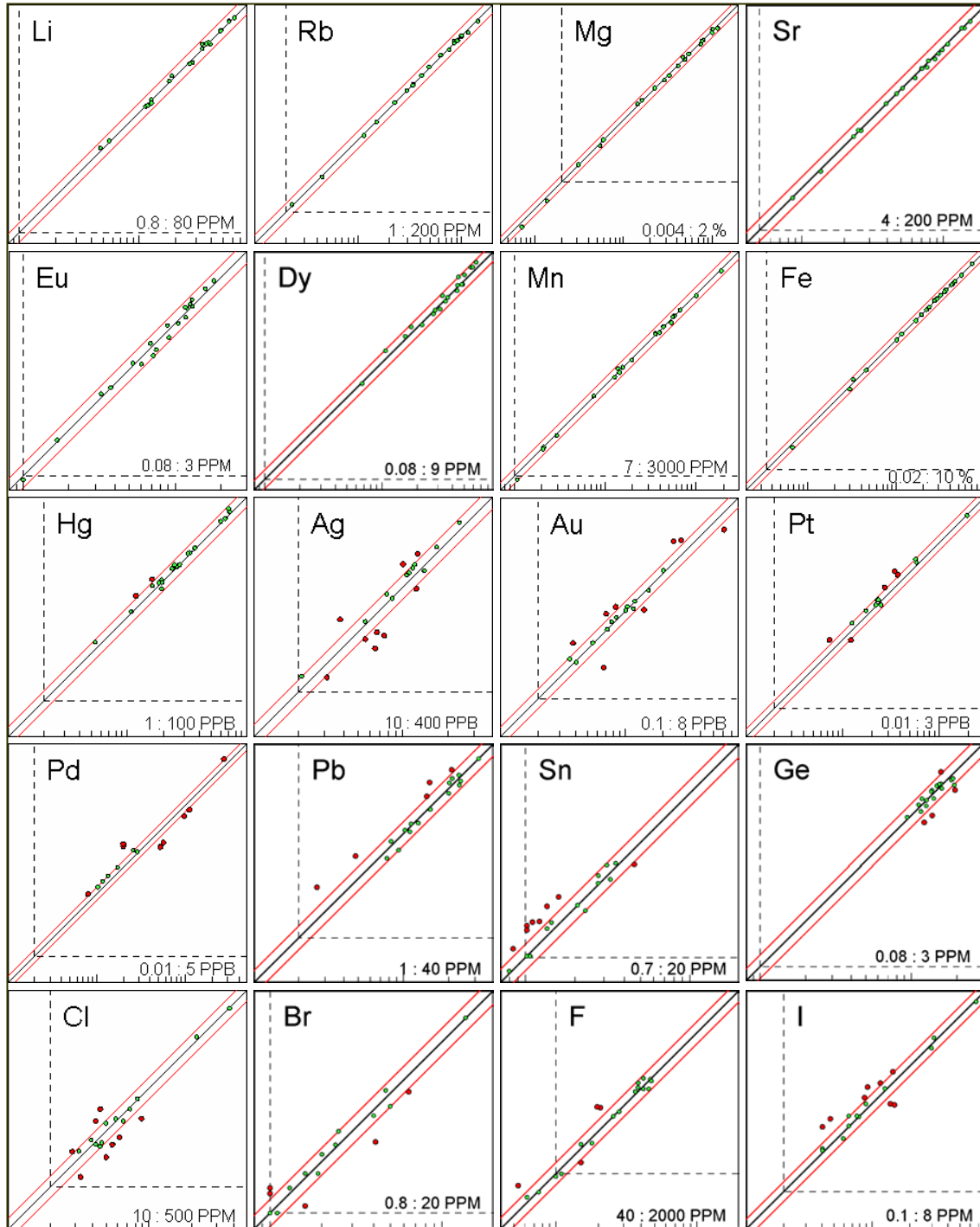


Figura 17. Detalle del análisis de precisión para Li, Rb, Mg, Sr, Eu, Dy, Mn, Fe, Hg, Ag, Au, Cl, Br, F, I, usando 31 duplicados y para Pd, Pt, usando 36 duplicados.

El perfil de sedimentación muestreado, en la mayoría de los casos (80%) alcanzó 2 m de profundidad, nivel al cuál se colectaron las muestras profundas. En la cuenca del Magdalena y en algunos afluentes del río Cauca a los 2 m de profundidad no se alcanzaba el nivel freático, evidenciando la alta capacidad de sedimentación de los cuerpos acuosos, que han acumulado secuencias bastante gruesas de sedimentos en ambientes de baja energía en su planicie de inundación. En afluentes del Magdalena, especialmente en su cuenca media, a profundidades menores de 2 m se alcanzó el nivel freático y la muestra debió colectarse en la secuencia inmediatamente superior a dicho nivel.

En algunas cuencas, especialmente del área Caribe, a profundidades menores de 2 m se encontró una capa de gravas evidenciando menor capacidad de sedimentación del cuerpo acuoso, aún en el ápice de sus cuencas en donde las áreas son en general de baja energía y acumulación. Casos extremos de la situación anterior lo constituyen secuencias en donde los niveles de gravas se encontraron a menos de 1 m de profundidad: ríos Ariguaní (0712) a 90 cm, Chiriamo (0802), Upía (2204) y De Oro (1605) a 80 cm; Velagra (1603), Cachira del Sur (1601), y Chucurí (1606) a 75 cm; Reicito (1206) y Cachira del Esp Santo (1209) a 70 cm; Chitaga (1602) a 65 cm y el río Aracataca (0308) en donde el nivel de gravas y el nivel freático se encontraron a 80 cm de profundidad. Un caso especial lo constituye la cuenca del caño Minas (3901) en la Amazonía, en donde se encontró un nivel endurecido a 1,67 m de profundidad. En los sitios de muestreo, por ser en su mayoría playas de inundación activa, no existe uso intensivo del suelo, sin embargo en sus alrededores si existen actividades productivas que seguramente aportan elementos residuales de su actividad a los sedimentos de planicie de inundación, especialmente en épocas de lluvias máximas.

En las cuencas de la zona Amazónica las áreas circundantes de los sitios de muestreo están poco intervenidos y son muy prístinos, hacia la región de la Orinoquía aunque es limitada la intervención solamente están en estado prístino los caños Iraca (2907) y Lariba (2508). En aproximadamente el 80% de las cuencas se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas y reciben aportes domésticos en mayor o menor grado.

En la parte baja de algunas cuencas se desarrollan actividades industriales petroleras, tal es el caso del caño Rubiales (3004) y el río Tillabá (3005); así como otras actividades industriales como sucede en los arroyos La Quebrada (0406DC), Mallorquín (0702), y de los ríos Tiguí (1121) y Sogamoso (1503) otras industrias como en Arroyo Grande (0306) en la costa Caribe. Es notable también la actividad minera que albergan cuencas como las de los ríos Ranchería (0406) y Maracas (0806) con minería de carbón; río Palomino (0408) con minería de mármol y yeso; ríos Samaná Sur (2106), Samaná Norte (1513), Santo Domingo (1119), Caribona (1109), Tiguí (1121), San Jorge (1001), Tamaná (1003DM), y Arroyo La Quebrada (0406DC) con minería de diversos minerales incluyendo actividades extractivas de oro.

Entre las cuencas que reciben aportes notables de diversas actividades antrópicas se pueden mencionar los ríos Fonce (1609), Chicamocha (2201), y Suratá (1604) de minería y transporte; río De Oro (1605) de minería e industria; y los ríos Chucurí (1606), Ubaza (2101) y Garagoa (2207) que tienen alta influencia de transporte.

5.5.1.2. Datos macroscópicos de las muestras colectadas

La mayoría de las muestras colectadas están compuestas por material arcilloso, arcillo limoso y limo arcilloso indicando ambientes de depositación de baja energía y de acumulación geoquímica.

En algunos afluentes del Magdalena en las cuencas media y baja y en algunos ríos de la cuenca del Orinoco se colectaron muestras compuestas por arenas finas o por arenas finas arcillosas o limosas reflejando el transporte a que han sido sometidos los materiales de la cuenca de captación.

Menor número de muestras están compuestas por arenas medias, especialmente muestras colectadas en cuencas de la zona costera del Caribe. En ésta zona la cuenca de captación de los drenajes es mas corta y los materiales han sido transportados desde mayores a menores altitudes (Sierra Nevada de Santa Marta) en distancias mas cortas y por tanto los materiales que se depositan cuando el curso se estabiliza en áreas de menor energía, poseen granulometría más gruesa.

En algunas muestras se visualizó acumulación de minerales que reflejan el aporte de las cuencas de captación y formación de minerales secundarios y terciarios producto del trasporte y evolución de los minerales primarios erodados de sus fuentes iniciales. Entre los casos de mayor acumulación se pueden mencionar los arroyos Jorotuy (0202) en donde se presentó acumulación de óxidos de hierro y halita (NaCl), Yuruapua (0203) acumulación de halita, Kutamahana (0401) acumulación de calcita (CaCO₃) y dolomita (CaMg(CO₃)), río Sillimahana (0501) acumulación de óxidos y halita.

5.5.1.3. Mediciones radiométricas

En cada sitio, a lo largo del perfil muestreado y en donde las condiciones lo permitieron, se levantó información radiométrica con un detector de centelleo. En algunos sitios fue imposible trasladar el equipo de campo y no se registraron los valores de radiación.

La radiación registrada a lo largo de los diferentes perfiles fue bastante uniforme fluctuando entre 50 c/s y 100 c/s a lo largo del perfil en la mayoría de cuencas de afluentes del río Magdalena. Hacia la región de la Costa Atlántica se registraron valores relativamente mas bajos entre 20 y 40c/s especialmente en el río Casacara (2896), Garupal (2898), Guatapurí (2890), quebradas Simaña (2544) y La Honda (2545), ríos Caimán (2546), Sevilla (2978), Buriticá (1581), Mendihuaca (1581DC), Palomino (1582) en donde aumentó la radiación de 25 C/s en superficie a 50 C/s en profundidad y Ancho (1583) en donde aumentó la radiación de 30 C/s en superficie a 72 c/s en profundidad. Valores de radiación relativamente mas altos se registraron en los perfiles de sedimentación de las cuencas de los ríos Nare (2320), Ermitaño (2321) y en el río Camarones (1585) en donde se registró un aumento de radiación de superficie a profundidad del perfil (85 a 130 c/s).

En la región de la Orinoquía en la mayoría de las cuencas se registraron valores que fluctuaban entre 45 a 100 c/s. Valores bajos cercanos a 20c/s se registraron en los caños Gavilán (2404), Veredita (2404A), Mesetas (2503), Negro (18BIS02), Guacamayas (3101), Urichara (2805), e Iraca (2907); y en los ríos Tomo (2405), Beberi (2406), Cucuana (2704), Orototy (2801), Guamal (2802), y Guapé (2804). Valores mayores de radiación (a lo largo del perfil en profundidad), se registraron en la parte alta de la Amazonía en los ríos Surubí (3909), y Querary (3910) entre 60 y 120 c/s, y Pirabotón (4801A) entre 150 y 200 c/s. En la Orinoquía se registraron valores mayores de radiación en los ríos Guayuriba (2905) y Guatiquía (2904) hasta 125 c/s, Pauto (2305) entre 85 y 120 c/s, y Charte (2208) hasta 120 c/s; así como en los caños Duya (2306) entre 100 y 150 c/s, Mare Mare (2307) entre 100 y 190 c/s, Samuco, y Juriepe (18BIS01) de 65 a 120 c/s.

5.5.2. Datación con ^{14}C

De las 20 muestras seleccionadas para efectuar datación con ^{14}C (**Tabla 12**), debido a la poca acumulación de carbono orgánico, solamente se pudo obtener datación (**Tabla 13**) para las muestras del río Calenturitas - 0711DAT; río Cimitarra - 1504SFS; río Carare en Puerto Parra - 1510SFS; río Recio - 2114DAT y 2114SFS; y para el río Negro en Puerto Boyacá - 2105SFS.

Las muestras del río Cimitarra - 1504SFS y del río Negro en Puerto Boyacá - 2105SFS requirieron ser procesadas en su primera etapa (combustión) dos veces para obtener la cantidad suficiente de gas CO_2 y poder continuar con el proceso.

Para las muestras del río Bogotá en Ricaurte - 2801SFS y 2801DAT; río Piedras - 0301DAT; y para el río Negro en Puerto Boyacá muestra mas profunda para datación - 2105DAT, no se obtuvo la cantidad suficiente de gas CO_2 (primera etapa del proceso de síntesis) para continuar con el proceso de datación.

Las muestras del río Bogotá en Ricaurte - 2801SFS y 2801DAT presentaron bastante efervescencia durante su pre-tratamiento ácido lo que muestra que el % de carbono acumulado se debió más a presencia de carbonatos y bicarbonatos que a acumulación de materia orgánica.

Para la muestra mas profunda del río Calenturitas afluente del río Cesar en la cuenca baja del río Magdalena, la edad obtenida es de 7650 +/-280 años BP; para el río Recio que drena sedimentos de origen volcánico la edad es de 8680 +/-190 años BP para la muestra mas profunda (2124DAT) y de 8810 +/-170 años BP para la muestra superficial (2114SFS); para el río Cimitarra, que drena cuarzodiritas jurásicas, la edad es de 8700 +/-230 años BP; y para el para el río Carare en Puerto Parra, que drena sedimentitas cretácicas y del Paleógeno- Neógeno, la edad es de 11100 +/-300 años BP; y para el río Negro en Puerto Boyacá, que drena lutitas negras de origen cretácico y arenitas conglomeráticas terciarias, la edad es de 12500 +/-360 años BP.

El análisis de los datos de datación con ^{14}C es muy limitado, porque no se obtuvieron datos de la secuencia del perfil de sedimentación y la profundidad del perfil de sedimentación es variable dependiendo de la rata de acumulación de sedimentos en cada secuencia. Las edades obtenidas en reflejan los aportes cuaternarios de cada cuenca evaluada.

El río Calenturitas cuya muestra corresponde a una secuencia entre 60 y 85 cm, ha acumulado sedimentos de menor edad (7650 años BP) en un perfil de profundidad total de 90 cm. El río Recio por su parte ha acumulado sedimentos de edades similares desde su secuencia superficial (0 a 25 cm, 8680 años BP) hasta su secuencia mas profunda (150 a 170 cm, 8810 años BP). El río Negro (12500 años BP) y el río Carare en Puerto Parra (11100 años BP), han acumulado sedimentos relativamente más antiguos, desde su secuencia superficial (muestras entre 0 y 25 cm) en un perfil de sedimentación de 200 cm y 140 cm respectivamente.

5.5.3. Procesamiento de Datos Geoquímicos

En el procesamiento de datos de las muestras de sedimentos de planicie de inundación de UBD se parte de la hipótesis principal de que el análisis espacial es bidimensional (Yunchuan, X. 2001) dada la naturaleza del muestreo que se realizó, tanto para los datos de muestras superficiales como para muestras profundas.

Si se presentan valores de concentración menores al límite de detección deben ser reemplazados por valores igual a la mitad del límite de detección (Reimann et al., 1998). Lo anterior es necesario dado que si no se incluyen estos datos en el tratamiento estadístico, se produce sobre-estimación de parámetros como la media y la mediana. El mismo procedimiento se debe usar para apreciar la distribución de los datos en las curvas de frecuencia acumulativa y para la producción de mapas de concentración por cuencas y los mapas de distribución espacial.

5.5.3.1 Análisis Exploratorio de Datos

El análisis exploratorio de datos se realizó mediante dos metodologías: Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE) con las herramientas gráficas para patrones de distribución, y Análisis Exploratorio de Datos (AED), con las medidas de tendencia central.

En el procedimiento AED se calcularon estadísticas para identificar la tendencia central de los datos, medidas de dispersión y medidas de distribución. En el procedimiento AEDE se obtuvieron mapas de Voronoi, determinación de tendencias centrales y revisión de patrones de distribución espacial preliminares.

5.5.3.1.1. Análisis Exploratorio de Datos (AED)

El análisis exploratorio es de gran utilidad para tratar datos geoquímicos y además no requiere hacer presunciones que impliquen una distribución normal o gaussiana de los datos, permite apreciar fácilmente las características de cada grupo de datos y usa estadísticas robustas y gráficos muy simples, pero efectivos.

Como parte del análisis se calcularon estadísticas de tendencia central (media, mediana), medidas de dispersión (varianza, desviación estándar) y medidas que indican la forma de la distribución de probabilidad (sesgo y curtosis). Adicionalmente se construyeron diagramas de dispersión, diagramas Q-Q y P-P, diagramas de caja e histogramas, entre otros. La finalidad de estos diagramas es visualizar las características del conjunto de datos.

- **Cálculo de estadísticas de tendencia central**

Para las muestras de sedimentos de llanura de inundación horizonte superficial (A_{0-25}) y horizonte profundo (hasta 200 cm), los estadísticos se basan en aquellos casos que no incluyan valores perdidos en ninguna variable dependiente o factor utilizados (**Tabla 15**).

- **Cálculo de estimadores – M**

Como alternativas robustas a la mediana y a la media muestral, para estimar el centro de la localización, se calcularon los estimadores robustos centrales. Son estimadores de tendencia central basados en el método de máxima verosimilitud (de ahí que también son conocidos como estimadores robustos centrales). En realidad, un estimador robusto central o estimador –M no es más que una media ponderada en la que los pesos asignados a los casos dependen de la distancia de cada caso al centro de distribución: los casos centrales reciben un peso de 1 y los demás valores reciben un peso tanto menor cuanto más alejados se encuentran del centro.

Al igual que ocurre con la media truncada, los estimadores –M son menos sensibles que la media aritmética a la presencia de valores extremos. Por tanto, cuando las distribuciones son muy

asimétricas, es preferible utilizar como índices de tendencia central, en lugar de la media aritmética, los estimadores-M.

Tabla 15. Ejemplo de estadísticas descriptivas para Ag, Au, As, B y Ba.

	Ag(ppb)	Au(ppb)	As(ppm)	B(ppm)	Ba(ppm)
Promedio	114.71	4.64	4.94	34.59	376.64
Suma de los cuadrados de las desv	2055256.43	113981.33	5306.79	89632.02	13107532.47
Media geométrica	84.11	1.32	3.17	27.82	250.83
Media armónica	61.28	0.93	2.01	20.67	120.13
Media recortada al 5%	106.81	2.08	4.48	33.74	371.51
Mediana	88.73	1.08	3.62	30.93	375.3
Maximo	731.11	306.13	35.3	143.02	1021
Minimo	11	0.24	0.29	3.31	8.2
Vr mas comun (moda)	61	0.4	0.93	32.06	
Percentil 5%	22.4	0.4	0.75	6.4	29.9
Percentil 25%	50.78	0.75	1.5	18.96	120.45
Percentil 75%	143.38	1.83	6.58	48.89	577.8
Percentil 90%	232.89	4.18	10.28	63.01	724.67
Distribución skewness	2.86	10.85	2.95	1.16	0.31
Desviacion estandar	103.19	24.3	5.24	21.55	260.6
Promedio de las desv absolutas	68.79	6.18	3.45	17.03	221.15

El resumen de las estadísticas descriptivas se presenta en el **Anexo 4**.

Los estimadores pueden ser agrupados en:

1-) Estimadores Clásicos o Paramétricos: La moda, la media aritmética, la media de los extremos, la media armónica, la media anarmónica, la media geométrica, la media cuadrática, la media de Jeffreys, etc.

2-) Estimadores No Paramétricos o Estimadores Robustos: Pueden ser la mediana de Hodges-Lehmann, el estimador BES (Best Easy Systematic), la media Aritmética Múltiple Sucesiva, la trimedia de Tukey, el estimador α -media Equilibrada, el estimador de Huber, el método Danés, el estimador de Hogg, el estimador de Switzer, el estimador de Takashi, etc.

Los Estimadores Robustos, conocidos también como Estimadores no Paramétricos o Estimadores Libres de Distribución o simplemente Robustos, son estimadores libres de la asunción de una forma de distribución de la población de la cual se extrae la muestra.

Los Estimadores Clásicos o Paramétricos, tienen asociada un tipo de distribución de la población. Así, por ejemplo, a la Media Aritmética se le asocia la Distribución Normal o Mesocurtica; a la Mediana se le asocia la Distribución Laplaciana o Leptocurtica; y a la Media de los Extremos se le asocia la Distribución Rectangular.

A los Estimadores Clásicos se les asocia un criterio de óptimo prefijado o preestablecido, expresado por medio de las llamadas Normas Mínimas o Condiciones Mínimas, basados en la existencia de sólo errores accidentales en las mediciones u observaciones.

Cada uno de los estimadores-M que se calcularon para las muestras de sedimentos superficiales y profundos (el estimador-M de Huber, el estimador en onda de Andrew, el estimador-M redescendente de Hampel y el estimador bponderado de Tukey) difieren entre si por la forma concreta de asignar pesos a los casos (**Tabla 16**). Una descripción detallada de cada uno de estos estimadores puede encontrarse en Norusis, 1993 y en Palmer, 1999.

Tabla 16. Estimadores de Huber, Bponderado de Tukey, Hampel y onda de Andrew para Ag, Au, As, Ca, Mg y COrg.

Elemento	Estimador-M de Huber(a)	Bponderado de Tukey(b)	Estimador-M de Hampel(c)	Onda de Andrews(d)
Ag(ppb)	84.7804	78.1997	83.0830	78.1930
Au(ppb)	1.031583	.895534	.958702	.894274
As(ppm)	4.11962	3.87903	4.16453	3.87709
Ca(%)	.41724	.32412	.40491	.32323
Mg(%)	.44874	.43227	.47601	.43141
COrg(%)	.4094	.3927	.4143	.3914

- **Estimador de Huber**

Este estimador fue desarrollado por Huber en el año 1964 (en: Berstein, 1988) y en su trabajo "Robust Estimation" del año 1968 presenta en detalle la teoría de la estimación robusta de un parámetro de tendencia central o posición central o puntual de una distribución normal "contaminada" y presenta los tres métodos para construir estimadores robustos.

El Estimador HUBER se desarrolló con base en las funciones:

$$\Sigma (V_i)^2 = \text{mínima si se cumple } |V| \leq K \times \sigma$$

$$\Sigma K \times \sigma (2 \times |V| - K \times \sigma) = \text{mínima si cumple con } |V| \geq K \times \sigma$$

Generalmente K adopta valores de 2 ó 3. Muchos recomiendan usar el valor 3,

Porque $K \times \sigma$ representa la tolerancia de la medición y σ representa la exactitud de la observación o medición obtenida. Es un proceso iterativo.

El Estimador de HUBER usa como función de Peso P lo siguiente:

$$P = 1 \text{ si } |V| \leq K \times \sigma$$

$$P = \frac{K \times \sigma}{|V|} \text{ si } |V| \geq K \times \sigma$$

Por defecto se muestran estas medidas de dispersión y de tendencia central. Éstas últimas indican la localización de la distribución, e incluyen la media, la mediana y la media recortada al 5%.

Las medidas de dispersión muestran la disimilaridad de los valores e incluyen: los errores típicos, la varianza, la desviación típica, el mínimo, el máximo, la amplitud y la amplitud intercuartil. Los

estadísticos descriptivos también incluyen medidas de la forma de la distribución: la asimetría y la curtosis se muestran con sus errores típicos. También se muestra el intervalo de confianza a un nivel del 95%; aunque se puede especificar otro nivel.

- **Pruebas de normalidad**

Las pruebas de Shapiro-Wilk y Jarque-Bera confirman que no se puede rechazar la hipótesis de normalidad de las muestras en sedimentos superficiales y profundos (**Tabla 17**). Se notará que con la prueba de Shapiro-Wilk, el riesgo de equivocarse rechazando la hipótesis es más importante que con la prueba de Jarque-Bera.

El procedimiento Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra compara la función de distribución acumulada observada de una variable con una distribución teórica determinada, que puede ser la normal, la uniforme, la de Poisson o la exponencial. La Z de Kolmogorov-Smirnov se calcula a partir de la diferencia mayor (en valor absoluto) entre las funciones de distribución acumuladas teórica y observada. Esta prueba de bondad de ajuste contrasta si las observaciones podrían razonablemente proceder de la distribución especificada.

Muchas pruebas paramétricas requieren que las variables se distribuyan de forma normal. La prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra se puede utilizar para comprobar que una variable, por ejemplo Yb en sedimentos profundos y superficiales, se distribuye normalmente.

Tabla 17. Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk para Ag, Au, As, B, Ba, Be, Bi, Yb, Zn, Zr, Si, Al, Fe, Na, Ca, Mg, COrg

Elemento	Kolmogorov-Smirnov(a)			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Ag(ppb)	.290	194	.000	.349	194	.000
Au(ppb)	.445	194	.000	.087	194	.000
As(ppm)	.176	194	.000	.731	194	.000
B(ppm)	.105	194	.000	.927	194	.000
Ba(ppm)	.088	194	.001	.952	194	.000
Be(ppm)	.064	194	.052	.977	194	.002
Bi(ppm)	.154	194	.000	.585	194	.000
Yb(ppm)	.057	194	.200(*)	.961	194	.000
Zn(ppm)	.184	194	.000	.674	194	.000
Zr(ppm)	.111	194	.000	.908	194	.000
Si(%)	.087	194	.001	.963	194	.000
Al(%)	.106	194	.000	.967	194	.000
Fe(%)	.082	194	.003	.965	194	.000
K(%)	.083	194	.002	.963	194	.000
Na(%)	.180	194	.000	.837	194	.000
Ca(%)	.327	194	.000	.391	194	.000
Mg(%)	.142	194	.000	.891	194	.000
COrg(%)	.136	194	.000	.812	194	.000

* Este es un límite inferior de la significación (Sig) verdadera.

Las estadísticas descriptivas resultado del AED para las muestras del horizonte superficial y para el horizonte profundo se presenta en el **Anexo 4**, para cada elemento analizado: límite de detección, método de análisis, histograma de frecuencias, diagrama normal Q-Q, diagrama de caja y tabla con el resumen de las estadísticas.

Las estimaciones de media y mediana difieren entre sí, para todos los elementos con excepción de Eu, Ge, In, La, Nb, Sc, Ta en sedimentos superficiales; y para Gd, Ho, In, Lu, Tm y K en sedimentos profundos. Esto indica que la distribución de los datos para la mayoría de los elementos en ambos horizontes es asimétrica.

La medida de asimetría muestra valores altos para Ag, Au, Bi, Br, Cl, Hg, Pb, S, Sb y Ca en sedimentos profundos y para Au, Br, Cd, Cl, Hg, Mo, Pb, Sb, V y Zn en sedimentos superficiales. Estos elementos presentan una distribución con una cola larga hacia la derecha, propia de distribuciones asimétricas y con valores de concentración alejados y muy altos. Los valores de asimetría, junto con valores de media más altos que los de la mediana, aumentan la estimación de la desviación típica, a tal grado que ésta ya no es útil como una medida de dispersión de los datos.

Los valores altos de curtosis para los elementos Au, Br, Cl, Hg, Mo, Pb, Sb, Tl, V y Zn en sedimentos superficiales y para Ag, Au, Bi, Br, Cl, Hg, Pb, S, Tl y Ca en sedimentos profundos muestran que la distribución de éstos elementos es más puntiaguda que la de una distribución normal.

Los valores de skewness más altos (ordenados de mayor a menor) se presentan en sedimentos superficiales para Cl, Br, Au, Hg, Sb, V, Cd, Mo, Pb, Zn, Tl, Pd, Se, Pt, As, Ag, I, S, C Org, W, C, Ca, Sr, Ni, Hf, N, Zr, Cu, Na, B, Nb y Mg. De los anteriores elementos un caso especial lo constituyen el Zn, Tl, I, Nb y Sr por su distribución muy irregular, y que presentan más de tres casos anómalos hacia los valores mínimos.

En sedimentos profundos los valores de skewness más altos los presentan los elementos Au, S, Pb, Ag, Ca, Cl, Hg, Bi, Br, Sb, Tl, Mo, C, Cd, Se, V, Zn, As, Pt, I, Pd, C Org, Ni, W, Hf, Nb, N, Sr y Cu. Los casos especiales en este medio de muestreo son S, Cl, Bi, C, As, C Org, N y Cu., por lo tanto merecen un análisis especial, que se aborda en el AEDE.

5.5.3.1.2. Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE)

Mediante el análisis Exploratorio de datos espaciales (AEDE) es posible tener una idea más profunda del fenómeno en estudio, antes de tomar decisiones con base en los datos. El AEDE está diseñado para explorar tendencias espaciales, y algunas de las tareas necesarias en estas exploraciones son:

- ❖ Exploración de la distribución de los datos
- ❖ Determinación de “*outliers*” globales y locales
- ❖ Determinación de tendencias globales
- ❖ Examinación de la autocorrelación espacial
- ❖ Determinación de la covariación entre los datos superficiales y profundos

El análisis Exploratorio de datos espaciales (AEDE) para las muestras de sedimentos profundos y superficiales de llanuras de inundación se realizó con el software SPSS para el análisis de histogramas, Q-Q normales, covariación y autocorrelación espacial. Para el cálculo de polígonos de

Voronoi se utilizó el software ArcGIS. Para el cálculo de polígonos de Voronoi se utilizó el software ArcGIS, y para el cálculo de tendencias globales se graficaron los valores de concentración de cada elemento versus el valor de la coordenada en X (y luego en Y) para la determinación del polinomio de tendencia global.

- **Distribución de los datos**

Como análisis previo al análisis geostatístico de los datos, se requiere examinar la forma de distribución de los datos de las muestras superficial y profunda.

Algunos métodos de kriging trabajan mejor si los datos poseen una distribución normal (curva en forma de campana), es decir que tienen una función de densidad de probabilidad que se visualiza como la de la **Figura 18**.

De acuerdo con la revisión de los histogramas (**Anexo 4** - histogramas) para las muestras de sedimentos profundos de llanuras de inundación, presentan una tendencia a distribución normal: elementos de tierras raras Dy, Er, Gd, Ho, Lu, Sm, Tb, Tm, Yb; elementos de transición Y (IIB); Ti, Zr (IVB); Nb, Ta (VB); y el Ge (IVA). Para las muestras de sedimentos superficiales presentan una tendencia a distribución normal: elementos de tierras raras Dy, Er, Ho, La, Lu, Nd, Yb, Tb, Th, Tm; elementos de transición Nb, Ta (VB), Y (IIB); Ti, Zr, Hf (IVB), In (IIIA); y el Ge, Sn (IVA). (**Anexo 4**, histogramas)

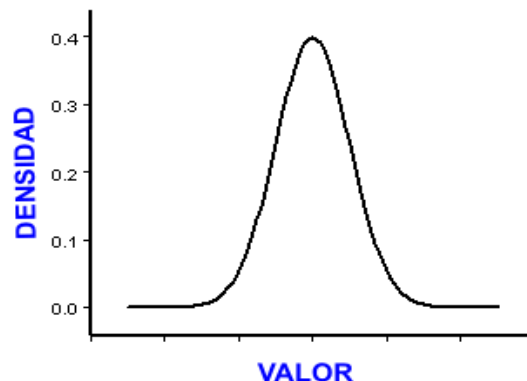


Figura 18. Curva de distribución normal (forma de campana)

Los elementos que requieren transformaciones logarítmicas en sedimentos superficiales son Sr (IIA); Pb (IVA); C, COrg, N (VA); As, Se, S (VIA); Cl, Br, I (halógenos - VIIA), Au, Ag (Preciosos – IB); Cd, Zn (IIB); Hf, Zr (IVB); Nb, V (VB); Mo, W (VIB); y Ni, Pd, Pt (VIIIB). Estos elementos poseen un valor positivo alto de sesgamiento y contienen valores anómalos muy lejos de la distribución y de la mediana (**Anexo 4**, resumen de estadísticas descriptivas).

En el caso del Au, Sr, Hf, Nb, Cl y del I, en los datos de sedimentos superficiales, se deberían eliminar las muestras con datos anómalos para aplicar la transformación logarítmica. Sobre esta nueva población se recalculan las medidas de tendencia central y se realizan los otros cálculos.

Para sedimentos profundos, los elementos Au, Pb, S, y el Cl, requieren no utilizar los datos anómalos, antes de aplicar la transformación logarítmica. Esto no significa que no se tengan en cuenta estas muestras para el análisis posterior al modelamiento geoestadístico, ya que estas muestras son muy importantes para revelar las anomalías geoquímicas, y proporcionar información sobre los sitios en donde se encuentran mayores concentraciones de un elemento específico.

- **Análisis de los diagramas Q-Q normal y Q-Q General**

Estos diagramas se producen realizando una distribución de frecuencia acumulada, ordenando los datos y produciendo una gráfica de los valores ordenados versus los valores de la distribución de frecuencia acumulada $(i - 0.5)/n$, para los valores *i-esimos* ordenados del total de valores n.

El diagrama de Q-Q Normal se hace con los valores de los datos contra los valores normales estándares donde son iguales sus frecuencias acumulativas. Para la distribución acumulativa, los valores de la mediana cortan los datos en dos mitades, mientras que los cuartiles en cuartos y los percentiles en cientos. En este análisis se tomaron los valores de los cuantiles, que dividen los datos en n porcentaje del total de la población. Cuando el diagrama es cercano a una línea recta, los datos se dicen que están normalmente distribuidos.

Al realizar un análisis sobre los diagramas Q-Q normal se extraen las siguientes observaciones:

En sedimentos superficiales, los elementos Zn y Tl (**Figura 19**), que anteriormente se les aplicó una transformación logarítmica, presentan una desviación de la línea central sobre todo en los puntos mínimos y máximos de la distribución, por lo tanto es aconsejable no aplicar ningún tipo de transformación e investigar su tratamiento.

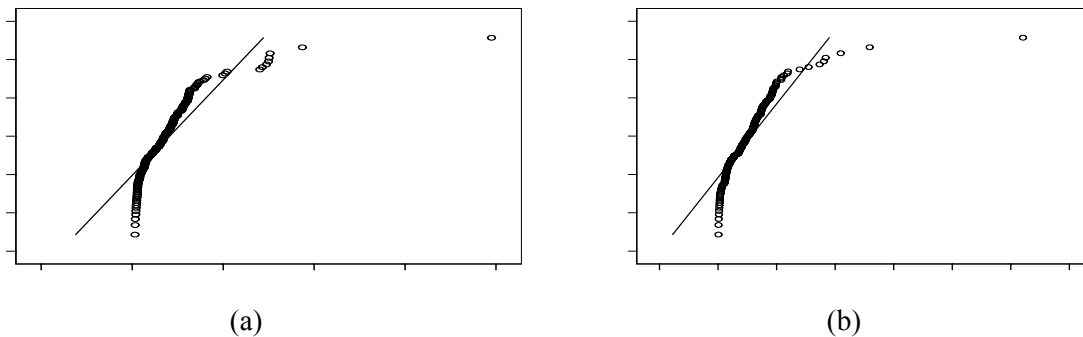


Figura 19. Q-Q normalizado de Zn (a) y de Tl (b) en muestras de sedimentos superficiales

Igualmente el elemento Yodo (I) en sedimentos superficiales (**Figura 20**), posee puntos (sobre todo los máximos) que se alejan fuertemente de la línea central con lo cual se supone que la transformación logarítmica es posible siempre y cuando no influyan las muestras 2115SFS (R. Seco), 1506SFS (R. La Colorada), 1105SFS (Q. Simaña), 0701SFS ((Q. Zapayán), 0311SFS (R. Fundación), 0202SFS (Ary. Jorotuy), 0501SFS (Q. Sillimahana), 0401SFS (R. Ranchería), 2802(GM)SFS (R. Guamal), 3204SFS (C. Suárez) y 3910SFS (R. Querary).

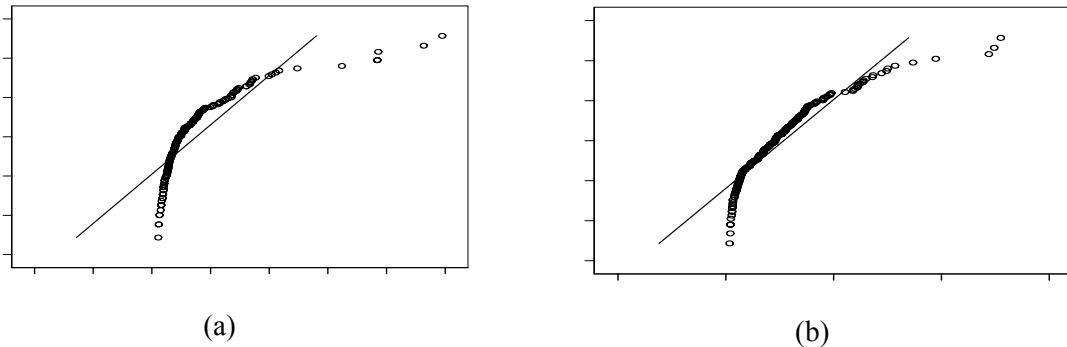


Figura 20. Q-Q normalizado de I (a) y de Sr (d) en muestras de sedimentos superficiales.

Para el estroncio (Sr) (**Figura 20**), se encontró que las muestras 0302SFS (R. Buritaca), 2802SFS (R. Guamal) y 0307SFS (R. Sevilla), tienen datos anómalos que afectan incluso la transformación logarítmica, por lo tanto se procede a recalcular las estadísticas básicas sin estos puntos. El mismo caso se aplica para el elemento niobio (Nb).

En las muestras de sedimentos profundos, los elementos N, As y C luego de aplicar la transformación logarítmica, sus puntos se acercan a la línea recta, y su varianza es más constante. Sin embargo para el Ca, Cu, Sb, Br y N (**Figura 21**), se observa que con los diagramas Q-Q normales la transformación logarítmica no es factible debido a la influencia de valores bajos y algunos valores altos.

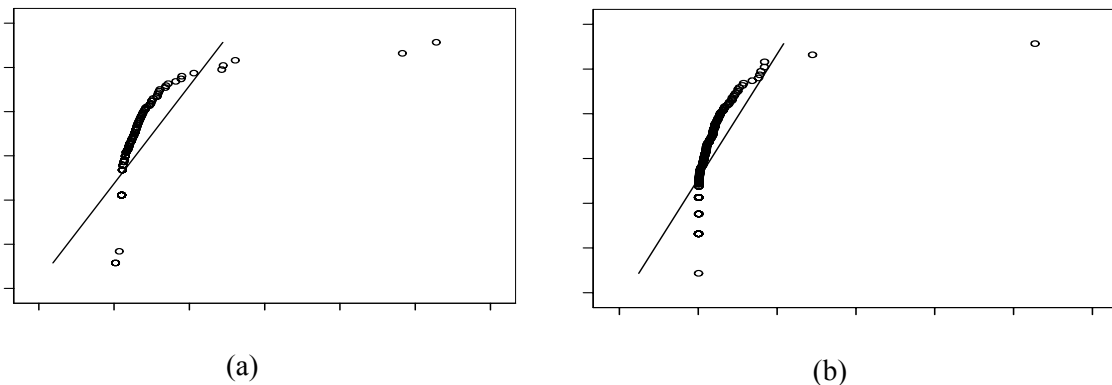


Figura 21. Q-Q normalizado de Br (a) y de Ca (b) en muestras de sedimentos superficiales.

Para la mayoría de los elementos anteriores las muestras correspondientes a los ríos Guaguaqui (2103-I-SFP) y Tigui (1121SFP) influyen en el sesgo y la anomalía de la varianza.

- **Revisión de datos extraños (outliers) locales y globales**

Un outlier global es un dato de muestra que tiene un valor muy alto o muy bajo relativo a todos los valores en un “dataset”. Un “outlier” local es un dato de muestra que tiene un valor que está dentro del rango normal de toda la población de datos de muestreo, pero que en comparación con sus vecinos, es inusualmente bajo o alto.

La **Tabla 18** contiene la lista de los valores anómalos mayores y menores (extremos) para algunos elementos en sedimentos superficiales y profundos, calculados con el “software” SPSS. La lista completa se encuentra en el **Anexo 4**.

Para identificar los “outliers” globales en el histograma se deben buscar los valores inusualmente altos o bajos y dos agrupamientos horizontales distintos de puntos en el semivariograma. Para la identificación de los “outliers” locales, deben existir valores altos del semivariograma asociados con un punto simple en las distancias cercanas del semivariograma. En ciertos casos como en Cl, Au y Hf en sedimentos superficiales y Au, S, Pb y Cl en sedimentos profundos, es necesario remover los valores anómalos (“outliers”) del kriging debido a que pueden causar detrimento en los valores de predicción.

- **Identificación de valores anómalos a partir del histograma**

En esta etapa se seleccionan los puntos en la cola de la distribución, y se observan sus valores con respecto a sus vecinos (es decir que estén rodeados por valores muy diferentes, los cuáles se deben remover (**Figura 22**)). En el **Anexo 4** se presentan los histogramas para todos los elementos analizados tanto para muestras de horizonte superficial como para muestras del horizonte profundo.

Del análisis visual de los histogramas para la determinación de valores anómalos, se presentan los siguientes resultados:

En los sedimentos superficiales las muestras que presentaron mas elementos con valores anómalos o extremos fueron: 0202SFS (cuena del arroyo Jorotuy, Guajira), 1121SFS (cuena del rio Tigui, Antioquia), 2103SFS (cuena del rio Guaguaqui, Magdalena medio) y 2307SFS (caño Maremare-Moral, Casanare).

En los sedimentos profundos las muestras que mas presentaron elementos anómalos o extremos fueron: 1121SFP (cuena del rio Tigui, Antioquia), 1119SFP (cuena del rio Santo Domingo, Bolívar), 0601SFP (Arroyo Grande, Bolívar), 2103SFP (cuena del rio Guaguaqui, Magdalena medio), 0202SFP (cuena del arroyo Jorotuy, Guajira), 0501SFP (Rio Sillimahana, Guajira) y 0708SFP (Arroyo Alferez, Bolívar).

- **Identificación a partir del mapa de Voronoi.**

Adicionalmente con los polígonos de Voronoi coloreados, es factible encontrar los posibles outliers. Los valores de entropía proporcionan una medida de disimilaridad entre las celdas vecinas. Por naturaleza se espera que las muestras más cercanas sean más similares que las que se encuentran más apartadas o elejadas. Por lo tanto los outliers locales son identificados por las áreas de más alta entropía.

Tabla 18. Valores anómalos mayores y menores para los elementos Ag, Au, As, B, Mo, W (extremos - *outliers*).

Elemento	Extremos	No caso	Valor	Elemento	Extremos	No. Caso			
Ag (ppb)	Mayores	1	45	2375.26	B (ppm)	Mayores	1	190	110.3
		2	14	763.88			2	105	91.9
		3	89	567.00			3	158	91.9
		4	7	419.23			4	159	91.9
		5	13	390.98			5	164	84.7
	Menores	1	135	12.00	Menores	1	61	3.0	
		2	184	16.33		2	27	3.3	
		3	133	18.00		3	172	4.4	
		4	194	19.05		4	194	4.4	
		5	175	20.00		5	59	4.4	
Au (ppb)	Mayores	1	45	346.0600	Mo (ppm)	Mayores	1	14	31.784
		2	89	45.3023			2	7	22.797
		3	44	21.5017			3	125	20.260
		4	43	20.5000			4	139	18.242
		5	35	13.5157			5	106	15.178
	Menores	1	119	.2627	Menores	1	181	.058	
		2	60	.2662		2	194	.090	
		3	134	.2985		3	180	.102	
		4	58	.3025		4	133	.104	
		5	20	.3025		5	179	.120	
As (ppm)	Mayores	1	14	34.715	W (ppm)	Mayores	1	14	8.042
		2	44	34.130			2	36	7.649
		3	45	32.384			3	7	6.396
		4	106	19.991			4	16	6.156
		5	139	19.200			5	15	6.100
	Menores	1	61	.291	Menores	1	181	.005	
		2	59	.291		2	180	.023	
		3	60	.388		3	133	.026	
		4	1	.388		4	172	.041	
		5	62	.486(a)		5	194	.060	

Con los mapas de Voronoi con el método de *clústeres*, se identifican aquellas celdas que son más disímiles que sus vecinos. Se esperaría que el valor registrado en una celda particular sea similar a por lo menos uno de sus vecinos. Por lo tanto, estos mapas también se pueden usar para identificar posibles *outliers*.

Los mapas de Voronoi son construidos de una serie de polígonos formados alrededor de la ubicación de una muestra. Los polígonos de Voronoi se crean de tal manera que cada sitio dentro del polígono es más cercano al punto de muestra en el polígono que a cualquier otro (**Figura 23**). Usando esta definición de vecinos, se pueden calcular las estadísticas locales.

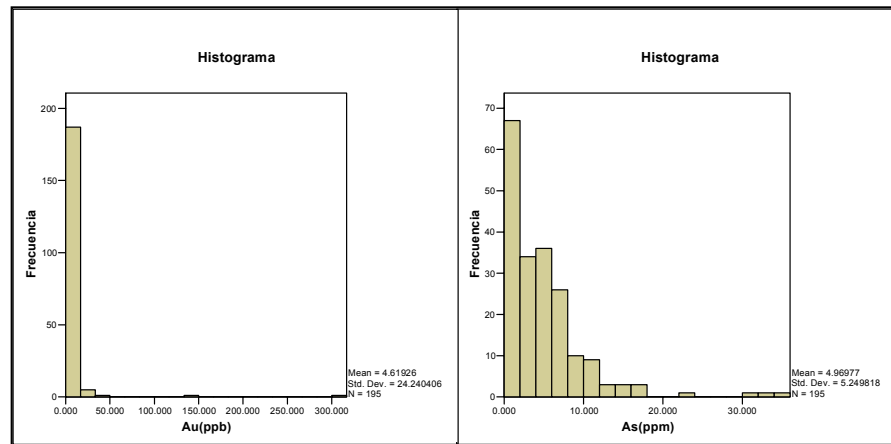


Figura 22. Histograma de Au (a) y de As (b) en muestras de sedimentos superficiales.

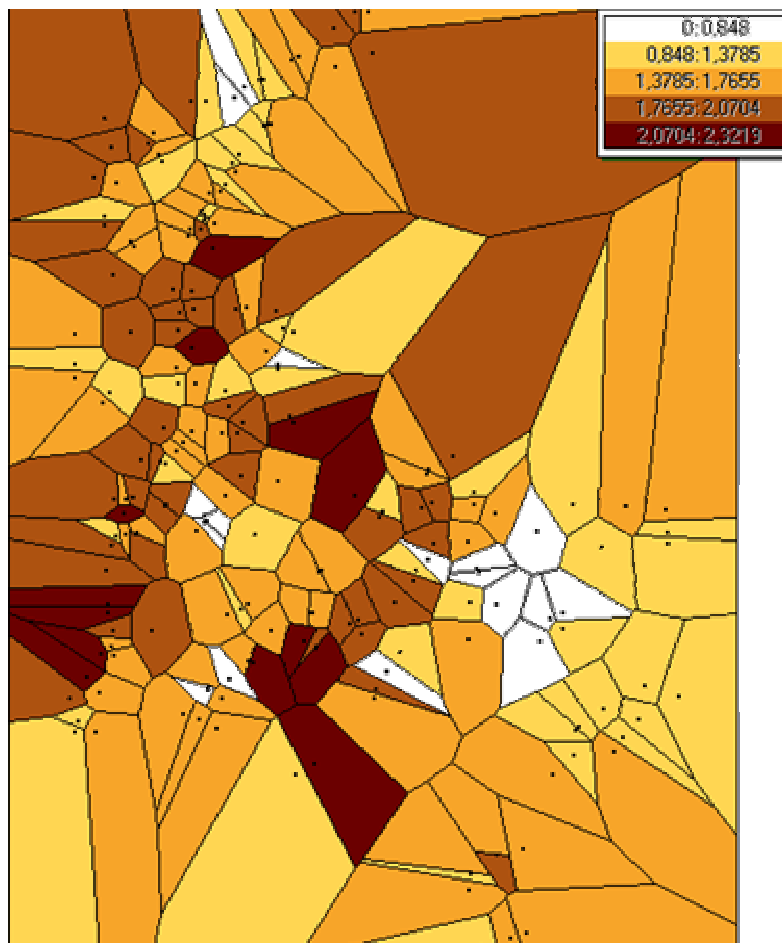


Figura 23. Mapa de Voronoi de entropía para C (carbono) en sedimentos superficiales

La media local se puede calcular tomando el promedio de los puntos de muestra de los polígonos que están en contacto entre sí. Este promedio es asignado al polígono que se encuentra en el centro de los otros polígonos. Este proceso se repite para cada uno de los polígonos y sus respectivos vecinos, y con la escala de colores se muestran los resultados para los elementos en sedimentos superficiales y profundos, con lo cual se pueden visualizar las regiones de valores altos y bajos.

De la misma manera se puede calcular la moda (valor más frecuente dentro de una clase). El valor asignado a la celda es la moda de la celda y de sus vecinos. Para calcular los clusters todas las celdas son ubicadas en cinco intervalos de clase. Si el intervalo de clase de una celda es diferente de cada uno de sus vecinos, la celda se colorea con gris para distinguirla de sus vecinos.

Para el cálculos de la entropía, todas las celdas son ubicadas en cinco intervalos de clases basadas en una agrupamiento natural de valores (cuantiles inteligentes, o “*smart quantiles*”). El valor asignado a cada celda es calculado de la celda y sus vecinos de la siguiente fórmula:

$$\text{Entropia} = - \sum (p_i * \text{Log } p_i),$$

Donde p_i es la proporción de celdas que están siendo asignadas a cada clase.

Los Cuantiles Inteligentes son usados para delinear clases basados en el agrupamiento natural de los datos. Los puntos de corte son identificados al observar los agrupamientos y patrones inherentes en los datos. Estos puntos de corte son definidos de acuerdo a si existen saltos en los valores de los datos, de tal manera que los grupos con valores similares son colocados en la misma clase. Existe un balance entre la definición de intervalos iguales y cuantiles, con intervalos de diferentes tamaños pero de manera que el cuantil es un poco más ancho en los extremos.

En el **Anexo 4** se presentan los mapas principales de polígonos de Voronoi por el método de entropía para sedimentos superficiales y profundos.

- **Determinación de las tendencias globales**

El propósito de identificar y cuantificar la tendencia es el de ganar un entendimiento más profundo de los datos y por lo tanto tomar mejores decisiones. Si se remueve la tendencia, se podrá modelar más exactamente la variación aleatoria en el rango corto porque la tendencia global no influirá en los análisis espaciales.

Una superficie está compuesta de dos principales componentes: una tendencia global y una variación aleatoria de rango corto. La tendencia global generalmente se le conoce (Cressie, 1993) como la estructura media fija (Fixed Mean Structure). La variación aleatoria en el rango cercano (conocida también como el error aleatorio) se puede modelar en dos partes: la autocorrelación espacial y el efecto nugget. Para el cálculo de las tendencias globales en los datos se utilizó el método descrito en Bishop, 1995. En este método se *plotean* las muestras en un plano x, y y en el eje z se *plotean* los valores correspondientes a la variable en estudio. Los valores luego son proyectados en el plano x,z y en el plano y,z como puntos, de acuerdo al ángulo ϕ de orientación del eje x,y . Luego se ajustan una serie de polinomios en esos puntos proyectados. Si existe una tendencia global, entonces se debe decidir cómo modelarla, bien sea utilizando un método determinístico (IDW, polinomios Locales, Funciones de Base Radial, entre otros) o un método geoestadístico (Kriging).

Si se modela sólo la tendencia global para crear una superficie suavizada, se puede usar un método de interpolación polinomial local o global para crear la superficie final. Si se desea incorporar la tendencia en el método geoestadístico (es decir, removerla y luego modelar el componente remanente como una variación aleatoria en el rango corto) se debe proceder a remover la tendencia. La razón principal para remover una tendencia en geoestadística es la de satisfacer la hipótesis de la estacionariedad. Las tendencias sólo se deben remover si hay justificación para ello (Kriging residual). Si se remueve la tendencia global en un método geoestadístico, se estará modelando únicamente la variación en el rango corto en los datos residuos (los datos sin tendencia, son denominados residuales). Sin embargo antes de hacer una predicción actual, la tendencia se agregará nuevamente para obtener resultados razonables.

Por otro lado si se descomponen los datos en tendencias globales más variaciones en el rango corto, se asume que la tendencia es fija y que la variación en el rango corto es aleatoria. De manera tal que la “aleatoriedad” anterior no significa sin predicción, sino que está gobernada por reglas de probabilidad que incluyen dependencia sobre los valores vecinos, dicho de otra manera es la autocorrelación. La superficie final será la suma de las superficies determinísticas y aleatorias.

5.5.3.2. Mapas de concentración de elementos por cuencas

Las **Tablas 19 y 20** muestran los percentiles de los datos de los elementos en sedimentos superficiales (A_{0-25}) y en sedimentos profundos (hasta 200cm), es decir los valores de concentración que dividen los datos en grupo, de forma que un porcentaje de los casos se encuentra por debajo del percentil dado.

Los datos completos para los percentiles correspondientes a las muestras en el horizonte superficial y en el horizonte profundo se presentan en el **Anexo 4**. Con los rangos proporcionados se elaboraron las escalas nominales de variación del color para cada uno de los 71 mapas de concentración de elementos por cuencas para sedimentos superficiales y profundos.

En el **Anexo 5** se presentan los mapas de distribución de elementos por cuencas, por pares de elementos para las muestras del horizonte superficial y del horizonte profundo de sedimentos de planicie de inundación.

5.5.3.3. Tratamiento estadístico multivariado

Con los datos transformados a logaritmo (debido a que la mayoría de los datos presentan skewness positivos) se efectuaron cálculos de correlación entre los elementos en cada medio de muestreo superficial y profundo. Se calcularon correlaciones bivariadas y se ejecutaron análisis de factores y conglomerados jerárquicos. Las correlaciones se evaluaron con el método de Pearson.

El análisis de factores se desarrolló usando componentes principales y rotación varimax. El análisis de conglomerados se usó como otra forma de encontrar relaciones entre elementos químicos en cada medio, para lo cual se utilizó el método de conglomerados jerárquicos intergrupos usando coeficientes de correlación para agrupar las variables (71 elementos químicos) en grupos y para la interpretación de éste análisis se usó el dendrograma. La matriz básica de datos en cada medio de muestreo fué sometida a distintos análisis multivariados utilizando los programas SPSS y Geosoft. Un análisis de agrupamiento a partir de una matriz de correlación bivariada en cada medio de muestreo, un análisis de ordenamiento (ACP) en cada medio y un análisis conglomerados jerárquicos o árboles de consenso (Berstein, 1988; Bisquerra, 1989; Comrey, 1985; Cuadras, 1981).

Tabla 19. Percentiles de los datos de concentración de los elementos en el horizonte superficial (A₀₋₂₅)

	Ag(ppb)	Au(ppb)	As(ppm)	B(ppm)	Ba(ppm)	Be(ppm)	Bi(ppm)	Br (ppm)	C(%)	Cd(ppb)	Ce(ppm)
Mínimo	11	0,24	0,29	3,31	8,20	0,14	0,03	0,20	0,22	1,77	1,87
25	50	0,75	1,50	18,86	120,10	0,77	0,12	1,00	0,54	86,42	33,77
50	87,46	1,09	3,67	30,94	376,80	1,57	0,20	2,30	0,85	180,90	57,12
75	143,51	1,84	6,58	49,44	578,20	2,00	0,28	4,50	1,26	427,20	76,97
90	236,17	4,36	10,76	64,05	731,80	2,54	0,39	7,14	1,87	1180,00	89,89
95	306,784	10,60	14,19	72,49	820,20	2,75	0,42	9,50	2,17	2939,52	105,83
Máximo	731,11	306,13	35,30	143,02	1021,00	3,99	0,52	112,40	4,75	11470,00	143,45

	Cl(ppm)	Co(ppm)	Cr(ppm)	Cs(ppm)	Cu(ppm)	Dy(ppm)	Er(ppm)	Eu(ppm)	F(ppm)	Ga(ppm)	Gd(ppm)
Mínimo	19,20	0,94	7,30	0,04	1,00	0,26	0,20	0,03	35,68	2,06	0,15
25	37,93	3,14	33,90	1,45	4,44	2,97	1,78	0,61	150,07	9,90	2,97
50	48,22	9,10	55,71	3,19	17,23	4,32	2,54	1,10	297,24	15,60	4,78
75	71,62	12,70	77,20	4,82	28,64	5,47	3,08	1,36	407,79	19,16	5,95
90	127,32	17,10	97,98	6,11	45,30	6,32	3,60	1,63	487,35	22,27	7,20
95	235,67	20,78	117,15	7,29	59,03	6,72	3,93	1,78	554,85	24,50	7,98
Máximo	19598,45	34,18	189,37	11,13	90,76	9,10	5,14	2,24	817,34	33,90	11,41

	Ge(ppm)	Hf(ppm)	Hg(ppb)	Ho(ppm)	I(ppm)	In(ppm)	La(ppm)	Li(ppm)	Lu(ppm)	Mn(ppm)	Mo(ppm)
Mínimo	0,81	0,92	3,74	0,060	0,22	0,0005	1,14	2,66	0,049	6,00	0,04
25	1,16	8,00	17,13	0,629	0,58	0,0294	17,84	12,79	0,300	77,50	0,57
50	1,35	10,66	27,84	0,931	0,92	0,0516	29,85	27,10	0,404	350,80	0,99
75	1,55	14,38	43,31	1,123	1,72	0,0651	39,10	38,06	0,501	618,40	1,66
90	1,74	22,04	75,40	1,299	3,22	0,0736	47,00	52,07	0,571	868,94	3,41
95	1,85	28,08	118,97	1,456	4,25	0,0841	55,83	69,84	0,634	1049,96	7,17
Máximo	2,13	40,78	1395,71	2,007	9,90	0,1235	90,50	98,95	0,809	1811,50	28,69

	Nb(ppm)	Nd(ppm)	Ni(ppm)	P(ppm)	Pb(ppm)	Pr(ppm)	Pd(ppb)	Pt(ppb)	Rb (ppm)	S(ppm)	Sb(ppm)
Mínimo	3,70	0,75	0,90	40,50	2,39	0,20	0,04	0,06	2,40	30,62	0,14
25	11,78	16,69	9,30	260,70	10,53	4,41	0,20	0,16	24,00	103,02	0,21
50	16,08	27,02	18,50	512,70	16,44	7,26	0,30	0,28	64,10	158,93	0,33
75	20,16	35,30	28,60	749,70	22,34	9,75	0,54	0,40	87,80	294,33	0,60
90	24,34	42,02	46,84	978,72	27,30	11,43	0,81	0,65	103,38	504,21	1,06
95	28,02	49,54	56,89	1118,58	31,95	14,02	1,16	0,90	123,36	698,00	1,89
Máximo	47,70	66,39	101,70	1702,77	123,87	18,49	3,33	2,53	152,20	1592,40	12,74

	Sc(ppm)	Se(ppm)	Sm(ppm)	Sn(ppm)	Sr(ppm)	Ta(ppm)	Tb(ppm)	Th(ppm)	Ti(ppm)	Tl(ppm)	Tm(ppm)
Mínimo	0,13	0,020	0,12	0,46	7,20	0,08	0,04	0,16	436,80	0,01	0,04
25	5,88	0,169	3,13	1,27	39,70	0,89	0,52	6,16	3479,00	0,21	0,29
50	11,48	0,320	5,27	1,72	91,30	1,36	0,79	10,04	4415,30	0,51	0,40
75	15,54	0,617	6,69	2,65	143,30	1,74	0,99	14,20	5353,20	0,74	0,48
90	19,79	1,170	8,01	3,52	237,82	2,26	1,12	17,05	6538,30	0,97	0,56
95	23,53	2,823	8,70	3,92	276,30	2,82	1,25	19,06	7522,00	1,19	0,63
Máximo	38,80	6,055	12,25	5,63	510,10	3,54	1,67	30,31	12891,40	5,21	0,76

	U(ppm)	V(ppm)	W(ppm)	Y(ppm)	Yb(ppm)	Zn(ppm)	Zr(ppm)	Si(%)	Al(%)	Fe(%)	K(%)
Mínimo	0,33	2,3	0,004	3,88	0,30	6,22	60,80	18,94	0,032	0,047	0,008
25	1,55	52,5	0,722	19,79	1,91	29,30	274,40	29,23	5,466	1,397	0,461
50	2,40	94,9	1,434	28,05	2,60	71,94	365,10	32,46	7,217	2,985	1,211
75	3,32	137,2	2,230	33,86	3,19	109,00	460,90	38,33	8,661	3,887	1,798
90	4,06	186,0	3,638	38,43	3,86	137,85	769,26	42,19	9,833	4,434	2,111
95	4,50	245,9	4,568	41,54	4,15	205,30	895,82	42,55	10,813	5,574	2,421
Máximo	5,87	1006,2	9,809	54,98	5,44	790,21	1193,90	44,86	13,434	7,937	3,252

	N (ppm)	Na(%)	Ca(%)	Mg(%)	COrg(%)
Mínimo	113,18	0,014	0,021	0,003	0,16
25	454,47	0,067	0,029	0,088	0,41
50	785,93	0,362	0,386	0,407	0,68
75	1291,66	1,080	0,982	0,777	1,05
90	1819,26	1,493	1,903	1,275	1,56
95	2212,59	2,132	2,451	1,472	1,80
Máximo	4380,71	2,600	4,526	1,949	4,54

Tabla 20. Percentiles de los datos de concentración de los elementos en el horizonte profundo (hasta 200cm)

	Ag(ppb)	Au(ppb)	As(ppm)	B(ppm)	Ba(ppm)	Be(ppm)	Bi(ppm)	Br (ppm)	C(%)	Cd(ppb)	Ce(ppm)
Mínimo	12	0,26	0,29	3,04	8,10	0,14	0,03	0,20	0,16	5,52	3,33
25	49,52	0,65	1,67	17,17	133,74	0,96	0,12	1,00	0,34	83,83	35,99
50	78,50	0,97	3,94	28,76	365,40	1,56	0,20	1,50	0,48	193,45	52,24
75	128,02	1,62	6,79	44,76	587,02	2,01	0,29	3,03	0,86	469,78	74,13
90	202,84	3,72	10,89	63,41	743,20	2,51	0,37	5,10	1,13	1197,50	85,84
95	284,08	5,95	13,60	78,48	851,18	2,70	0,42	7,45	1,72	3673,50	97,39
Máximo	2375,26	346,06	34,72	110,29	1189,20	3,79	2,19	42,80	5,47	11010,00	138,21

	Cl(ppm)	Co(ppm)	Cr(ppm)	Cs(ppm)	Cu(ppm)	Dy(ppm)	Er(ppm)	Eu(ppm)	F(ppm)	Ga(ppm)	Gd(ppm)
Mínimo	12	0,83	3,65	0,05	0,80	0,48	0,27	0,04	35,40	1,86	0,34
25	33,81	3,03	29,53	1,43	5,60	2,88	1,75	0,66	147,80	8,87	2,89
50	43,14	8,49	55,09	2,90	15,20	4,15	2,40	1,07	296,76	14,99	4,50
75	76,77	13,60	74,08	4,90	29,10	5,32	3,09	1,33	403,48	19,42	5,82
90	141,25	19,80	102,75	6,25	45,22	6,21	3,46	1,62	505,07	23,25	6,93
95	648,67	23,88	143,71	7,87	52,78	6,83	4,05	1,75	556,42	26,09	7,97
Máximo	9430,36	44,04	190,33	10,92	97,55	9,55	6,41	1,90	672,18	32,20	9,21

	Ge(ppm)	Hf(ppm)	Hg(ppb)	Ho(ppm)	I(ppm)	In(ppm)	La(ppm)	Li(ppm)	Lu(ppm)	Mn(ppm)	Mo(ppm)
Mínimo	0,50	1,43	4,28	0,10	0,16	0,0005	1,62	3,05	0,05	5,86	0,06
25	1,20	7,19	14,34	0,61	0,53	0,0279	18,80	13,42	0,29	85,96	0,50
50	1,36	10,27	25,71	0,87	0,78	0,0502	27,53	25,47	0,38	305,25	0,90
75	1,60	13,60	41,79	1,10	1,71	0,0655	37,76	39,49	0,48	624,40	1,67
90	1,76	21,29	72,38	1,26	3,76	0,0771	43,67	52,39	0,58	893,45	3,17
95	1,91	24,36	98,81	1,48	7,48	0,0842	49,54	65,98	0,64	1041,75	7,18
Máximo	2,60	48,29	631,01	2,06	10,45	0,1179	80,49	102,37	1,19	2138,90	31,78

	N (ppm)	Nb(ppm)	Nd(ppm)	Ni(ppm)	P(ppm)	Pb(ppm)	Pr(ppm)	Pd(ppb)	Pt(ppb)	Rb (ppm)	S(ppm)
Mínimo	120,73	4,40	1,61	0,50	44,10	3,64	0,40	0,02	0,06	2,20	29,25
25	237,15	11,24	17,07	8,25	226,07	10,80	4,71	0,16	0,15	29,63	67,92
50	521,11	14,50	25,47	18,78	520,10	15,47	6,78	0,30	0,25	60,55	129,00
75	780,53	19,69	34,36	29,80	731,80	21,78	9,38	0,50	0,44	80,68	223,92
90	1184,00	23,57	40,50	45,22	893,95	26,73	10,98	0,85	0,73	108,95	418,76
95	1570,80	27,96	44,53	63,05	1025,26	31,07	12,16	1,19	0,95	121,85	758,21
Máximo	2826,34	58,60	61,75	125,60	1782,58	254,07	17,45	2,49	2,32	163,10	17934,00

	Sb(ppm)	Sc(ppm)	Se(ppm)	Sm(ppm)	Sn(ppm)	Sr(ppm)	Ta(ppm)	Tb(ppm)	Th(ppm)	Ti(ppm)	Tl(ppm)
Mínimo	0,13	0,24	0,02	0,27	0,48	7,30	0,08	0,07	0,28	400,70	0,01
25	0,19	5,44	0,12	3,25	1,22	41,13	0,82	0,51	5,64	3037,05	0,23
50	0,33	10,97	0,22	4,94	1,67	86,70	1,22	0,76	9,57	4218,10	0,48
75	0,63	15,33	0,50	6,41	2,55	152,70	1,63	0,97	14,36	5280,88	0,74
90	1,14	19,62	0,99	7,68	3,18	253,45	2,09	1,13	16,81	6205,00	1,00
95	1,92	22,29	1,83	8,43	3,55	300,50	2,49	1,21	19,08	6754,50	1,44
Máximo	10,54	35,34	5,80	10,44	4,97	504,10	4,03	1,54	27,64	15032,80	6,07

	Tm(ppm)	U(ppm)	V(ppm)	W(ppm)	Y(ppm)	Yb(ppm)	Zn(ppm)	Zr(ppm)	Si(%)	Al(%)	Fe(%)
Mínimo	0,05	0,40	3,94	0,005	4,69	0,32	6,12	81,60	13,27	0,194	0,061
25	0,28	1,46	47,31	0,639	20,69	1,82	32,03	242,68	28,85	4,157	1,469
50	0,38	2,18	89,49	1,197	26,36	2,47	66,36	339,55	32,66	6,993	3,097
75	0,48	3,28	134,76	2,074	32,96	3,13	104,23	449,48	37,99	8,696	3,902
90	0,56	4,10	195,83	3,544	36,72	3,59	139,46	632,50	42,22	9,915	4,735
95	0,62	4,56	271,92	5,078	40,71	4,27	247,45	796,95	43,16	11,316	5,478
Máximo	1,10	7,78	914,35	8,042	70,18	8,04	779,61	1163,60	43,80	13,481	7,469

	K(%)	Na(%)	Ca(%)	Mg(%)	COrg(%)
Mínimo	0,008	0,015	0,021	0,005	0,09
25	0,494	0,077	0,029	0,101	0,25
50	1,235	0,365	0,363	0,406	0,38
75	1,800	1,031	1,010	0,860	0,65
90	2,149	1,784	2,069	1,264	0,83
95	2,446	2,164	2,831	1,568	1,10
Máximo	3,045	2,592	21,363	2,037	2,55

5.5.3.3.1. Correlaciones

Es muy importante considerar la aportación de información independiente que cada variable (elemento) hace al total; o dicho de otra forma, asegurar que representen dimensiones distintas dentro del conjunto total de datos y que no sean estadísticamente redundantes. Esto puede hacerse por medio de una matriz de correlaciones en donde se observen las correlaciones bivariadas entre cada uno de los diferentes pares posibles de variables (elementos) en cada medio de muestreo.

Aunque este análisis arroje un número considerable de altas correlaciones entre pares será preferible mantener todas las variables dentro de nuestro modelo sin eliminar, agregar o suprimir alguna variable. La razón estriba en la posibilidad de establecer relaciones de causalidad y, también de ofrecer información que puede ser de interés para distintos fines analíticos.

Siendo significativo el número de correlaciones elevadas entre pares de variables, será útil llevar a cabo un análisis de factores o “factorial” para explorar la posibilidad de reducir las dimensiones o el número de variables incluidas en el modelo (simplificándolo) sin perder información relevante. Para cumplir con lo anterior se lleva a cabo un análisis de Componentes Principales. A su vez éste análisis puede resultar en componentes principales o en agrupamientos que permitan alguna interpretación razonable.

- **Correlación de Pearson**

El coeficiente de correlación de Pearson, (al igual que otros como el de Spearman, etc.) valora hasta qué punto el valor de una de las variables aumenta o disminuye cuando crece el valor de la otra. Cuando se dispone de todos los datos, un modo sencillo de comprobar, gráficamente, si existe una correlación alta, es mediante diagramas de dispersión, donde se confronta, en el eje horizontal, el valor de una variable y en el eje vertical el valor de la otra.

Un ejemplo del diagrama de dispersión para sedimentos superficiales se observa en la **Figura 24**, en la cuál se efectuó la correlación entre seis elementos.

Un ejemplo del diagrama de dispersión para sedimentos profundos se observa en la **Figura 25**, en la cuál se efectuó la correlación entre seis elementos.

Las **Figuras 24 y 25** evidencian la existencia de relaciones directas entre los elementos o correlaciones entre sus concentraciones en cada grupo de muestras, y valoran hasta qué punto dicha relación puede modelarse por la ecuación de una recta. Los colores permiten identificar fácilmente los valores con una significancia muy fuerte o fuerte de los coeficientes calculados (púrpura mayor correlación a gris menor correlación). Este tipo de gráfico es útil en la etapa de selección de variables cuando se ajusta un modelo de regresión lineal.

Las correlaciones significativas se indican en cada tabla con los colores fucsia para las más altas y con color azul para las más débiles. Por ejemplo, la correlación Ba-Be, que es altamente significativa, indica que al aumentar la concentración de Bario también aumenta la concentración de Berilio y viceversa.

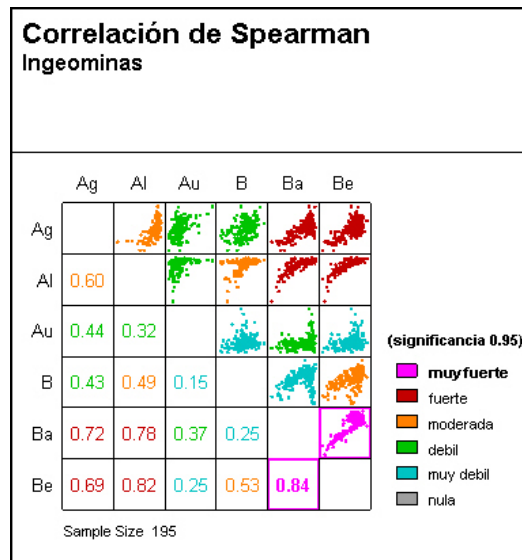


Figura 24. Correlación de Spearman con diagrama de dispersión para sedimentos superficiales (A₀₋₂₅)

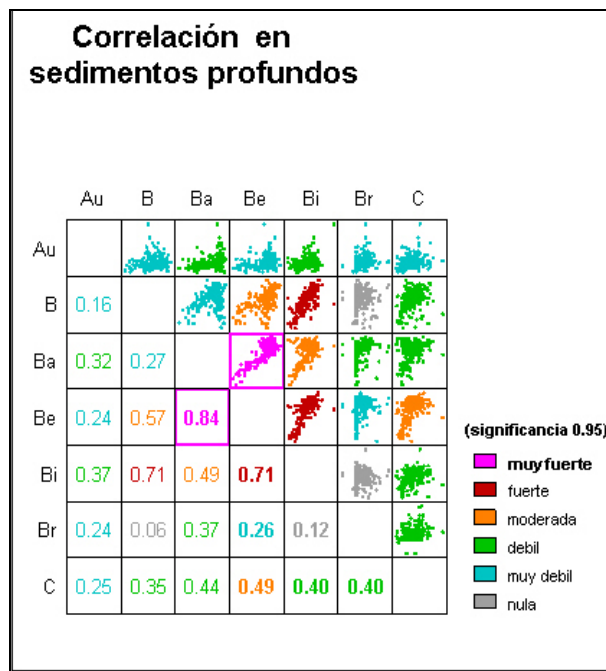


Figura 25. Correlación de Spearman con diagrama de dispersión para sedimentos profundos (hasta 200 cm).

La matriz de correlación para todos los elementos se presenta en el **Anexo 4**. Las correlaciones encontradas entre pares de elementos o bivariadas, indican la existencia de relaciones positivas y muy significativas entre variables.

En muestras superficiales de sedimentos de planicie de inundación se presentaron relaciones positivas y muy significativas entre:

- Ba-Be, y
- Ag-Zn

En muestras de sedimentos profundos se presentaron correlaciones bivariadas positivas y muy significativas entre:

- C-N,
- Cd-Zn, y
- Cs-Li

Las correlaciones significativas que se presentan mas comúnmente en muestras tanto superficiales como profundas se presentan en la **Tabla 21**.

Tabla 21. Principales correlaciones encontradas en muestras superficiales y profundas

	Ba	Be	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	F	Ga	Gd	Ho	La	Lu	Mn	Nd	Ni	N	P	Pb	Pr	Rb	Sc	Sm	Sr	Ta	Tb	Th	Tl	Tl	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zn	Al	Fe	Na	K	Mg												
Ba	X						X				X	X					X							X	X																															
Be		X																																																						
Ce			X																																																					
Co				X																																																				
Cr					X																																																			
Cs						X																																																		
Cu							X																																																	
Dy								X																																																
Er									X																																															
Eu										X																																														
F											X																																													
Ga												X																																												
Gd													X																																											

En orden de importancia de mayor a menor las correlaciones mas significativas son:

- Ba con Be, Co, Cu, Eu, F, Mn, Ni, Rb, Sc, Sr, Tl, Zn, Fe, K, Na, Mg.
- Bi con Cs, Pb, Th, U
- Ce con Be, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Ta, Tb, Th, Tl, Tm, Y, Yb, Al.
- Co con Cu, F, Mn, Ni, Zn, Fe, Na, Mg, Ba
- Cr con Ga, N, Sc, V, Fe.
- Cs con Ga, N, Sc, V, Fe
- Cu con Ba, Co, Fe, Mn, Ni, Zn, Na, Mg
- Dy con Be, Ce, Er, Eu, Ga, gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, Tm, Y, Yb, Al.
- Er con Ce, Dy, Eu, Ga, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, Ti, Tm, Y, Yb.
- Eu con Ba, Be, Ce, Dy, Er, F, Ga, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Ni, Pr, Rb, Sc, Sm, Sr, Tb, Th, Tl, Tm, V, Yb, Zn, Al, Fe, K, Mg.
- F con Ba, Be, Co, Cu, Eu, Ga, Gd, Ni, P, Rb, Sc, Sm, Sr, Tl, Zn, Fe, K, Mg.
- Ga con Be, Ce, Cr, Dy, Er, Eu, F, Gd, Ho, Nd, Ni, Pr, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, Tl, V, W, Al, Fe, Mg.
- Gd con Be, Ce, Dy, Er, Eu, F, Ga, Ho, La, Lu, Nd, Ni, Pr, Rb, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, Tm, V, Y, Yb, Al, Fe, K.

5.5.3.3.2. Análisis de componentes principales y análisis de factores

El Análisis de Correlaciones bivariadas es el primer paso que se realiza en el análisis multivariado de los elementos químicos de las muestras UBD. Este análisis tiene en cuenta acumulativamente la variabilidad de la distribución de los elementos químicos de las muestras por medio de sus vectores propios. Es un análisis más de tipo matemático que estadístico a diferencia del método de Análisis de Factores.

El Análisis Factorial y el Análisis de Componentes Principales son métodos muy relacionados. Algunos autores consideran el segundo como una etapa del primero y otros los consideran como técnicas diferentes. El Análisis de Componentes Principales trata de hallar componentes (factores) que sucesivamente expliquen la mayor parte de la varianza total. Por su parte el Análisis Factorial busca factores que expliquen la mayor parte de la varianza común.

En el Análisis Factorial se distingue entre varianza común y varianza única. La varianza común es la parte de la variación de la variable que es compartida con las otras variables. La varianza única es la parte de la variación de la variable que es propia de esa variable. El Análisis de Componentes Principales no hace esa distinción entre los dos tipos de varianza, se centra en la varianza total. Mientras que el Análisis de Componentes Principales busca hallar combinaciones lineales de las variables originales que expliquen la mayor parte de la variación total; el Análisis Factorial pretende hallar un nuevo conjunto de variables, menor en número que las variables originales, que exprese lo que es común a esas variables. El Análisis Factorial supone que existe un factor común subyacente a todas las variables, el Análisis de Componentes Principales no hace tal asunción.

En el Análisis de Componentes Principales, el primer factor o componente sería aquel que explica una mayor parte de la varianza total, el segundo factor sería aquel que explica la mayor parte de la varianza restante, es decir, de la que no explicaba el primero y así sucesivamente. De este modo sería posible obtener tantos componentes como variables originales aunque esto en la práctica no tiene sentido.

Inicialmente se calcula la matriz de correlación utilizando todas las variables (elementos químicos analizados) para las muestras en sedimentos superficiales y profundos. La matriz se utiliza para calcular nuevamente unas variables de tipo artificial llamadas “vectores propios”, los cuales se distinguen porque el valor de cada vector propio (llamados valores propios) indica la contribución de la variable artificial o factor a la variación de todo el conjunto de muestras (**Tablas 22 y 23**). Se calculan las cargas (loadings) y los puntajes (scores), para los primeros 10 componentes principales. Las cargas muestran la influencia de cada elemento dentro del factor (variable artificial). Los puntajes son números que muestran la influencia de cada vector propio sobre una muestra específica, ya sean de sedimentos superficiales o profundos.

Se utilizó el análisis de factores como mecanismo adicional para examinar las relaciones entre las variables por medio de un modelo teórico, se efectuó análisis de componentes principales como método para extracción de factores y se realizó rotación Varimax para facilitar la interpretación de la matriz de componentes. En el primer paso de análisis de factores se realizó la extracción de las comunalidades por componentes principales, las cuáles son estimativas de la varianza.

La matriz de correlación de vectores propios (primeros 20 factores) para sedimentos superficiales se presenta en la **Tabla 22**. La matriz completa se presenta en el **Anexo 4**. Los datos indican que los 10 primeros factores cuentan sobre el 90 % acumulado de la varianza total.

La matriz de correlación de vectores propios (primeros 20 factores) para sedimentos profundos se presenta en la **Tabla 23**. Los datos indican que para las muestras del horizonte profundo, los 11 primeros factores cuentan sobre el 90 % acumulado de la varianza total.

Se calcularon las cargas (loadings) y los puntajes (scores), para los primeros 10 componentes principales. Las cargas muestran la influencia de cada elemento dentro del factor (variable artificial). Los puntajes son números que muestran la influencia de cada vector propio sobre una muestra específica, ya sean de sedimentos superficiales o profundos.

En sedimentos superficiales los elementos que se relacionan más fuertemente con el Componente 1 y con el Componente 2 se presentan en las **Tablas 24 y 25**. En sedimentos profundos los elementos que se relacionan más fuertemente con el Componente 1 y con el Componente 2 se presentan en las **Tablas 26 y 27**.

En la **Tabla 28** se muestran los resultados de las cargas de cada elemento para cada Componente Principal, en muestras de sedimentos superficiales. Debe tenerse en cuenta que los 3 primeros componentes principales son los que realmente cuentan ya que son los que tienen el mayor peso sobre el acumulado de las varianzas

De acuerdo con los resultados presentados en la **Tabla 28**, en sedimentos superficiales se identifican tres asociaciones estadísticas principales correspondientes a cada factor, las cuáles explican la mayor parte de la varianza total, así:

- **Componente principal 1: Eu, Gd, Sm, Tb, Sc, Ga, Be, Nd y Dy** (en este orden).
- **Componente principal 2: Zr, Hf, Nb y Sn**
- **Componente principal 3: Na y Hf** (explican la mayor parte del 2% de la varianza total)

En la **Tabla 29** se muestran los resultados de las cargas de cada elemento para cada Componente Principal, en muestras de sedimentos profundos. De acuerdo con los resultados presentados en la **Tabla 29**, en sedimentos profundos se identifican tres asociaciones estadísticas principales correspondientes a cada factor, las cuáles explican la mayor parte de la varianza total, así:

- **Componente principal 1: Eu, Gd, Sm, Be, Sc, Ga y Tb** (en este orden)
- **Componente principal 2: Hf, Zr, Nb y Sn**
- **Componente principal 3: Na, Sr y Cl** (elementos con mayor peso sobre esta variable artificial).
- **Dendograma**

Es una representación visual de los pasos de una solución de conglomeración jerárquica que muestra, para cada paso, los conglomerados que se combinan y los valores de los coeficientes de distancia. Las líneas verticales conectadas designan casos combinados. El dendrograma re-escala las distancias reales a valores entre 0 y 25, preservando la razón de las distancias entre los pasos.

Tabla 22. Matriz de correlación de vectores propios para sedimentos superficiales (primeros 20 factores)

Factor	Valor propio	% acum.	Factor	Valor propio	% acum.
1	42.91	61.3	11	0.631	91.1
2	6.642	70.8	12	0.578	91.9
3	3.736	76.1	13	0.526	92.6
4	2.357	79.5	14	0.449	93.3
5	2.021	82.4	15	0.413	93.9
6	1.596	84.7	16	0.362	94.4
7	1.21	86.4	17	0.33	94.9
8	1.022	87.8	18	0.298	95.3
9	0.886	89.1	19	0.266	95.7
10	0.729	90.2	20	0.235	96

Tabla 23. Matriz de correlación de vectores propios para sedimentos profundos (primeros 20 factores)

Factor	Valor propio	% acum.	Factor	Valor propio	% acum.
1	43.547	61.3	11	0.676	90.7
2	6.775	70.9	12	0.611	91.6
3	4.268	76.9	13	0.565	92.4
4	2.14	79.9	14	0.512	93.1
5	1.684	82.3	15	0.462	93.7
6	1.582	84.5	16	0.426	94.3
7	1.212	86.2	17	0.326	94.8
8	0.952	87.6	18	0.315	95.2
9	0.796	88.7	19	0.302	95.7
10	0.775	89.8	20	0.24	96

Tabla 24. Elementos relacionados con el Cp 1 (Componente principal) en muestras superficiales

	Cp1	Cp2	Cp3
Be	0.14	-0.01	0.01
Dy	0.14	0.1	0.11
Eu	0.15	0	0.1
Ga	0.14	-0.01	0.03
Gd	0.15	0.05	0.1
Nd	0.14	0.07	0.08
Sc	0.14	-0.03	0.05
Sm	0.15	0.05	0.09
Tb	0.15	0.08	0.08
V	0.14	-0.06	-0.07

Tabla 25. Elementos relacionados con el Cp 2 (Componente principal) en muestras superficiales

	Cp1	Cp2
B	0.09	0.15
Hf	-0.04	0.28
Lu	0.13	0.16
Nb	0.1	0.26
Sn	0.06	0.25
Ti	0.12	0.15
Tm	0.13	0.14
U	0.11	0.15
Y	0.12	0.18
Zr	-0.04	0.3

Tabla 26. Elementos relacionados con el Cp 1 (Componente principal) en muestras profundas

	Cp1
Be	0.95
Eu	0.96
Ga	0.94
Gd	0.95
Nd	0.93
Sc	0.94
Sm	0.95
Tb	0.94
Tl	0.93
Al	0.93

Tabla 27. Elementos relacionados con el Cp 2 (Componente principal) en muestras profundas

	Cp2
B	0.4
Hf	0.72
Lu	0.41
Nb	0.63
Sn	0.59
Tm	0.37
Y	0.44
Yb	0.38
Zr	0.78
Si	0.37

Tabla 28. Cargas de cada elemento al Componente principal en sedimentos superficiales

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10
Ag	0.753	-0.283	-0.305	-0.02	-0.084	-0.174	0.047	-0.092	-0.035	0.051
Au	0.366	-0.123	-0.137	0.466	-0.351	-0.031	0.099	-0.553	-0.167	0.128
As	0.674	-0.095	-0.459	-0.139	-0.189	0.058	0.251	-0.134	0.13	-0.143
B	0.564	0.382	-0.504	-0.115	0.035	0.114	0.327	0.089	-0.032	-0.002
Ba	0.868	-0.347	0.193	-0.08	-0.052	-0.014	-0.066	-0.119	-0.057	0.043
Be	0.934	-0.023	0.009	-0.209	0.062	0.134	-0.039	-0.085	-0.027	-0.056
Bi	0.78	0.323	-0.339	-0.026	-0.102	0.182	0.03	-0.066	-0.04	0.104
Br	0.439	-0.295	-0.054	0.477	0.507	0.136	0.211	0	0.074	-0.123
C	0.567	0.014	-0.288	0.122	0.543	-0.151	-0.295	-0.038	-0.169	-0.073
Cd	0.738	-0.142	-0.347	-0.129	-0.025	-0.428	-0.019	-0.055	0.052	-0.042
Ce	0.911	0.225	0.143	-0.126	0.071	0.071	-0.119	0	0.111	-0.034
Cl	0.229	-0.374	0.229	0.069	0.478	0.068	0.493	-0.108	0.269	0.272
Co	0.79	-0.49	0.087	-0.059	-0.133	0.076	-0.017	-0.009	-0.002	-0.118
Cr	0.861	-0.07	-0.043	0.087	-0.097	0.029	0.142	0.249	-0.082	0.1
Cs	0.851	0.166	-0.231	-0.157	0.024	0.27	0.051	-0.037	-0.086	0.144
Cu	0.824	-0.457	0.021	0.025	-0.09	-0.019	0.023	-0.009	-0.056	-0.123
Dy	0.932	0.246	0.204	-0.02	-0.004	-0.041	-0.011	0.022	0.029	-0.088
Er	0.9	0.303	0.232	0.058	-0.03	-0.092	0.019	0.017	0.008	-0.092
Eu	0.961	0.003	0.188	-0.051	0.023	0.05	-0.076	0.023	0.029	0.015
F	0.885	-0.19	0.084	-0.158	-0.02	0.034	0.059	-0.027	-0.007	-0.052
Ga	0.94	-0.037	0.063	0.152	-0.048	0.109	-0.056	0.068	-0.01	0.096
Gd	0.957	0.115	0.188	-0.064	0.007	-0.013	-0.082	0.02	0.05	-0.034
Ge	0.631	0.191	0.026	0.045	-0.256	0.374	0.193	-0.054	-0.128	-0.211
Hf	-0.227	0.72	0.312	0.062	0.018	-0.358	0.257	-0.099	0.057	-0.049
Hg	0.488	0.2	-0.425	0.525	-0.121	-0.091	-0.193	-0.215	-0.145	-0.069
Ho	0.925	0.235	0.224	0.028	-0.028	-0.086	-0.016	0.028	0.021	-0.072
I	0.395	-0.211	-0.057	0.539	0.44	0.275	0.157	0.011	-0.005	-0.215
In	0.091	0.017	-0.081	0.472	-0.243	0.17	-0.307	-0.109	0.656	0.026
La	0.891	0.24	0.137	-0.122	0.076	0.058	-0.115	0.005	0.132	-0.008
Li	0.856	0.064	-0.283	-0.253	0.005	0.138	0.095	0.089	-0.058	0.019
Lu	0.818	0.405	0.241	0.115	-0.018	-0.156	0.063	-0.028	-0.003	-0.094
Mn	0.807	-0.338	0.217	0.033	-0.07	-0.089	0.008	-0.183	-0.035	-0.155
Mo	0.8	-0.011	-0.364	-0.123	-0.015	-0.198	0	0.089	0.159	0.048
N	0.715	0.059	-0.3	0.135	0.408	-0.096	-0.263	0.051	-0.165	-0.076
Nb	0.661	0.667	0.032	0.13	0.06	0.044	-0.029	0.028	-0.009	0.114
Nd	0.932	0.191	0.159	-0.139	0.062	0.071	-0.097	-0.003	0.079	-0.036
Ni	0.913	-0.231	-0.07	-0.015	-0.092	0.023	0.058	0.177	0.006	0.059
P	0.858	-0.17	0.001	-0.167	0.167	-0.116	-0.044	-0.011	0.001	-0.092
Pb	0.852	0.165	-0.197	0.022	-0.021	0.084	-0.124	-0.208	0.03	0.059
Pr	0.927	0.2	0.146	-0.145	0.068	0.072	-0.113	0	0.09	-0.023
Pd	0.633	-0.357	0.033	0.284	-0.245	0.054	0.117	0.251	-0.064	-0.029
Pt	0.522	-0.373	0.014	0.335	-0.297	-0.179	0.073	0.318	-0.055	-0.143
Rb	0.894	-0.162	0.087	-0.222	0.032	0.145	-0.008	-0.172	-0.049	-0.053
S	0.653	-0.157	-0.22	-0.015	0.417	-0.251	0.067	-0.085	0.036	0.096
Sb	0.556	-0.061	-0.636	-0.118	-0.231	-0.26	0.124	0.064	0.194	-0.065
Sc	0.941	-0.08	0.093	0.128	-0.073	0.065	-0.01	0.067	-0.067	0.084
Se	0.766	-0.033	-0.493	0.07	0.152	-0.117	-0.074	0.129	0.066	-0.029
Sm	0.951	0.128	0.167	-0.107	0.039	0.047	-0.095	0.001	0.065	-0.032
Sn	0.361	0.631	-0.309	-0.141	0.001	0.279	0.108	-0.057	0.024	-0.157
Sr	0.814	-0.351	0.262	-0.098	0.053	-0.126	-0.005	-0.018	-0.033	0.151
Ta	0.854	0.35	0.041	0.146	-0.025	-0.028	-0.077	0.055	-0.036	0.187
Tb	0.947	0.208	0.163	-0.078	-0.002	-0.014	-0.021	0.024	0.044	-0.058
Th	0.895	0.293	-0.015	-0.067	0.03	0.113	0.02	0.015	0.01	0.083
Ti	0.761	0.388	0.17	0.29	-0.053	-0.015	0.069	0.121	-0.158	0.179
Tl	0.918	-0.098	-0.159	-0.154	-0.019	0.028	-0.027	-0.032	0.028	0.034
Tm	0.856	0.369	0.235	0.084	-0.014	-0.112	0.06	-0.005	0.003	-0.108
U	0.737	0.397	-0.314	-0.015	-0.007	-0.062	0.115	-0.089	-0.041	0.126
V	0.927	-0.149	-0.128	0.06	-0.094	-0.07	0.014	0.166	-0.006	0.081
W	0.858	0.086	0.026	0.176	-0.108	-0.133	-0.094	0.036	-0.042	0.22
Y	0.804	0.472	0.216	0.032	-0.009	-0.06	0.018	0.056	0.019	-0.062
Yb	0.835	0.365	0.25	0.128	-0.051	-0.151	0.022	0.003	-0.013	-0.095
Zn	0.906	-0.27	-0.184	-0.128	-0.027	-0.12	0.014	0.01	0.052	-0.049
Zr	-0.269	0.773	0.242	0.045	0.024	-0.328	0.254	-0.074	0.044	-0.044
Si	-0.793	0.281	-0.125	-0.271	0.063	-0.089	-0.031	-0.117	-0.124	-0.026
Al	0.907	0.069	0.082	0.073	0.048	0.14	-0.084	0.063	-0.037	0.19
Fe	0.927	-0.2	0.069	0.003	-0.031	0.078	0.017	0.021	0.023	-0.032
K	0.87	-0.18	0.2	-0.223	0.031	0.111	-0.027	-0.172	-0.027	-0.008
Na	0.731	-0.503	0.345	-0.071	-0.021	-0.038	0.046	-0.131	-0.038	0.022
Ca	0.659	-0.579	0.193	-0.052	0.006	-0.289	0.081	-0.073	0.051	0.025
Mg	0.878	-0.378	0.212	-0.041	-0.043	-0.004	0.048	-0.064	-0.08	0.017

Tabla 29. Cargas de cada elemento al componente principal en sedimentos profundos

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10
Ag	0.709	-0.284	-0.313	-0.072	-0.153	0.038	-0.307	-0.053	-0.097	-0.069
Au	0.365	-0.092	-0.159	-0.432	-0.228	-0.457	-0.206	-0.402	-0.15	0.159
As	0.63	-0.079	-0.571	0.042	0.1	-0.107	-0.156	0.023	0.094	0.318
B	0.601	0.401	-0.456	0.033	0.3	-0.029	-0.098	0.184	-0.019	0.065
Ba	0.858	-0.34	0.212	0.134	-0.069	-0.006	-0.073	-0.082	-0.099	-0.079
Be	0.945	0.006	0.033	0.198	0.097	0.031	0.063	-0.053	-0.077	0.069
Bi	0.748	0.246	-0.376	0.053	0.063	-0.216	-0.065	-0.05	-0.032	-0.082
Br	0.347	-0.45	0.112	-0.509	0.441	-0.036	0.018	0.061	-0.022	-0.172
C	0.574	-0.22	-0.334	-0.351	0.046	0.407	0.329	-0.196	0.053	0.014
Cd	0.715	-0.165	-0.393	-0.026	-0.188	0.309	-0.267	-0.065	-0.041	-0.026
Ce	0.905	0.28	0.146	0.13	0.055	0.044	0.032	-0.069	0.112	-0.016
Cl	0.155	-0.479	0.288	-0.142	0.594	0.063	-0.269	0.03	-0.142	0.128
Co	0.809	-0.442	0.087	0.117	-0.096	-0.078	0.105	0.02	-0.063	0.11
Cr	0.865	-0.06	-0.123	-0.105	0.006	-0.134	0.072	0.196	-0.011	-0.034
Cs	0.853	0.207	-0.221	0.181	0.214	-0.122	-0.011	-0.032	-0.037	-0.06
Cu	0.862	-0.391	0.033	0	-0.087	-0.094	0.068	0.071	-0.066	0.059
Dy	0.924	0.261	0.212	-0.049	-0.04	0.061	-0.007	-0.024	0.087	0.057
Er	0.889	0.306	0.237	-0.118	-0.075	0.05	-0.04	-0.029	0.074	0.062
Eu	0.956	0.037	0.228	0.049	0.006	0.038	-0.003	-0.029	0.077	-0.039
F	0.904	-0.138	0.079	0.18	0.061	0.039	0.074	0.007	0.008	0.119
Ga	0.943	-0.068	0.106	0.005	-0.013	-0.132	0.07	0.038	-0.04	-0.136
Gd	0.95	0.143	0.206	0.022	-0.029	0.058	0	-0.028	0.097	-0.009
Ge	0.549	0.197	-0.057	0.119	0.051	-0.453	0.247	0.04	-0.32	0.155
Hf	-0.095	0.722	0.265	-0.332	-0.023	0.216	-0.119	0.211	-0.208	0.136
Hg	0.573	0.085	-0.436	-0.38	-0.216	-0.22	-0.049	-0.252	0.111	-0.065
Ho	0.916	0.248	0.228	-0.086	-0.086	0.058	-0.032	-0.026	0.072	0.032
I	0.226	-0.341	0.119	-0.419	0.583	-0.179	-0.107	0.012	0.236	-0.093
In	0.712	-0.131	0.021	0.097	-0.045	-0.191	0.033	0.063	0.024	0.084
La	0.888	0.288	0.137	0.132	0.053	0.075	0.017	-0.076	0.12	-0.039
Li	0.869	0.088	-0.278	0.202	0.149	-0.021	0.073	0.072	0.017	0.03
Lu	0.812	0.412	0.224	-0.187	-0.089	0.053	-0.058	-0.041	0.043	0.092
Mn	0.805	-0.365	0.22	-0.022	-0.094	-0.021	-0.015	-0.029	-0.129	0.14
Mo	0.785	0.001	-0.386	0.146	-0.032	0.164	-0.175	0.116	0.023	-0.076
N	0.778	-0.074	-0.342	-0.138	-0.038	0.161	0.32	-0.003	-0.076	-0.116
Nb	0.656	0.632	0.043	-0.063	0.079	-0.088	0.072	-0.018	-0.015	-0.058
Nd	0.93	0.222	0.174	0.102	0.059	0.059	0.039	-0.061	0.125	0.007
Ni	0.916	-0.245	-0.085	0.027	-0.039	-0.043	0.003	0.155	-0.005	-0.042
P	0.862	-0.218	-0.033	0.092	-0.042	0.182	0.075	0.075	-0.068	0.118
Pb	0.841	0.138	-0.199	0.012	0.024	-0.124	-0.089	-0.183	-0.012	-0.037
Pr	0.924	0.24	0.16	0.121	0.056	0.061	0.033	-0.068	0.116	-0.005
Pd	0.637	-0.314	0.107	-0.257	-0.091	-0.168	0.097	0.319	0.151	0.069
Pt	0.551	-0.384	-0.005	-0.228	-0.327	-0.159	0.07	0.379	0.058	0.078
Rb	0.905	-0.094	0.133	0.238	0.123	-0.029	0.07	-0.115	-0.07	0.062
S	0.572	-0.341	-0.199	-0.174	0.263	0.287	-0.051	-0.096	-0.177	0.169
Sb	0.587	-0.081	-0.665	0.061	-0.106	0.088	-0.213	0.156	0.123	0.088
Sc	0.944	-0.08	0.103	-0.024	-0.041	-0.128	0.04	0.027	-0.039	-0.071
Se	0.767	-0.021	-0.524	-0.037	0.017	0.119	0.075	0.094	0.031	-0.071
Sm	0.949	0.162	0.183	0.071	0.02	0.055	0.025	-0.051	0.106	-0.008
Sn	0.41	0.588	-0.313	0.057	0.208	-0.162	0.188	-0.013	0.089	0.245
Sr	0.81	-0.35	0.272	0.074	-0.059	0.14	-0.11	0.017	0.01	-0.073
Ta	0.882	0.298	0.052	-0.048	-0.015	-0.048	0.013	0.041	-0.127	-0.193
Tb	0.942	0.22	0.17	0.005	-0.017	0.067	-0.002	-0.019	0.09	0.046
Th	0.899	0.259	-0.034	0.101	0.135	-0.005	0.004	0.004	-0.045	-0.047
Ti	0.81	0.302	0.159	-0.233	-0.05	-0.153	-0.04	0.142	-0.102	-0.148
Tl	0.933	-0.047	-0.101	0.213	0.057	0.055	-0.044	0.005	-0.013	-0.104
Tm	0.854	0.366	0.232	-0.148	-0.063	0.05	-0.044	-0.044	0.063	0.088
U	0.762	0.356	-0.304	0.017	0.08	0.047	-0.177	-0.044	-0.057	-0.064
V	0.92	-0.141	-0.148	0.006	-0.081	-0.015	-0.078	0.162	0.011	-0.101
W	0.874	0.091	0.056	-0.057	-0.099	-0.061	-0.127	-0.011	-0.123	-0.286
Y	0.818	0.436	0.197	-0.129	-0.04	0.083	0.006	0.034	0.03	0.053
Yb	0.822	0.38	0.243	-0.191	-0.124	0.036	-0.064	-0.036	0.047	0.058
Zn	0.913	-0.238	-0.195	0.069	-0.067	0.098	-0.082	0.035	-0.031	0.018
Zr	-0.201	0.777	0.177	-0.274	-0.026	0.209	-0.156	0.18	-0.213	0.114
Si	-0.713	0.371	-0.107	0.214	0.053	0.098	-0.077	0.054	-0.304	-0.089
Al	0.93	0.023	0.118	0.035	0.062	-0.093	0.015	0.024	-0.047	-0.185
Fe	0.915	-0.169	0.077	0.057	0.017	-0.058	0.001	0.06	0.026	0.041
K	0.871	-0.136	0.248	0.214	0.106	0.026	0.012	-0.118	-0.09	0.029
Na	0.722	-0.481	0.39	0.076	-0.033	0.007	-0.028	-0.024	-0.119	0.043
Ca	0.641	-0.598	0.201	-0.056	-0.115	0.222	-0.107	-0.052	0.023	0.077
Mg	0.882	-0.351	0.225	0.041	-0.055	-0.02	0.004	-0.021	-0.092	0.051
COrg	0.589	-0.042	-0.336	-0.348	-0.017	0.255	0.502	-0.086	-0.182	-0.027

- **Análisis de Agrupamientos**

El árbol de agrupamientos de las variables con los valores del coeficiente de correlación en el análisis de clusteres indica la relación que existe en los elementos de sedimentos superficiales y profundos. Para el análisis los 71 elementos se pueden clasificar en dos grupos principales grupo 1: Elementos de tierras raras y grupo 2: elementos mayores. Este análisis corroboró la existencia de las correlaciones y asociaciones identificadas en el análisis multivariado.

5.5.3.4. Análisis Geoestadístico

Para llevar a cabo los análisis geoestadísticos se dispuso del programa Geosoft. La elección del mismo se debe, primeramente, a que con él se pueden efectuar todas las fases de un estudio geoestadístico (análisis exploratorio de los datos, análisis estructural y estimaciones). Sin embargo por cuestiones de presentación los mapas se generaron con el software ArcGIS y los semivariogramas se realizaron con el software Variowin.

5.5.3.4.1. Distribución de los datos

Como análisis previo al análisis geoestadístico, se requiere examinar la forma de distribución de los datos de las muestras superficial y profunda. Ciertos métodos de kriging trabajan mejor si los datos poseen una distribución normal (curva en forma de campana). En particular los mapas resultados del procesos de kriging (ordinario, simple y universal) asumen que los datos provienen de una distribución normal univariada.

Kriging también tiene sus bases en la hipótesis de la estacionariedad. Para esto se requiere que los datos provengan de una distribución que tengan la misma variabilidad. Como existen ciertos casos en los cuales no se satisface la función de densidad de probabilidad, se requiere realizar una transformación para hacer los datos normalmente distribuidos y satisfacer la hipótesis de igual variabilidad. La transformación logarítmica (log) se aplicó en los casos en donde los datos poseen una distribución sesgada positiva y hay pocos valores extremos, los cuales están alejados del eje central del histograma. Esta transformación ayuda a que las varianzas sean más constantes y además normaliza los datos.

La transformación logarítmica (log) es un caso especial de la transformación Box-Cox en donde $\lambda = 0$; la transformación es,

$$Y(s) = \ln(Z(s)), \text{ para } Z(s) > 0,$$

En donde \ln es el logaritmo natural. Una consecuencia de la transformación log es el método de predicción Kriging Lognormal. Para los otros valores de λ , el método de predicción asociado es conocido como Kriging Transgausiano. De acuerdo a las pruebas de normalidad se realizaron transformaciones logarítmicas antes de analizar geoestadísticamente los elementos

5.5.3.4.2. Cálculo de semivariogramas

Para la descripción de la estructura de correlación espacial de los datos se utilizó el variograma. Se construyeron los variogramas omnidireccionales para cada uno de los períodos y, con posterioridad, se les ajustaron unos modelos teóricos.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(s) - Z(s+h))$$

En ningún caso se consideró la existencia de anisotropía. Con el número de datos disponibles, el cálculo de los variogramas direccionales se sustentaba sobre muy pocos puntos muestrales, dando lugar a resultados muy deficientes. Finalmente, se realizó un estudio de validación cruzada (cross-validation) para estimar la bondad del método.

En el programa Variowin, para el cálculo del variograma no se considera una tolerancia dimensional de forma explícita. Así, en este caso, el primer punto del variograma se obtiene mediante el emparejamiento de cada dato muestral con aquellos que disten menos de 86,15 km; el segundo punto se obtiene emparejando los datos muestrales con aquellos que disten entre 86,15 y 130,30 km, y así hasta completar la distancia máxima.

La **Figura 26** ilustra un ejemplo de la nube de puntos del semivariograma, el semivariograma empírico y el teórico ajustado para el elemento Au en sedimentos superficiales.

5.5.3.4.3. Interpolación Kriging

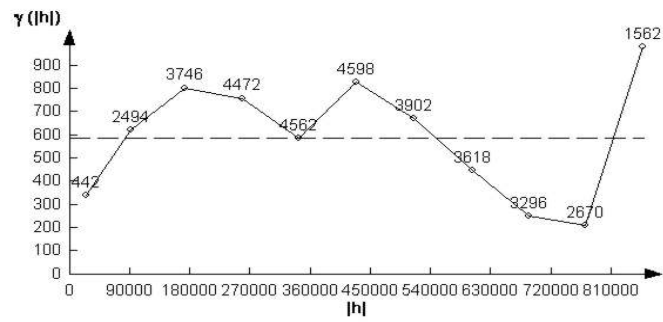
Se utilizó la predicción espacial de estos valores con el interpolador Kriging para producir mapas coropléticos.

La experiencia ha demostrado que lo fundamental no es la forma analítica del modelo, sino la determinación de los rasgos más notables de la variable estudiada. Mediante el uso de un buen programa gráfico que permita interactividad, se obtienen los mejores resultados.

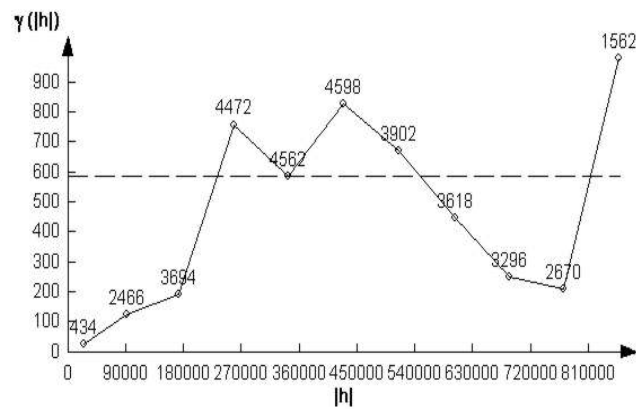
Este proceso incluye la utilización del interpolador del Geosoft, y su exportación en rangos de cuantiles para su visualización en el software GIS ArcGIS. El formato de exportación es shapefile de polígonos, en donde cada polígono corresponde a un rango fijo de cuantiles.

Los rangos se calcularon utilizando el método de los cuantiles inteligentes. Los Cuantiles Inteligentes son usados para delinear clases basados en el agrupamiento natural de los datos. Los puntos de corte son identificados al observar los agrupamientos y patrones inherentes en los datos. Estos puntos de corte son definidos de acuerdo a si existen saltos en los valores de los datos, de tal manera que los grupos con valores similares son colocados en la misma clase. Existe un balance entre la definición de intervalos iguales y cuantiles, con intervalos de diferentes tamaños pero de manera que el cuantil es un poco más ancho en los extremos.

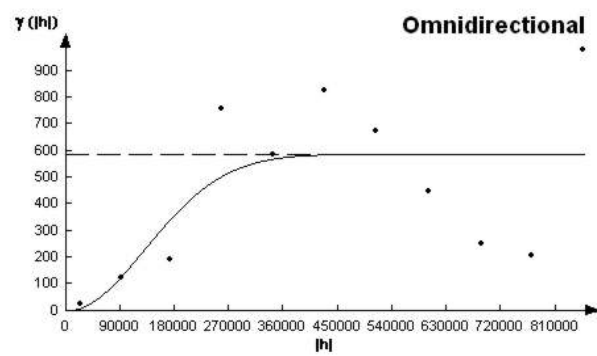
En algunos elementos no se pudo aplicar la técnica de estimación Kriging y se utilizaron métodos alternos tales como Funciones de Base Radial (RBF). Las funciones de Base Radial son un conjunto de métodos de interpolación determinístico moderadamente rápido que es exacto. Son mucho más flexibles que el método del Inverso a la Distancia, ya que requieren de más parámetros de decisión. Sus superficies son comparables a las que produce Kriging, y aunque no permite investigar la autocorrelación de los datos son mucho más flexibles y automáticas que Kriging. En el método de las RBF no se hacen presunciones acerca de los datos.



(a)



(b)



(c)

Figura 26. Nube de puntos del semivariograma (a), semivariograma empírico (b), y semivariograma teórico ajustado para el elemento Au en sedimentos superficiales (c).

5.5.3.4.4. Validación del método

La valoración de la técnica (determinación de la bondad del ajuste de la estimación de las concentraciones de un elemento en la malla de puntos) se realizó mediante validación cruzada. Este proceso consiste en eliminar cada uno de los puntos observados y estimarlo a partir de los restantes, con lo que tenemos, para cada punto con datos de resultados del laboratorio, una estimación hecha a partir del resto de puntos, y se puede comparar si las tasas estimadas se asemejan o no a las observadas. Eso se hace a través de dos medidas:

$$1. \text{ Media reducida: } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t(x_i, y_i) - \hat{f}(x_i, y_i)).$$
$$2. \text{ Variancia reducida: } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{t(x_i, y_i) - \hat{f}(x_i, y_i)}{\sigma_{\hat{f}(x, y)}} \right)^2.$$

En caso de buen ajuste, sus valores estarán alrededor del 0 y el 1, respectivamente.

Casi todos los elementos se analizaron utilizando Kriging Ordinario con excepción de Be, C, Cs, Ge, Pd y Na en sedimentos profundos; y Ag, Be, Bi, Cd, Er, Hf, Ho, N, Rb, Ti y Na en sedimentos superficiales. Para estos elementos se aplicó la técnica de Funciones de Base Radial utilizando Splines completamente regularizados.

En los elementos Cr, Mn, Nb, Pd; S, Sb, Tm e Yb en sedimentos superficiales y Cr, I, Nb e Yb en sedimentos profundos se tuvo en cuenta la tendencia local en forma de polinomio grado 2. Ello permitió observar una tendencia más suave de la variación espacial de la concentración.

5.5.3.5. Mapas de distribución espacial

A partir del análisis geoestadístico efectuado se realizaron mapas de distribución para cada uno de los 71 elementos para muestras del horizonte superficial y del horizonte profundo, para un total de 142 mapas de distribución espacial y 142 mapas del error de estimación.

En los mapas se aprecia que para los elementos Al, Bi, C, C Org, F, Lu, S, Rb, Pt, Pb, Tm, Ti, Y, Yb en sedimentos profundos, y C Org, Gd, Tb, Sm y P en sedimentos superficiales; el rango superior no se muestra debido a la presencia de muchos valores anómalos que hacen que la varianza aumente considerablemente. Estos puntos se eliminaron del análisis geoestadístico. Por ello para estos elementos si se desea observar zonas de valores concentración alto correspondiente a los valores extremos se debe utilizar el mapa de concentración de elementos por cuencas.

El rango inferior de los cuantiles en Au, C Org, Si en sedimentos profundos y Br, Ge, Ta, U en sedimentos superficiales no aparece por la misma razón descrita arriba, solo que en este caso es para los valores anómalos inferiores.

Los mapas de Cr, Co, Cd, Ca, Ba, Au, Cu, Fe, Hg, I, Mg, Mn, Na, Nb, Tm, Sn, Si, Pt, Pd, Yb, Zr en sedimentos superficiales y As, Cl, Cr, I, Fe, Mg, Ni, Na, Sm, Sr, Zr en sedimentos profundos se presentan con 7 rangos intercuantiles para resaltar patrones interesantes de distribución. Estos

patrones fueron revelados previamente con las técnicas del análisis exploratorio de datos espaciales AEDE descritas en el informe “Análisis estadístico univariado”.

Los mapas de distribución para cada elemento en los dos horizontes analizados se presentan en el **Anexo 6**.

5.5.3.6. Mapas de asociaciones o factores de correlación entre elementos

Para el cálculo de los mapas de asociaciones se utilizó el método de Cokriging, con múltiples datasets (hasta 4) y la verificación preliminar de la correlación cruzada y de la autocorrelación entre elementos.

Se calcularon además 14 mapas de asociación de factores de acuerdo con los resultados descritos en el informe de “Análisis de Estadísticas Multivariadas”, para cada medio de muestreo para un total de 28 mapas de asociación y 28 mapas del error de estimación del método de interpolación.

Los mapas de asociación entre elementos para los dos horizontes analizados se presentan en el **Anexo 6**.

5.6. NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS EN SEDIMENTOS DE LLANURA DE INUNDACION

Como se muestra en el **Anexo 4**, las estimaciones de media y mediana difieren entre sí para todos los elementos indicando una distribución asimétrica de los datos para la mayoría de los elementos en ambos horizontes, con excepción de Eu, Ge, In, La, Nb, Sc y Ta en sedimentos superficiales y de Gd, Ho, In, Lu, Tm y K en sedimentos profundos.

Los valores de asimetría, junto con valores de media más altos que los de la mediana, aumentan la estimación de la desviación típica, a tal grado que ésta ya no es útil como una medida de dispersión de los datos, lo cuál es especialmente notorio para Ag, Au, Bi, Br, Cl, Hg, Pb, S, Sb y Ca en sedimentos profundos y para Au, Br, Cd, Cl, Hg, Mo, Pb, Sb, V y Zn en sedimentos superficiales.

Los valores altos de curtosis para los elementos Au, Br, Cl, Hg, Mo, Pb, Sb, Tl, V y Zn en sedimentos superficiales y para Ag, Au, Bi, Br, Cl, Hg, Pb, S, Tl y Ca en sedimentos profundos muestran que la distribución de éstos elementos es más puntiaguda que la de una distribución normal.

La mayoría de los elementos anteriores presentan una distribución con una cola larga hacia la derecha, propia de distribuciones asimétricas y con valores de concentración alejados y muy altos, hecho que es muy común para elementos trazas como los descritos y para el calcio que se encuentra localmente enriquecido o empobrecido en ciertos ambientes geoquímicos.

Los valores de skewness más altos se presentan en sedimentos superficiales para Cl, Br, Au, Hg, Sb, V, Cd, Mo, Pb, Zn, Tl, Pd, Se, Pt, As, Ag, I, S, C Org, W, C, Ca, Sr, Ni, Hf, N, Zr, Cu, Na, B, Nb y Mg. Un caso especial lo constituyen el Zn, Tl, I, Nb y Sr que poseen una distribución muy irregular y que presentan más de tres casos anómalos hacia los valores mínimos indicando zonas muy marcadas de empobrecimiento en éstos elementos.

En sedimentos profundos los valores de skewness mas altos los presentan los elementos Au, S, Pb, Ag, Ca, Cl, Hg, Bi, Br, Sb, Tl, Mo, C, Cd, Se, V, Zn, As, Pt, I, Pd, C Org, Ni, W, Hf, Nb, N, Sr y Cu. Los casos especiales en este medio son S, Cl, Bi, C, As, C Org, N y Cu.

En las muestras del horizonte profundo existe una tendencia a distribución normal de elementos de tierras raras (Dy, Er, Gd, Ho, Lu, Sm, Tb, Tm, Yb), elementos de transición (Y, Ti, Zr, Nb, Ta), y el Ge. En las muestras del horizonte superficial presentan una tendencia a distribución normal elementos de tierras raras (Dy, Er, Ho, La, Lu, Nd, Yb, Tb, Th, Tm), elementos de transición (Nb, Ta, Y, Ti, Zr, Hf, In), así como el Ge y el Sn.

Entre los elementos que requieren transformaciones logarítmicas en sedimentos superficiales están Sr; Pb, C, COrg, N, As, Se, S, Cl, Br, I, Au, Ag, Cd, Zn, Hf, Zr, Nb, V, Mo, W, Ni, Pd, Pt; los cuáles poseen un valor positivo alto de sesgamiento y contienen valores anómalos muy lejos de la distribución y de la mediana

En el caso del Au, Sr, Hf, Nb, Cl y del I, en sedimentos superficiales, así como en el caso del Au, Pb, S, y el Cl, en sedimentos profundos los datos extremos influyen en gran medida en la distribución a tal punto que se deberán eliminar las muestras con datos anómalos para aplicar la transformación logarítmica.

Elementos como el Yodo (I) en sedimentos superficiales presentan máximos que se alejan fuertemente de la línea central de normalidad, especialmente en los datos correspondientes a las muestras de los ríos Seco (2115SFS), La Colorada (06SFS), Fundación (0311SFS), Ranchería (0401SFS), Guamal (2802(GM)SFS), y Querary (3910SFS); en las quebradas Simaña (1105SFS), Zapayán (0701SFS), y Sillimahana (0501SFS); en el Arroyo Jorotuy (0202SFS); y en el caño Suárez (3204SFS).

Las muestras que presentaron mas elementos con valores anómalos o extremos, corresponden a los horizontes superficial y profundo de los sedimentos de planicie de inundación de las cuencas del arroyo Jorotuy en La Guajira (0202SFS), del río Tigui en Antioquia (1121SFS), y del río Guaguaqui en el Magdalena medio (2103SFS).

Adicionalmente se destacan la cuenca del caño Maremare-Moral en Casanare (2307SFS) que en el horizonte superficial presenta alto número de valores extremos y las cuencas del río Santo Domingo (1119SFP), de los Arroyos Grande (0601SFP) y Alfez (0708SFP) en Bolívar, así como la cuenca de río Sillimahana en La Guajira (0501SFP) donde su horizonte profundo presenta un alto número de valores extremos.

5.7. ASOCIACION ENTRE ELEMENTOS

En las muestras superficiales de sedimentos de planicie de inundación se presentaron relaciones positivas y muy significativas entre:

- Ba-Be, elementos litófilos, considerados metales livianos que pueden presentarse conjuntamente en forma natural haciendo parte de micas o adheridos en minerales arcillosos o materia orgánica. Los dos elementos son poco móviles especialmente en ambientes reductores.
- Ag-Zn, elementos calcófilos que naturalmente se presentan asociados en sulfuros (esfalerita argentífera - ZnS (Ag)), adsorbidos en materia orgánica o coprecipitados y adheridos en oxi-

hidróxidos de Fe y Mn. Los dos elementos son bastante inmóviles y precipitan en condiciones de pH básico y en ambientes reductores.

En muestras de sedimentos profundos se presentaron correlaciones bivariadas positivas y muy significativas entre:

- C-N, elementos que están presentes en ambientes naturales como componentes de la materia orgánica o que también se acumulan como residuos de actividades antropogénicas.
- Cd-Zn, elementos calcófilos que se presentan naturalmente asociados en minerales de zinc como sulfuros (esfalerita - ZnS (Cd)), y sulfatos (smitsonita - ZnSO₄ (Cd)); adsorbidos en materia orgánica o precipitados y adheridos en oxi. Hidróxidos de Fe y Mn. La asociación Zn-Cd es muy común en muchas ocurrencias minerales junto con Pb, Ba y otros metales. Aunque el Zn presenta mayor movilidad que el Cd en condiciones ácidas y oxidantes, los dos elementos son inmóviles en condiciones reductoras.
- Cs-Li, se encuentran asociados en granitos y pegmatitas junto con Be y elementos de tierras raras y se adhieren arcillas y oxi-hidróxidos de Fe y Mn. El Li tiene propiedades básicas fuertes es un elemento litófilo de origen predominantemente geogénico, mientras que el Cs es un elemento radiogénico que puede tener diversos orígenes.

Las correlaciones mas significativas se presentan tanto en sedimentos superficiales como profundas:

- Ba con Be, Co, Cu, Eu, F, Mn, Ni, Rb, Sc, Sr, Tl, Zn, Fe, K, Na, Mg.
- Bi con Cs, Pb, Th, U
- Ce con Be, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Ho, La, Lu, Nd, pr, Sm, Ta, Tb, Th, Tl, Tm, Y, Yb, Al.
- Co con Cu, F, Mn, Ni, Zn, Fe, Na, Mg, Ba
- Cr con Ga, N, Sc, V, Fe.
- Cs con Ga, N, Sc, V, Fe
- Cu con Ba, Co, Fe, Mn, Ni, Zn, Na, Mg
- Dy con Be, Ce, Er, Eu, Ga, gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, Tm, Y, Yb, Al.
- Er con Ce, Dy, Eu, Ga, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, Ti, Tm, Y, Yb.
- Eu con Ba, Be, Ce, Dy, Er, F, Ga, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Ni, Pr, Rb, Sc, Sm, Sr, Tb, Th, Tl, Tm, V, Yb, Zn, Al, Fe, K, Mg.
- F con Ba, Be, Co, Cu, Eu, Ga, Gd, Ni, P, Rb, Sc, Sm, Sr, Tl, Zn, Fe, K, Mg.
- Ga con Be, Ce, Cr, Dy, Er, Eu, F, Gd, Ho, Nd, Ni, Pr, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, Tl, V, W, Al, Fe, Mg.
- Gd con Be, Ce, Dy, Er, Eu, F, Ga, Ho, La, Lu, Nd, Ni, Pr, Rb, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, Tm, V, Y, Yb, Al, Fe, K.

Se evidenció una correlación negativa importante entre el Na y el Hf, de tal modo que en los sitios de enriquecimiento de Hf se presenta deficiencia o empobrecimiento de sodio. El sodio (Na) es un elemento que se encuentra en concentraciones apreciables en la naturaleza formando parte de rocas (plagioclasas, micas, anfíboles, piroxenos, etc) y minerales (albita, halita, criolita, soda, etc.), es litófilo, de características básicas, que hace parte del grupo de los metales alcalinos (IA) y que generalmente se encuentra concentrado en medios naturales en ambientes de origen marino, mientras que el Hf se encuentra concentrado en piroxenos, granate y biotita.

Las correlaciones anteriores evidencian la alta correlación de los elementos de tierras raras como Gd, Eu con otros elementos de tierras raras y con Ga y Be que son elementos con características anfóteras. La asociación del Bi con Cs, U, Th es común encontrarla en ambientes naturales en pegmatitas.

En sedimentos superficiales se identifican tres asociaciones principales (componente principal):

- **Asociación 1: Eu, Gd, Sm, Tb, Sc, Ga, Be, Nd y Dy**

La asociación de elementos de tierras raras es muy común en medios naturales y se presentan conjuntamente asociados con otros elementos como el Be en pegmatitas.

- **Asociación 2: Zr, Hf, Nb y Sn**

La asociación del Hf con Zr, Nb y Sn es propia de granitos y pegmatitas sieníticas. El Hf es un elemento litófilo de características anfóteras que generalmente está asociado con el Zr en la naturaleza como por ejemplo en el zircón ((Zr,Hf)SiO₄) y en la badeleyita ((Zr,Hf,Ti,Fe,Th)O₂).

- **Asociación 3: Hf, Zr y Si**

El Hf es un elemento litófilo de características anfóteras que se presenta generalmente asociado al Zr. El silicio (Si) por su parte es un elemento abundante en la naturaleza que se presenta haciendo parte de silicatos.

En sedimentos profundos se identifican tres asociaciones estadísticas (componente principal)

- **Asociación 1: Eu, Gd, Sm, Be, Sc, Ga y Tb**
- **Asociación 2: Hf, Zr, Nb y Sn**
- **Asociación 3: Na, Sr y Cl.**

Las dos primeras asociaciones se mantienen en el horizonte superficial (A₀₋₂₅) y en el horizonte profundo (hasta 200cm) de los sedimentos de planicie de inundación con excepción del Nd y del Dy que se presentan asociados en el horizonte superficial y no es marcada su correlación en el horizonte profundo.

La asociación del Na y el Cl que se presenta en la tercera asociación en el horizonte profundo es muy común encontrarla en ambientes de origen marino (emisiones oceánicas, salmueras, etc.) y en minerales como la halita (NaCl). El Sr es un metal litófilo con características básicas fuerte cuya fuente principal son emisiones oceánicas y que puede estar asociado con los anteriores elementos ambientes de origen marino.

5.8. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ELEMENTOS, REGIONES O PROVINCIAS DE DOMINIOS DE ELEMENTOS QUÍMICOS Y SUS ASOCIACIONES

El procesamiento estadístico y geoestadístico de los datos permitió, elaborar mapas que representan zonas de acumulación o empobrecimiento de elementos y visualizan su distribución espacial delimitando dominios de los diferentes elementos analizados.

5.8.1. Concentración de elementos por cuencas

Los mapas de distribución por cuencas permiten diferenciar regiones con altos, medios y bajos contenidos de elementos y dilucidar grandes regiones de dominio de elementos químicos.

5.8.1.1. Región Oriental

Hacia la región de los Llanos Orientales se diferencia una zona que coincide a grandes rasgos con la Orinoquía y la Amazonía, la cuál se caracteriza por presentar bajas concentraciones para la mayoría de elementos analizados con excepción de Hf, Zr y Si.

En ésta región es muy marcada la baja concentración o empobrecimiento de los elementos Ag, As, Ba, Be, Cd Co, Cu, Cl, F, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pt, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Tl, V, Zn, Na y K.

Igualmente, los elementos Hf, Zr y Si delimitan una zona de altas concentraciones o enriquecimiento en la Orinoquía-Amazonía especialmente hacia el extremo nor-oriental en la zona limítrofe con Venezuela, evidenciando la asociación Hf – Zr y el enriquecimiento de Si en ésta zona, cuyo posible origen está en rocas del escudo precámbrico de Guyana.

Otros elementos aunque no presentan enriquecimiento o empobrecimiento a nivel regional, si presentan zonas de enriquecimiento local, tal es el caso de los elementos B, Bi, Ce, Cs, Dy, Eu, Er, Gd, Hf, Hg, Ho, La, Lu, Nd, Nb, Pb, Pr, Sm, Sn, Ta, Tb, Th, Zr, Tm, U, Y, Yb, Si y Ti que presentan enriquecimiento local hacia el sur de Guainía – nororiente del Vaupés, en zona limítrofe con Brasil. El Nb, Y, Sn, Ta, Ti, en particular además de la zona anterior presenta una zona de enriquecimiento regional en la Orinoquía.

El Bi, Pr, Tm, presentan una zona de enriquecimiento muy local hacia la Orinoquía en afluentes del río Vichada y el Au presenta enriquecimiento muy localizado en el nor-oriente de la Orinoquía en límites con Venezuela y en Guainía hacia el norte y en su extremo sur en límites con Brasil. El Ga presenta un enriquecimiento local en la Orinoquía entre los ríos Vichada y Guaviare, y el Ge en la Amazonía en el Guainía y en la Orinoquía en afluentes del río Vichada.

El Yodo (I) y el Br presentan una zona de enriquecimiento local hacia el norte del Guainía en afluentes del río Guainía. El Paladio (Pd) y el W, presentan un enriquecimiento muy local en la Amazonía, en el Guainía sur.

5.8.1.2. Región Central de Influencia del sistema cordillerano Andino

Contenidos medios a altos de la mayoría de elementos, diferencian la región central de influencia de las cordilleras Oriental y Central.

▪ Sub-región Andina de influencia de la Cordillera Oriental

En ésta sub-región los elementos Ag, As, B, Be, Bi, Cs, Ce, Eu, F, Dy, Er, Ga, Gd, Ge, Ho, Cd, Lu, Nd, In, Nb, La, Li, Nd, Pr, Ni, Pb, Mo, Zn, P, S, Tm, Y, Yb, N, W, Sn, Tm, K, C, presentan máximas concentraciones y enriquecimiento regional especialmente en la zona que confluye hacia el Magdalena medio y la región nor-oriental de Santander y de Santander del Norte hacia el Catatumbo.

Localmente existen zonas de enriquecimiento de Ba, Na y Al, hacia el Magdalena medio y la región del Catatumbo; Au, y Zr, en Santander del Sur; Ce, Nd, Nb, Li, Nd, Pr, Pb, S, Sn, Rb, Sb, Se, U, V, Ta, Tb y Sm en zonas del piedemonte Llanero y hacia Casanare; Fe y Cl, en la parte central en el altiplano Cundiboyacense; Hf, Hg, Pt y Sr hacia el Magdalena Medio; Pd y Pt hacia el sur de la región al norte del departamento de Caquetá.

▪ **Sub-región Andina de influencia de la Cordillera Central**

Esta sub-región está caracterizada por altas concentraciones de Ag, As, Ba, Bi, Au, Co, Cu, Eu, Ga, Gd, Ge, Ho, Hg, Pd, In, Ni, Pb, S, Tm, Yb, W, Pt, Sc, Ta, Tb, Sr, Ti, Mg, Mn, Al, Fe y C.

Los elementos Be-Bi, Cs, Dy, Er, Cd, Lu, Nb, Zn, Y, N, Sn, Sb, Se, V y Sm, presentan enriquecimiento local en el Magdalena alto y medio y el Na en la zona del alto Magdalena

▪ **Sub-región de influencia del río Cauca**

En la zona de influencia directa del río Cauca aunque la mayoría de elementos se encuentran en niveles medios de concentración los elementos Au, Co, Cu, Ga, Hg, Pd, Ni, W, Pt, Sc, V, Mg, Mn y el Fe, presentan enriquecimiento en los dos horizontes y los elementos Ag, Br, I, In, Zn, Se, Ti y C en el horizonte profundo.

Hacia la confluencia del río Cauca con el Magdalena en zona de influencia de la serranía de San Lucas por un lado y de el extremo septentrional la cordillera Central, aparece una zona enriquecida en Au, Ag, Ho, Lu, Zn, Tm, Yb, Eu, Dy, Er. En ésta misma zona se presenta enriquecimiento localizado de Co, Cu, Ga, Gd, Hg, Pd, Ni, Pb, Cl, As, Pt, Cd, Nd, Pr, Tb, Sm, Sb, Se y V especialmente en el horizonte mas profundo reflejando unas veces los aportes de la Serranía de San Lucas y otras veces los aportes de la Cordillera Central.

5.8.1.3. Región Costera del Caribe

En la región costera los elementos diferencian varias zonas en donde se presenta enriquecimiento o empobrecimiento notable de algunos elementos.

▪ **Sub-región de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta**

Esta zona se delimita claramente por su empobrecimiento en As, B, Bi, Au, Ce, Cs, Ge, Hf, Hg, Lu, Nb, Pb, La, Li, Zr, Y, N, Sn, Sb, U, Si y C. Se presentan localmente cuencas empobrecidas en Be, Dy, Er, F, Ga, Gd, Co, Ho, I, Zn, Pb, S, Yb, W, Se, V, Ta, Zr y Nd

En ésta misma zona se presenta enriquecimiento de Ba, Co (especialmente en el horizonte profundo), Cl, F, Gd, Ga, Br, I, Nd, P, Pt, Sr, K, Mg, Mn, Na y de Fe. Localmente se presentan cuencas enriquecidas en Al, Cu, F, Ce, Eu, Dy, Er, Ga, Ho, Lu, Pb, Tb, Ti, Sm, In, Nd, Yb, Pd, Sc, C y S (horizonte profundo).

▪ **Sub-región de Guajira**

En el extremo septentrional de la Guajira (Alta Guajira) se presenta una zona caracterizada por enriquecimiento en B, Be, Cs, Cl, F, Br, I, Li, S, Rb y As; de Fe y Sc en el horizonte profundo, y de

Al, Na, K, Mg, Pd, Zn y Ga en el horizonte superficial. En ésta misma zona se presenta empobrecimiento en Hf, Hg, Zr, Si y C en el horizonte superficial.

Hacia la media y baja Guajira se presenta empobrecimiento en casi todos los elementos (B, Be, Bi, Au, Cs, Ce, Co, Cu, Eu, F, Dy, Er, Ga, Gd, Ge, Ho, Hg, Pd, Lu, Nd, In, Nb, La, Li, Nd, Pr, Ni, Pb, Mo, Zn, S, Tm, Y, Yb, Nd, W, Pt, Sn, Sb, Sc, Se, U, V, Ta, Tb, Sm, Ti, Al, Fe, y C; Mg, Rb, Zr, y Cd en el horizonte profundo y P muy localmente. Enriquecimiento local se presenta en ésta zona para el Cl y el I (horizonte profundo).

5.8.2. Patrones de distribución espacial de elementos

Para los elementos Al, Bi, C, C Org, F, Lu, S, Rb, Pt, Pb, Tm, Ti, Y e Yb en sedimentos profundos, y C Org, Gd, Tb, Sm y P en sedimentos superficiales; el rango superior de concentración no se muestra debido a la presencia de muchos valores anómalos que hacen que la varianza aumente considerablemente. Estos puntos se eliminaron del análisis geoestadístico, por lo que las zonas de mayor acumulación de éstos elementos se visualizan y analizan en los mapas de concentración de elementos por cuencas.

El rango inferior de los cuantiles para Au, C Org y Si en sedimentos profundos y para Br, Ge, Ta y U en sedimentos superficiales, por la presencia de muchos valores extremos inferiores, se visualizan y analizan en los mapas de concentración de elementos por cuencas.

Los mapas de Cr, Co, Cd, Ca, Ba, Au, Cu, Fe, Hg, I, Mg, Mn, Na, Nb, Tm, Sn, Si, Pt, Pd, Yb, Zr en sedimentos superficiales y As, Cl, Cr, I, Fe, Mg, Ni, Na, Sm, Sr, Zr en sedimentos profundos se presentan con 7 rangos intercuantiles para resaltar los patrones de distribución. Estos patrones fueron revelados previamente con las técnicas del análisis exploratorio de datos espaciales AEDE descritas en el informe “Análisis estadístico univariado”.

5.8.2.1. Zonas de enriquecimiento de elementos

El patrón de distribución para la mayoría de elementos es consistente en el horizonte superficial y en el horizonte profundo con algunas diferencias puntuales.

La distribución espacial de los elementos en sedimentos de planicie de inundación tanto en el horizonte superficial como en el horizonte profundo, permite diferenciar tres grandes regiones o provincias de enriquecimiento de los elementos químicos.

5.8.2.1.1. Región Oriental (Orinoquía - Amazonía)

Esta región se caracteriza por ser una zona de empobrecimiento (concentraciones relativas más bajas) en la mayoría de elementos con excepción de Zr, Hf y Si. Esta zona corresponde al dominio precámbrico del Escudo Guayanés.

▪ Zona de enriquecimiento de Hf-Zr-Si

Hacia el extremo oriental de ésta región en zona limítrofe con Venezuela se presenta empobrecimiento máximo, de Al, Ag, Be, As, Ba, Co, Cd, Cu, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, F, Ho, In, Mn, Mo, P, Pb, Rb, Sc, Sm, Tb, Zn, Tl, V, Fe, K, Mg, y Na

En ésta región se presenta enriquecimiento máximo en Hf, Zr y Si, y corresponde al dominio o provincia de enriquecimiento de Hf-Zr-Si.

Hacia el extremo Sur hacia la Amazonía en zona limítrofe con Brasil y Venezuela, se presenta una zona de empobrecimiento en B, Ce, Cr, Cs, La, Li, Nd, Pr, Ni, Pd, Sr, Th, S, Y, Yb, Tm, y W.

▪ **Zona de enriquecimiento de Nb-U-Sn-Yb-Ti-Ta**

Un poco más hacia el sur en zona limítrofe con Brasil se presenta una pequeña región de enriquecimiento en Nb, U, Sn, Yb, y un poco menos intensa en Ti y Ta. Esta pequeña región se constituye en una zona de enriquecimiento de los elementos Nb-U-Sn-Yb-Ti-Ta.

5.8.2.1.2. Región Central de influencia del sistema cordillerano Andino (influencia de las Cordilleras Oriental y Central)

En ésta región se presenta enriquecimiento de elementos (concentraciones relativas más altas), especialmente hacia la margen izquierda del río Magdalena hacia el nororiente de Antioquia y que se extiende para algunos elementos hacia la zona de influencia de la Cordillera Oriental.

▪ **Zona de enriquecimiento de Ag-Au-Ba-Bi-As-Cd-Co-Cr-Cu-Eu-Ga-Hg-Ho-In-Mn-Mo-Ni-Pb-Pd-Pt-Sb-Se-Sc-Ta-Zn-Ti-W-V-Fe-Mg-Ca-Al**

Hacia el extremo mas occidental de la zona de estudio en zona de influencia de la Cordillera Central se delimita una zona enriquecida en Ag, Au, Ba, Bi, As, Cd, Co, Cr, Cu, Eu, Ga, Hg, Ho, In, Mn, Mo, Ni, Pb, Pd, Pt, Sb, Se, Sc, Ta, Zn, Ti, W, V, Fe, Mg, Ca y Al, la cuál se continúa un poco mas tenuemente hacia la zona de influencia de la Cordillera Oriental en la Cuenca del Magdalena.

Esta zona se constituye en una zona de enriquecimiento de Ag-Au-Ba-Bi-As-Cd-Co-Cr-Cu-Eu-Ga-Hg-Ho-In-Mn-Mo-Ni-Pb-Pd-Pt-Sb-Se-Sc-Ta-Zn-Ti-W-V-Fe-Mg-Ca-Al.

▪ **Zona de enriquecimiento de Se-Ta-Bi-Be-As-B-Ce-Cd-Cs-Dy-Er-Eu-Gd-F-Ge-Ho-La-Li-Lu-N-Nb-Nd-Pr-P-Pb-Rb-Sm-Sn-Th-Tb-U-Y-Tm-Al-Ca**

Cruzando la región Andina y en zona de influencia predominante de la Cordillera Oriental se delimita una zona de enriquecimiento de Se, Ta, Bi, Be, As, B, Ce, Cd, Cs, Dy, Er, Eu, Gd, F, Ge, Ho, La, Li, Lu, N, Nb, Nd, Pr, P, Pb, Rb, Sm, Sn, Th, Tb, U, Y, Tm y Al y Ca (horizonte superficial), que se continúa para algunos elementos hacia la zona anterior de influencia de la Cordillera Central.

Esta zona se constituye en una zona de enriquecimiento de Se-Ta-Bi-Be-As-B-Ce-Cd-Cs-Dy-Er-Eu-Gd-F-Ge-Ho-La-Li-Lu-N-Nb-Nd-Pr-P-Pb-Rb-Sm-Sn-Th-Tb-U-Y-Tm-Al-Ca.

5.8.2.1.3. Región Costera del Caribe (Sierra Nevada de Santa Marta y Guajira)

En ésta región se presenta empobrecimiento (concentraciones relativas bajas) para la mayoría de elementos con excepción de elementos como Na, Cl, Sr, Br, B, Cl, Cs, F, I, Li, Ca, S y K.

▪ **Zona de enriquecimiento de Br-Cl-I-Cs-F-Li-B-S-Na-K-Ca**

Hacia La Guajira, especialmente hacia la Alta Guajira se presenta enriquecimiento en Br, Cl, I, Cs, F, Li, B, Ca y S; en menor grado de Na, y K. En ésta zona se delimita claramente un dominio de los elementos Br-Cl-I-Cs-F-Li-B-S-Na-K-Ca.

▪ **Zona de enriquecimiento de Na-Ba-Ca-Eu-F-I-Sr-K-Nd-P-Mg-Er-Dy-Mn-Co-W-Ti-V-Ga**

Hacia el sur de la costa Caribe en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta, se encuentran enriquecidos el Na, Ba, Ca, Eu, F, I, Sr, K, Nd, P, Mg, Er, Dy, Mn, Co, W, Ti, V, Ga y Al (especialmente en el horizonte superficial).

Esta zona constituye una zona de enriquecimiento de Na-Ba-Ca-Eu-F-I-Sr-K-Nd-P-Mg-Er-Dy-Mn-Co-W-Ti-V-Ga-Al. Esta zona se extiende hacia el delta del río Magdalena para algunos elementos.

5.8.2.2. Regiones o provincias de dominio de elementos y sus asociaciones

Los patrones de distribución de los elementos delimitan zonas de enriquecimiento que pueden denominarse regiones o provincias de dominio de elementos o de asociaciones de elementos.

Las regiones o provincias de dominio geoquímico de los elementos se presentan como elementos en los mapas de distribución y como asociaciones de elementos en los mapas de factores de asociación.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Hf-Zr-Si**

Esta asociación se marca fuertemente con un dominio localizado hacia la zona oriental de Colombia, en los Llanos Orientales hacia la zona limítrofe de Colombia con Venezuela y Brasil en una zona de dominio de formaciones precámbricas del Escudo de Guayana y se continúa con menor intensidad hacia la zona de piedemonte.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Bi-Cs-Pb-Th**

Esta asociación presenta un dominio que está marcado fuertemente en la zona de influencia de las Cordilleras Oriental y Central y se continúa mas débilmente hacia la zona del Catatumbo y en el Valle Inferior del Magdalena. Existe otra zona de éste dominio que se marca mas débilmente en zona de los Llanos Orientales, localmente hacia la Orinoquía y en otra franja en la Amazonía en límites con Brasil.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Na-Sr-Cl**

Esta asociación se marca fuertemente en un dominio localizado en la zona costera del Caribe con máxima intensidad en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Existe otra zona de dominio de ésta asociación que se manifiesta en el extremo sur-occidental de la zona de estudio, en la región de influencia de la Cordillera Central.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Gd-Nd-Sc-Sm**

Esta asociación presenta un dominio localizado en toda la zona de influencia de las Cordilleras Central y Oriental y se continúa hacia la zona Caribe en área de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta.

También presenta fuerte enriquecimiento en la zona del Magdalena medio, y hacia la Sierra Nevada de Santa Marta.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Be-Dy-Eu-Ga**

Esta asociación presenta un dominio que se localiza en la parte central de influencia de la zona Andina y se marca fuertemente en zona de influencia de la Cordillera Oriental. Presenta una zona más débil hacia la Guajira alta.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de B-Hf-Lu-Nb**

Esta asociación presenta un dominio localizado en la zona central de influencia andina y se marca fuertemente en zona del Magdalena medio. Presenta otra zona diferenciada hacia la Amazonía en los límites entre Colombia y Brasil.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Eu-Gd-Sm-Be**

Esta asociación presenta un dominio que se manifiesta fuertemente en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta, en zona de influencia de la Cordillera Central y hacia la zona de confluencia del río Cauca con el río Magdalena.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Sn-Ti-Tm-U**

Esta asociación presenta una zona de dominio que conforma una franja que se extiende desde la parte central en el Magdalena Medio hacia el sur en la Amazonía.

También presenta una fuerte expresión en zona de influencia de la Cordillera Oriental hacia el departamento de Santander y en la Amazonía en la zona limítrofe con Brasil. Presenta otra zona mas débil en la zona nor-oriental de la Orinoquía.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Al-Tl-Tb-Sm**

Esta asociación presenta un dominio que tiene expresión fuerte en la zona de confluencia del río Cauca al río Magdalena en zona de influencia de la Cordillera Central y se continúa débilmente en el Magdalena Medio hacia zona de influencia de la Cordillera Oriental.

Tiene otra expresión en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta especialmente en el horizonte profundo de los sedimentos de planicie de inundación.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Hf-Zr-Nb-Sn**

Esta asociación presenta un dominio marcado hacia la zona oriental de Colombia, especialmente en el extremo nor-oriental en límites con Venezuela.

Tiene expresiones locales mas débiles en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta y en áreas muy locales de influencia de la Cordillera Oriental.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Sc-Ga-Tb**

Esta asociación tiene un dominio bien marcado en la zona de influencia de la Cordillera Central que se continúa hacia la Costa Caribe en la zona del Magdalena bajo.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Y-Zr**

Esta asociación marca un dominio que incluye la zona de influencia de las dos cordilleras Central y oriental y se continúa hacia el sur en la Amazonía en la zona limítrofe entre Colombia y Venezuela.

Tiene expresión adicional en la zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta y en el extremo nor-oriental de la Orinoquía en límites con Venezuela.

▪ **Dominio o provincia de enriquecimiento de Tb-V**

Esta asociación marca dominio en toda la zona de influencia de las Cordilleras Central y Oriental hasta la zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta. Se marca fuertemente en la zona de influencia de la Cordillera central hacia la parte sur de la región del Catatumbo.

5.11. DISTRIBUCION DE ELEMENTOS Y ACTIVIDADES ANTROPICAS

El horizonte superficial (A0-25) de los sedimentos de planicie de inundación refleja aportes geogénicos recibidos de la cuenca de captación de la cuenca y adicionalmente aportes de actividades antrópicas recientes y de la precipitación atmosférica. El horizonte superficial (A₀₋₂₅) representa procesos de acumulación mas recientes, aportes de precipitación atmosférica y aportes de actividades antrópicas de la cuenca de cada cuerpo acuoso. El horizonte mas profundo (hasta 2m) muestra acumulaciones mas antiguas y mas relacionadas con aporte geogénico de la cuenca de captación muestreada.

En la mayoría de los casos los contenidos de elementos en los sedimentos de planicie de inundación es consistente tanto en el horizonte superficial como en el horizonte profundo, con excepciones que reflejan acumulación de algunos elementos como N, Hg P y muy puntualmente Cd en el horizonte superficial que recibe aporte de metales no solo de origen geogénico sino también de origen antropogénico y de precipitación atmosférica. Elementos como el S, Ni, Ag, As, La, Lu y Ho por el contrario se presentan mas enriquecidos en el horizonte profundo.

En informes particulares se presentarán análisis y aplicaciones específicas de los dominios, asociaciones y zonas de enriquecimiento de elementos en el territorio y se analizará su correspondencia con los terrenos geológicos y su utilidad y aplicación en la búsqueda de recursos minerales, planificación de salud y agricultura y en la planeación del desarrollo y uso del territorio.

6. CONCLUSIONES

1. El muestreo sistemático del territorio utilizando sedimentos de planicie de inundación en un muestreo de Ultra Baja Densidad tomando como unidad de muestreo grandes cuencas (500 a 6000 km² de cuenca de captación), ha demostrado ser la alternativa costo-eficiente para definir las provincias, dominios y patrones de distribución de los elementos químicos en el territorio colombiano en pocos años.
2. El procesamiento estadístico y geoestadístico de los datos permitió, elaborar mapas que representan zonas de acumulación o empobrecimiento de elementos y visualizan su distribución espacial delimitando dominios de los diferentes elementos analizados.
3. Los mapas de distribución por cuencas permiten diferenciar regiones con altos, medios y bajos contenidos de elementos y dilucidar grandes regiones de dominio de elementos químicos:

Región Oriental (Orinoquía y Amazonía), la cuál se caracteriza por presentar bajas concentraciones para la mayoría de elementos analizados y enriquecimiento en Hf, Zr y Si. En ésta región es muy marcada la baja concentración o empobrecimiento de los elementos Ag, As, Ba, Be, Cd Co, Cu, Cl, F, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pt, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Tl, V, Zn, Na y K. Los elementos Hf, Zr y Si delimitan una zona de altas concentraciones o enriquecimiento en la Orinoquía-Amazonía especialmente hacia el extremo nor-oriental en la zona limítrofe con Venezuela, evidenciando la asociación Hf- Zr y el enriquecimiento de Si en ésta zona, cuyo posible origen está en rocas del escudo precámbrico de Guyana.

Otros elementos aunque no presentan enriquecimiento o empobrecimiento a nivel regional, si presentan zonas de enriquecimiento local, tal es el caso de los elementos B, Bi, Ce, Cs, Dy, Eu, Er, Gd, Hf, Hg, Ho, La, Lu, Nd, Nb, Pb, Pr, Sm, Sn, Ta, Tb, Th, Zr, Tm, U, Y, Yb, Si y Ti que presentan enriquecimiento local hacia el sur de Guainía – nororiente del Vaupés, en zona limítrofe con Brasil. El Nb, Y, Sn, Ta, Ti, en particular además de la zona anterior presenta una zona de enriquecimiento regional en la Orinoquía. El Bi, Pr, Tm, presentan una zona de enriquecimiento muy local hacia la Orinoquía en afluentes del río Vichada y el Au presenta enriquecimiento muy localizado en el nor-oriental de la Orinoquía en límites con Venezuela y en Guainía hacia el norte y en su extremo sur en límites con Brasil. El Ga presenta un enriquecimiento local en la Orinoquía entre los ríos Vichada y Guaviare, y el Ge en la Amazonía en el Guainía y en la Orinoquía en afluentes del río Vichada. El Yodo (I) y el Br presentan una zona de enriquecimiento local hacia el norte del Guainía en afluentes del río Guainía. El Paladio (Pd) y el W, presentan un enriquecimiento muy local en la Amazonía, en el Guainía sur.

Región Central de Influencia del sistema cordillerano Andino, caracterizada por presentar contenidos medios a altos de la mayoría de elementos. En ésta región se presentan las siguientes subregiones:

- **Sub-región Andina de influencia de la Cordillera Oriental**, en donde los elementos Ag, As, B, Be, Bi, Cs, Ce, Eu, F, Dy, Er, Ga, Gd, Ge, Ho, Cd, Lu, Nd, In, Nb, La, Li, Nd, Pr, Ni, Pb, Mo, Zn, P, S, Tm, Y, Yb, N, W, Sn, Tm, K, C, presentan máximas concentraciones y enriquecimiento regional especialmente en la zona que confluye hacia el Magdalena medio y la región nor-oriental de Santander y de Santander del Norte hacia el Catatumbo. Localmente existen zonas de enriquecimiento de Ba, Na y Al, hacia el Magdalena medio y la región del

Catatumbo; Au, y Zr, en Santander del Sur; Ce, Nd, Nb, Li, Nd, Pr, Pb, S, Sn, Rb, Sb, Se, U, V, Ta, Tb y Sm en zonas del piedemonte Llanero y hacia Casanare; Fe y Cl, en la parte central en el altiplano Cundiboyacense; Hf, Hg, Pt y Sr hacia el Magdalena Medio; Pd y Pt hacia el sur de la región al norte del departamento de Caquetá.

- **Sub-región Andina de influencia de la Cordillera Central**, la cuál se caracteriza por altas concentraciones de Ag, As, Ba, Bi, Au, Co, Cu, Eu, Ga, Gd, Ge, Ho, Hg, Pd, In, Ni, Pb, S, Tm, Yb, W, Pt, Sc, Ta, Tb, Sr, Ti, Mg, Mn, Al, Fe y C. Los elementos Be-Bi, Cs, Dy, Er, Cd, Lu, Nb, Zn, Y, N, Sn, Sb, Se, V y Sm, presentan enriquecimiento local en el Magdalena alto y medio y el Na en la zona del alto Magdalena
- **Sub-región de influencia del río Cauca**, en donde aunque la mayoría de elementos se encuentran en niveles medios de concentración los elementos Au, Co, Cu, Ga, Hg, Pd, Ni, W, Pt, Sc, V, Mg, Mn y el Fe, presentan enriquecimiento en los dos horizontes y los elementos Ag, Br, I, In, Zn, Se, Ti y C en el horizonte profundo. Hacia la confluencia del río Cauca con el Magdalena en zona de influencia de la serranía de San Lucas por un lado y de el extremo septentrional la cordillera Central, aparece una zona enriquecida en Au, Ag, Ho, Lu, Zn, Tm, Yb, Eu, Dy, Er. En ésta misma zona se presenta enriquecimiento localizado de Co, Cu, Ga, Gd, Hg, Pd, Ni, Pb, Cl, As, Pt, Cd, Nd, Pr, Tb, Sm, Sb, Se y V especialmente en el horizonte mas profundo reflejando unas veces los aportes de la Serranía de San Lucas y otras veces los aportes de la Cordillera Central.

Región Costera del Caribe, en donde la distribución de los niveles de elementos diferencia varias zonas de enriquecimiento o empobrecimiento notable de algunos elementos. En ésta región se presentan las siguientes subregiones:

- **Sub-región de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta**, en donde se presenta claramente el empobrecimiento en As, B, Bi, Au, Ce, Cs, Ge, Hf, Hg, Lu, Nb, Pb, La, Li, Zr, Y, N, Sn, Sb, U, Si y C. Se presentan localmente cuencas empobrecidas en Be, Dy, Er, F, Ga, Gd, Co, Ho, I, Zn, Pb, S, Yb, W, Se, V, Ta, Zr y Nd. En ésta zona se presenta enriquecimiento de Ba, Co (especialmente en el horizonte profundo), Cl, F, Gd, Ga, Br, I, Nd, P, Pt, Sr, K, Mg, Mn, Na y de Fe. Localmente se presentan cuencas enriquecidas en Al, Cu, F, Ce, Eu, Dy, Er, Ga, Ho, Lu, Pb, Tb, Ti, Sm, In, Nd, Yb, Pd, Sc, C y S (horizonte profundo).
- **Sub-región de Guajira**, en la cuál hacia el extremo septentrional de la Guajira (Alta Guajira) se presenta una zona caracterizada por enriquecimiento en B, Be, Cs, Cl, F, Br, I, Li, S, Rb y As; de Fe y Sc en el horizonte profundo, y de Al, Na, K, Mg, Pd, Zn y Ga en el horizonte superficial. En ésta zona se presenta empobrecimiento en Hf, Hg, Zr, Si y C en el horizonte superficial. Hacia la media y baja Guajira se presenta empobrecimiento en casi todos los elementos (B, Be, Bi, Au, Cs, Ce, Co, Cu, Eu, F, Dy, Er, Ga, Gd, Ge, Ho, Hg, Pd, Lu, Nd, In, Nb, La, Li, Nd, Pr, Ni, Pb, Mo, Zn, S, Tm, Y, Yb, Nd, W, Pt, Sn, Sb, Sc, Se, U, V, Ta, Tb, Sm, Ti, Al, Fe, y C; Mg, Rb, Zr, y Cd en el horizonte profundo y P muy localmente. Enriquecimiento local se presenta en ésta zona para el Cl y el I (horizonte profundo).

4. La distribución espacial de los elementos en sedimentos de planicie de inundación tanto en el horizonte superficial como en el horizonte profundo, permite diferenciar tres grandes regiones o provincias de enriquecimiento de los elementos químicos.

Región Oriental (Orinoquía - Amazonía), caracterizada por ser una zona de empobrecimiento (concentraciones relativas más bajas) en la mayoría de elementos y enriquecimiento de Zr, Hf y Si. Esta zona corresponde al dominio precámbrico del Escudo Guayanés.

- **Zona de enriquecimiento de Hf-Zr-Si**, localizada hacia el extremo oriental de ésta región en zona limítrofe con Venezuela en zona de empobrecimiento máximo, de Al, Ag, Be, As, Ba, Co, Cd, Cu, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, F, Ho, In, Mn, Mo, P, Pb, Rb, Sc, Sm, Tb, Zn, Tl, V, Fe, K, Mg, y Na.
- **Zona de enriquecimiento de Nb-U-Sn-Yb-Ti-Ta**, localizada un poco más hacia el sur de la anterior, en zona limítrofe con Brasil.

Región Central de influencia del sistema cordillerano Andino (influencia de las Cordilleras Oriental y Central), en la cuál se presenta enriquecimiento de elementos (concentraciones relativas más altas), especialmente hacia la margen izquierda del río Magdalena hacia el nororiente de Antioquia y que se extiende para algunos elementos hacia la zona de influencia de la Cordillera Oriental.

- **Zona de enriquecimiento de Ag-Au-Ba-Bi-As-Cd-Co-Cr-Cu-Eu-Ga-Hg-Ho-In-Mn-Mo-Ni-Pb-Pd-Pt-Sb-Se-Sc-Ta-Zn-Ti-W-V-Fe-Mg-Ca-Al**, localizada hacia el extremo mas occidental de la zona de estudio en zona de influencia de la Cordillera Central, la cuál se continúa un poco mas tenuemente hacia la zona de influencia de la Cordillera Oriental en la Cuenca del Magdalena.
- **Zona de enriquecimiento de Se-Ta-Bi-Be-As-B-Ce-Cd-Cs-Dy-Er-Eu-Gd-F-Ge-Ho-La-Li-Lu-N-Nb-Nd-Pr-P-Pb-Rb-Sm-Sn-Th-Tb-U-Y-Tm-Al-Ca**, localizada cruzando la región Andina y en zona de influencia predominante de la Cordillera Oriental, la cuál se continúa para algunos elementos hacia la zona anterior de influencia de la Cordillera Central.

Región Costera del Caribe (Sierra Nevada de Santa Marta y Guajira), en donde se presenta empobrecimiento (concentraciones relativas bajas) para la mayoría de elementos con excepción de elementos como Na, Cl, Sr, Br, B, Cl, Cs, F, I, Li, Ca, S y K.

- **Zona de enriquecimiento de Br-Cl-I-Cs-F-Li-B-S-Na-K-Ca**, localizada hacia La Guajira, especialmente en el extremo norte de la Alta Guajira.
- **Zona de enriquecimiento de Na-Ba-Ca-Eu-F-I-Sr-K-Nd-P-Mg-Er-Dy-Mn-Co-W-Ti-V-Ga**, localizada hacia el sur de la costa Caribe en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta.

5. Los patrones de distribución de los elementos delimitan zonas de enriquecimiento que pueden denominarse regiones o provincias de dominio de elementos o de asociaciones de elementos. Los principales dominios identificados son:

- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Hf-Zr-Si**, cuya asociación se marca fuertemente con un dominio localizado hacia la zona oriental de Colombia, en los Llanos Orientales hacia la zona limítrofe de Colombia con Venezuela y Brasil en una zona de dominio de formaciones precámbricas del Escudo de Guayana, la cual se continúa con menor intensidad hacia la zona de piedemonte.

- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Bi-Cs-Pb-Th**, cuya asociación presenta un dominio que está marcado fuertemente en la zona de influencia de las Cordilleras Oriental y Central y se continúa mas débilmente hacia la zona del Catatumbo y en el Valle Inferior del Magdalena. Existe otra zona de éste dominio que se marca mas débilmente en zona de los Llanos Orientales, localmente hacia la Orinoquía y en otra franja en la Amazonía en límites con Brasil.
- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Na-Sr-Cl**, cuya asociación se marca fuertemente en un dominio localizado en la zona costera del Caribe con máxima intensidad en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta. Existe otro dominio de ésta asociación que se manifiesta en el extremo sur-occidental de la zona de estudio, en la región de influencia de la Cordillera Central.
- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Gd-Nd-Sc-Sm**, cuya asociación presenta un dominio localizado en toda la zona de influencia de las Cordilleras Central y Oriental y se continúa hacia la zona Caribe en área de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta. También presenta fuerte enriquecimiento en la zona del Magdalena medio, y hacia la Sierra Nevada de Santa Marta.
- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Be-Dy-Eu-Ga**, cuya asociación presenta un dominio que se localiza en la parte central de influencia de la zona Andina y se marca fuertemente en zona de influencia de la Cordillera Oriental. Presenta una zona más débil hacia la Guajira alta.
- **Dominio o provincia de enriquecimiento de B-Hf-Lu-Nb**, cuya asociación presenta un dominio localizado en la zona central de influencia andina y se marca fuertemente en zona del Magdalena medio. Presenta otra zona diferenciada hacia la Amazonía en los límites entre Colombia y Brasil.
- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Eu-Gd-Sm-Be**, cuya asociación presenta un dominio que se manifiesta fuertemente en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta, en zona de influencia de la Cordillera Central y hacia la zona de confluencia del río Cauca con el río Magdalena.
- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Sn-Ti-Tm-U**, cuya asociación presenta una zona de dominio que conforma una franja que se extiende desde la parte central en el Magdalena Medio hacia el sur en la Amazonía. También presenta una fuerte expresión en zona de influencia de la Cordillera Oriental hacia el departamento de Santander y en la Amazonía en la zona limítrofe con Brasil. Presenta otra zona mas débil en la zona nor-oriental de la Orinoquía.
- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Al-Tl-Tb-Sm**, cuya asociación presenta un dominio que tiene expresión fuerte en la zona de confluencia del río Cauca al río Magdalena en zona de influencia de la Cordillera Central y se continúa débilmente en el Magdalena Medio hacia zona de influencia de la Cordillera Oriental. Tiene otra expresión en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta especialmente en el horizonte profundo de los sedimentos de planicie de inundación.

- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Hf-Zr-Nb-Sn**, cuya asociación presenta un dominio marcado hacia la zona oriental de Colombia, especialmente en el extremo nor-oriental en límites con Venezuela. Tiene expresiones locales mas débiles en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta y en áreas muy locales de influencia de la Cordillera Oriental.
- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Sc-Ga-Tb**, cuya asociación tiene un dominio bien marcado en la zona de influencia de la Cordillera Central que se continúa hacia la Costa Caribe en la zona del Magdalena bajo.
- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Y-Zr**, cuya asociación marca un dominio que incluye la zona de influencia de las dos cordilleras Central y oriental y se continúa hacia el sur en la Amazonía en la zona limítrofe entre Colombia y Venezuela. Tiene expresión adicional en la zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta y en el extremo nor-oriental de la Orinoquía en límites con Venezuela.
- **Dominio o provincia de enriquecimiento de Tb-V**, cuya asociación marca dominio en toda la zona de influencia de las Cordilleras Central y Oriental hasta la zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta. Se marca fuertemente en la zona de influencia de la Cordillera central hacia la parte sur de la región del Catatumbo.

6. En la mayoría de los casos los contenidos de elementos en los sedimentos de planicie de inundación es consistente tanto en el horizonte superficial como en el horizonte profundo, con excepciones que reflejan acumulación de algunos elementos en el horizonte superficial que recibe aporte de metales no solo de origen geogénico sino también de origen antropogénico y de precipitación atmosférica.

7. La información y análisis generados en éste proyecto hacen necesario que se elaboren informes particulares en donde se efectúan análisis y aplicaciones específicas de los dominios, asociaciones y zonas de enriquecimiento de elementos en el territorio y se analice su correspondencia con los terrenos geológicos y su utilidad y aplicación en la búsqueda de recursos minerales, planificación de salud y agricultura y en los planes de desarrollo y uso del territorio.

7. RECOMENDACIONES

1. Para Colombia es de gran importancia y utilidad contar con una visión general de la distribución geoquímica de los elementos químicos para proyectar su desarrollo minero, agrícola, ambiental y de salud, para lo cual se ha demostrado con el presente trabajo, que para lograr un cubrimiento en corto tiempo de todo el país, el muestreo de Ultra Baja Densidad (UBD) utilizando sedimentos de planicie de inundación es el único medio costo-eficiente.

Por lo anterior se recomienda terminar el cubrimiento de las zonas restantes del occidente y sur de Colombia, con muestreo sistemático de sedimentos de planicie de inundación en una ultra baja densidad (UBD), de tal modo que en pocos años se complete el paisaje de distribución geoquímica de los elementos en el territorio colombiano.

2. Aprovechar la información, análisis y conclusiones del presente proyecto para elaborar informes particulares sobre aplicaciones específicas en recursos minerales, definición de terrenos geológicos, medio ambiente y salud, planeación agrícola y desarrollo territorial.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERSTEIN, I. H.. 1988. Applied Multivariate Analysis. New York: Springer-Verlag.
- BISHOP, C. M. 1995. Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford Press, Oxford, 482p.
- BISQUERRA, R. (1989). Introducción Conceptual al Análisis Multivariable. Barcelona: PPU.
- BRUNETON et al.. 1983. Contribución a la Geología del Oriente de Las Comisarías del Vichada y el Guainía (Colombia) Geología Norandina N. 6 Bogotá Colombia Pág. 3-12
- CABALLERO, H.; JAMES, M. Y MEJIA, I. 1988. Cartografía Fotogeológica de las Terrazas Aluviales en el Bajo Cauca y Bajo Nechí, Departamento de Antioquia. INGEOMINAS, Informe preparado para el Centro de Investigaciones Ambientales - Universidad de Antioquia, Medellín. 21 p.
- COMREY, A.L. 1985. Manual de Análisis Factorial. Madrid: Cátedra.
- CRESSIE, N. 1993. Statistics for Spatial Data, revised ed. John Wiley and Sons, New York. 900 p.
- CUADRAS, C. 1981. Métodos de Análisis Multivariante. Barcelona: Ed. Eunibar.
- DARNLEY, A.G., BJÖRKLUND, A., BØLVIKEN, B., GUSTAVSSON, N., KOVAL, P.V., PLANT, J.A., STEENFELT, A., TAUCHID, M., XIE XUEJING, GARRETT, R.G., & HALL, G.E.M. 1995. A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management: Recommendations for International Geochemical Mapping. Final report of IGCP Project 259. 2nd revised edition. Paris: UNESCO, 122p.
- DUQUE, H., 1979. Geotectónica y evolución de la región noroccidental de Colombia., INGEOMINAS, Bogotá.
- ETAYO, F. et al. 1983. Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia: publicación especial INGEOMINAS. 14 (1) 235 p., Bogotá.
- GALVIS, J., HUGUETT, G. & RUGE, P. 1979. Geología de la Amazonía Colombiana. Boletín Geológico Vol. XXII, No 3, p. 3 -86. Ingeominas. Bogotá.
- GEOLOGICAL SURVEY OF CHINA, 2001. Seminar on Regional Geochemical Exploration. Ministry of Land and Resources (MLR), China Geological Survey (CGS), CCOP, Beijing, China. 165 pp.
- HIMAT, 1977. Proyecto Cuenca Magdalena - Cauca. Convenio Colombo - Holandés, 15 p., Bogotá.
- IDEAM. 1996. Mapa de coberturas, uso y ocupación del espacio en Colombia. Bogotá.

- IDEAM. 1998 a. El medio ambiente en Colombia. Editor Pablo Leyva, 1ª. Ed. Santafé de Bogotá. 495 pp.
- IDEAM. 1998 b. Unidades geomorfológicas del territorio colombiano. Bogotá. 53 pp.
- IGAC. 1989. Atlas básico de Colombia, Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Bogotá.
- IGAC. 1992. Estudio general de suelos de los municipios de Codazzi, Manaure, La Paz, San Diego y Becerril. Bogotá.
- INGEOMINAS, 1972. Mapa Geológico del Departamento de La Guajira. Escala 1:100000.
- INGEOMINAS, 1981. Geología del Cuadrángulo I 13, Málaga, Boletín Geológico 24 No. 3. Bogotá
- INGEOMINAS. 1983. Mapa geológico generalizado del Dpto. de Bolívar. Memoria explicativa.
- INGEOMINAS. 1986. Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Memorias. 235 pp.
- INGEOMINAS. 1987a. Mapa hidrogeológico de Colombia. Memorias. Bogotá.
- INGEOMINAS, 1987b. Recursos minerales de Colombia. Tomos I y II. Publicaciones especiales de INGEOMINAS.
- INGEOMINAS, 1988. Mapa geológico de Colombia, Escala 1:1.500.000, Bogotá.
- INGEOMINAS. 1996. Mapa Geológico de la Cuenca Carbonífera Cesar – Ranchería, Escala 1:100.000.
- INGEOMINAS. 1997 a. Atlas geológico digital de Colombia. Versión 1.0. Memoria técnica. Bogotá. 252 pp.
- INGEOMINAS, 1997b. Mapa geológico generalizado del departamento de Arauca, Escala 1:250000.
- INGEOMINAS, 1997c. Mapa geológico generalizado del departamento de Norte de Santander, Escala 1:250000.
- INGEOMINAS. 1997 d. Mapa geológico generalizado del departamento de Sucre. Memoria explicativa.
- INGEOMINAS. 1997 e, Mapa geológico generalizado del Dpto. de Antioquia. Memoria explicativa.
- INGEOMINAS. 1998a. Mapa geológico generalizado de Santander. Escala 1:400000.
- INGEOMINAS, 1998b. Resumen estudio hidrogeológico de la Media y Baja Guajira Boletín Geológico Volumen 29

- INGEOMINAS. 1999. Mapa geológico generalizado del Dpto. del Cesar. Memoria explicativa.
- INGEOMINAS, 2004. Muestreo de ultra baja densidad (UBD) Fase II – zona oriental de Colombia, áreas Orinoco, Amazonas y Catatumbo, informe de muestreo, LT Geoperforaciones y Minería, Geominera S.A. y Geoconsulta Ltda.
- INGEOMINAS, MINERCOL, UPME. 2000. Minerales estratégicos para el desarrollo de Colombia. MEDC. 135 pp.
- IRVING, E. 1971. La evolución estructural de Los Andes más septentrionales de Colombia. INGEOMINAS. Boletín Geológico, Vol.19, No. 2, 80 p., Bogotá.
- KHOBZI, J. 1985. Evolución del río Magdalena entre 1923 y 1981 en relación con el contexto geomorfológico. Revista CIAF, Vol. 10, No. 1, pp. 73- 85, Bogotá
- MARIN R. R. 1992. Estadísticas sobre el recurso agua en Colombia. Ministerio de Agricultura, HIMAT, 2ª. Ed. Santafé de Bogotá. 412 pp.
- MARTÍNEZ, A. 1981. Subsistencia y geomorfología de la depresión inundable del río Magdalena. Revista CIAF, Vol. 6, No. 1 - 3, pp. 319 - 328, Bogotá.
- NORUSIS, M.J. Y SPSS, INC., 1993. SPSS for Windows. Base system user's guide release 6.0. Chicago, IL: SPSS Inc.
- OTTESEN, R.T.; et. al., 1989. Overbank sediment: a representative sample medium for regional geochemical mapping. Journal of Geochem. Explor. 32 p. 257-277.
- PALMER, A.L., 1999. Análisis de datos: etapa exploratoria. Madrid, Ed. Pirámide.
- PRIETO G; GONZALEZ L.M., 2003 a. Norma Técnica NT1, muestreo de sedimentos de Planicie de inundación para muestreo geoquímico de ultra baja densidad (UBD). INGEOMINAS, Bogotá.
- PRIETO G; GONZALEZ L.M., 2003 b. Norma Técnica NT2, preparación de sedimentos de Planicie de inundación para cartografía geoquímica de ultra baja densidad (UBD). INGEOMINAS, Bogotá.
- PRIETO G., MIRANDA J., ROSALES A., 2002. Muestreo de ultra baja densidad (UBD) Fase I – zona centro y norte, áreas Magdalena – Cauca y Caribe, informe de avance, muestreo, INGEOMINAS.
- PRIETO, G.; GONZÁLEZ, L. M.; VARGAS, O.; ESPINOSA, A. 2000. Manual de campo para el Atlas Geoquímico de Colombia. INGEOMINAS, Bogotá.
- PRORADAM, 1979. La Amazonía colombiana y sus recursos. Memoria técnica. República de Colombia, 283 pp., Bogotá.

- REIMMAN, C.; et. al. 1998. Environmental Geochemical Atlas of the Central Barents Region. Geological Survey of Norway. Trondheim.
- ROBERTSON, K. 1985. Dinámica fluvial y evolución del río Magdalena en el tramo Barrancabermeja - El Banco durante el holoceno superior. Revista CIAF, Vol. 10, No. 1, pp. 87 -97, Bogotá
- RODRÍGUEZ, E.; ULLOA, C. 1994. Geología de la plancha 189 - La Palma Memoria resumida. INGEOMINAS.
- ROSE A.W., HAWEKS, H.E.; WEBB, J.S. 1979. Geochemistry in mineral exploration. Academic Press, 657 pp.
- SALMINEN, R., TARVAINEN T., DEMETRIADES A., DURIS M., FORDYCE F., 1998. FOREGS Geochemical mapping field manual. Geological Survey of Finland, Guide 47, ESPOO. 45p.
- SCHAMEL, S. 1991. Middle and upper Magdalena basins, Colombia. Int K. T. Bible (editor) Active Margins Basins, AAPG Memoir 52: 283-301. Tulsa.
- THURSTON, J. et al., 2003. Integrated Geospatial Technologies. A guide to GPS, GIS and Data Logging. John Wiley & sons, Inc.
- TSCHANZ, C.; MARVIN R. 1974. Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta northeastern Colombia. US Geological Survey. Denver, Colorado.
- ULLOA C. Y RODRÍGUEZ E., 1979a. Geología del Cuadrángulo K-12, Guateque. INGEOMINAS. Vol XXII, No 1, pp. 1 – 84
- ULLOA, C., Y RODRÍGUEZ, E., 1979b. Geología de Plancha 170, Vélez y 190 Chiquinquirá. Inf. 1794. INGEOMINAS
- ULLOA C. Y RODRÍGUEZ E., 1981. - Geología del Cuadrángulo K-13, Tauramena. INGEOMINAS. Bol Geol, Vol24 No 2 Bogotá p 2-30
- VAN DER HAMMEN, T.; WERNER, J.; VAN DOMMELEN, H. 1973. Palynological record of the upheaval of the northern Andes: a study of the Pliocene and lower Quaternary of the Colombian eastern cordillera and the early evolution of its high Andean biota. The Quaternary of Colombia. El Cuaternario de Colombia, No. 2, pp 1-22, Holanda.
- VARGAS, R., ARIAS, A., JARAMILLO, L. & TELLEZ, N. 1976. Geología del Cuadrángulo I – 13 Málaga. Informe 1712, Ingeominas. Bucaramanga.
- WARD, D.E., et al. 1973. Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona. Departamento de Santander., Instituto Nacional Investigaciones Geológico Mineras, Boletín geológico XXI No 1-3.



- XIE, X.; Yin, B. 1993. Geochemical patterns from local to global. *Journal of Geochem. Explor.*, 47: 109-129 pp.
- XIE, X.J. 1995. Surficial and superimposed geochemical expressions for giant ore deposits. In: Clark, A.H.(Ed), *Giant Ore Deposits II*, 475-485. Kingston, Ont.
- YUNCHUAN, X., 2001. Geochemical data management and processing. En: *Seminar on Regional Geochemical Exploration*. Beijing, China.