

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

***“ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA POR DISPERSIÓN
SECUNDARIA DEL SURESTE DE LA INTERCUENCA ALTO MARAÑÓN IV
ENTRE BAMBAMARCA Y PISUQUIA, NORTE DEL PERÚ”***

PRESENTADO POR EL BACHILLER: César De La Cruz Poma

PARA OPTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE: Ingeniero Geólogo

CERRO DE PASCO – 2018

“UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN”
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

***“ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA POR DISPERSIÓN
SECUNDARIA DEL SURESTE DE LA INTERCUENCA ALTO MARAÑÓN IV
ENTRE BAMBAMARCA Y PISUQUIA, NORTE DEL PERÚ”***

Sustentado y aprobado por la comisión de jurados:

Dr. Magno Ledesma Velita
Presidente

Mg. Luis Arturo Lazo Pagán
MIEMBRO

Mg. Javier López Alvarado
MIEMBRO

Mg. Saturnino Flores Coágula
Asesor

DEDICATORIA:

A mis padres por la dicha de tenerlos.

AGRADECIMIENTOS:

Al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, por darme las facilidades de publicar la presente investigación, a los profesionales del Programa de Prospección Geoquímica por su apoyo.

ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

| | |
|---|----------|
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.1 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.1.1. <i>Formulación del problema</i> | 2 |
| 1.1.2. <i>Objetivos</i> | 3 |
| 1.1.3. <i>Justificación de la investigación</i> | 3 |
| 1.1.4 <i>Importancia y alcances de la investigación</i> | 4 |
| 1.2. ASPECTOS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO..... | 5 |
| 1.2.1. <i>Ubicación</i> | 5 |
| 1.2.2. <i>Accesibilidad</i> | 5 |
| 1.2.3. <i>Fisiografía</i> | 8 |
| 1.2.4. <i>Climas y vegetación</i> | 8 |
| 1.2.5. <i>Hidrografía</i> | 11 |
| 1.2.6. <i>Pendientes de las cuencas</i> | 15 |
| 1.2.7. <i>Unidades geomorfológicas</i> | 19 |

CAPITULO II

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| MARCO TEÓRICO | 25 |
| 2.1. ANTECEDENTES | 25 |
| 2.2. BASES TEÓRICO CIENTÍFICAS | 30 |

| | |
|---|----|
| 2.2.1. Aspectos fundamentales sobre tierras raras | 30 |
| 2.2.2 Parámetros estadísticos | 48 |
| 2.2.3. Parámetros geoquímicos | 59 |
| 2.3. MARCO GEOLÓGICO | 62 |
| 2.3.1. Estratigrafía regional..... | 62 |
| 2.3.1.1. Metamórficos del Neoproterozoico | 62 |
| 2.3.1.2. Sedimentarios y metamórficos silicoclásticos del Paleozoico inferior..... | 65 |
| 2.3.1.3. Sedimentarios siliciclásticos del Paleozoico superior | 66 |
| 2.3.1.4 Volcánicos del Paleozoico superior | 69 |
| 2.3.1.5. Sedimentarios carbonatados del Triásico - Jurásico..... | 71 |
| 2.3.1.6. Sedimentarios siliciclásticos del Cretácico..... | 72 |
| 2.3.1.7 Sedimentarios carbonatados del Cretáceo | 73 |
| 2.3.1.8 Sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo superior - Paleógeno..... | 74 |
| 2.3.1.9. Depósitos Cuaternarios (Q-al/fl/co/fg)..... | 75 |
| 2.3.1.10. Intrusivos del Paleozoico | 75 |
| 2.3.2. Geología Estructural | 78 |
| 2.3.2.1 Bloque del Marañón..... | 78 |
| 2.3.3. Geología Económica..... | 84 |
| 2.3.3.1. Franja I: Depósitos de Au en rocas meta-sedimentarias del Ordovícico y Silúrico Devónico | 85 |

| | |
|---|----|
| 2.3.3.2. Franja II: Depósitos Orogénicos de Au-Ag-Pb-Zn-Cu del Carbonífero Permiano | 86 |
| 2.3.3.3. Franja XVI: Depósitos Mississippi Valley de Pb-Zn del Eoceno - Mioceno..... | 87 |
| 2.5. HIPÓTESIS..... | 91 |
| 2.5.1 Hipótesis general..... | 91 |
| 2.5.2 Hipótesis específicos | 92 |

CAPITULO III

| | |
|--|-----------|
| METODOLOGÍA..... | 94 |
| 3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN..... | 94 |
| 3.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN..... | 94 |
| 3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN | 95 |
| 3.3.1. Etapa preliminar de gabinete | 95 |
| 3.3.2. Etapa de campo..... | 97 |
| 3.3.3. Etapa de manipulación y preparación de la muestra | 99 |
| 3.3.4. Etapa de gabinete..... | 100 |
| 3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA..... | 101 |
| 3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS | 101 |
| 3.6. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE MUESTRAS | 103 |
| 3.6.1. Ataque químico..... | 103 |
| 3.6.2. Métodos analíticos..... | 104 |
| 3.6.3. Límites de detección..... | 106 |
| 3.7. PROCESAMIENTO DE DATOS..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| 3.7.1 Parámetros Fisicoquímicos..... | 107 |
| 3.7.2 Control y calidad de datos | 108 |
| 3.8. ANÁLISIS DE DATOS | 112 |
| 3.8.1 Separación en poblaciones estadísticas..... | 113 |
| 3.9. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS..... | 114 |

CAPITULO IV

| | |
|---|------------|
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 117 |
| 4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS | 117 |
| 4.1.1. Parámetros fisicoquímicos..... | 117 |
| 4.1.2. Distribución y anomalías geoquímicas en la intercuenca Alto Marañón IV..... | 125 |
| 4.1.2.1. Distribución y anomalías geoquímicas de oro (Au)..... | 125 |
| 4.1.2.2. Distribución y anomalías geoquímicas de la plata (Ag) | 127 |
| 4.1.2.3. Distribución y anomalías geoquímicas de cobre (Cu)..... | 130 |
| 4.1.2.4. Distribución y anomalías geoquímicas de plomo (Pb) | 132 |
| 4.1.2.5. Distribución y anomalías geoquímicas de zinc (Zn)..... | 134 |
| 4.1.2.6. Distribución y anomalías geoquímicas de molibdeno (Mo) 136 | |
| 4.1.2.7. Distribución y anomalías geoquímicas de arsénico (As).... | 138 |
| 4.1.2.8. Distribución y anomalías geoquímicas de antimonio (Sb) . | 140 |
| 4.1.2.9. Distribución y anomalías geoquímicas de cobalto (Co) | 142 |
| 4.1.2.10. Distribución y anomalías geoquímicas de níquel (Ni) | 145 |
| 4.1.2.11. Distribución y anomalías geoquímicas de cromo (Cr)..... | 147 |
| 4.1.2.12. Distribución y anomalías geoquímicas de bario (Ba) | 149 |

| | |
|--|-----|
| 4.1.2.13. Distribución y anomalías geoquímicas de fósforo (P) | 151 |
| 4.1.2.14. Distribución y anomalías geoquímicas de manganeso (Mn) | 153 |
| 4.1.2.15. Distribución y anomalías geoquímicas de estroncio (Sr) . | 155 |
| 4.1.2.16. Distribución y anomalías geoquímicas de vanadio (V) | 157 |
| 4.1.2.17. Distribución y anomalías geoquímicas de lantano (La).... | 159 |
| 4.1.2.18. Distribución y anomalías geoquímicas de cerio (Ce) | 161 |
| 4.1.2.19. Distribución y anomalías geoquímicas de terbio (Tb) | 163 |
| 4.1.2.20. Distribución y anomalías geoquímicas de escandio (Sc). | 165 |
| 4.1.2.21. Distribución y anomalías geoquímicas de itrio (Y) | 167 |
| 4.1.2.22. Distribución y anomalías geoquímicas de niobio (Nb) | 168 |
| 4.1.2.23. Distribución y anomalías geoquímicas de galio (Ga) | 171 |
| 4.1.2.24. Distribución y anomalías geoquímicas de torio (Th) | 173 |
| 4.1.2.25. Distribución y anomalías geoquímicas de uranio (U) | 175 |
| 4.1.2.26. Distribución y anomalías geoquímicas del Cesio (Cs) | 177 |
| 4.1.2.27. Distribución y anomalías geoquímicas de rubidio (Rb) | 180 |
| 4.1.2.28. Distribución y anomalías geoquímicas del Iterbio (Yb) | 182 |
| 4.1.3. Correlaciones geoquímicas | 184 |
| 4.1.3.1 Correlaciones en sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (4_SSK) | 184 |
| 4.1.3.2. Sedimentarios carbonatados del Triásico Cretácico (5_SCTJ) | 186 |

| | |
|--|-----|
| 4.1.3.3. Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (6_SSPs) | 188 |
| 4.1.3.4. Volcánicos del Paleozoico superior (7_VPs) | 190 |
| 4.1.3.5. Metamórficos del Paleozoico (9_MP) | 191 |
| 4.1.3.6. Intrusivos del Paleozoico (10_IP)..... | 193 |
| 4.1.4 Análisis multivariar de componentes principales..... | 196 |
| 4.1.4.1. Asociaciones geoquímicas en sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (4_SSK)..... | 196 |
| 4.1.4.2. Sedimentarios carbonatados del Triásico Cretáceo (5_SCTJ) | 199 |
| 4.1.4.3. Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (6_SSPs) | 202 |
| 4.1.4.4. Volcánicos del Paleozoico superior (7_VPs) | 205 |
| 4.1.4.5 Metamórficos del Proterozoico (9_MP)..... | 208 |
| 4.1.4.6 Intrusivos del Paleozoico (10_IP)..... | 211 |
| 4.2. DISCUSIÓN | 214 |
| 4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS..... | 219 |

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

RELACIÓN DE MAPAS, FIGURAS Y CUADROS

Lista de mapas

- MAP-01-18 Distribución y anomalías geoquímicas de oro (Au).
- MAP-02-18 Distribución y anomalías geoquímicas de plata (Ag).
- MAP-03-18 Distribución y anomalías geoquímicas de cobre (Cu).
- MAP-04-18 Distribución y anomalías geoquímicas de plomo (Pb).
- MAP-05-18 Distribución y anomalías geoquímicas de zinc (Zn).
- MAP-06-18 Distribución y anomalías geoquímicas de molibdeno (Mo).
- MAP-07-18 Distribución y anomalías geoquímicas de arsénico (As).
- MAP-08-18 Distribución y anomalías geoquímicas de antimonio (Sb).
- MAP-09-18 Distribución y anomalías geoquímicas de cobalto (Co).
- MAP-10-18 Distribución y anomalías geoquímicas de níquel (Ni).
- MAP-11-18 Distribución y anomalías geoquímicas de cromo (Cr).
- MAP-12-18 Distribución y anomalías geoquímicas de bario (Ba).
- MAP-13-18 Distribución y anomalías geoquímicas de fósforo (P).
- MAP-14-18 Distribución y anomalías geoquímicas de manganeso (Mn).
- MAP-15-18 Distribución y anomalías geoquímicas de estroncio (Sr).
- MAP-16-18 Distribución y anomalías geoquímicas de vanadio (V).
- MAP-17-18 Distribución y anomalías geoquímicas de lantano (La).
- MAP-18-18 Distribución y anomalías geoquímicas de cerio (Ce).
- MAP-19-18 Distribución y anomalías geoquímicas de terbio (Tb).
- MAP-20-18 Distribución y anomalías geoquímicas de escandio (Sc).

MAP-21-18 Distribución y anomalías geoquímicas de itrio (Y).
MAP-22-18 Distribución y anomalías geoquímicas de niobio (Nb).
MAP-23-18 Distribución y anomalías geoquímicas de galio (Ga).
MAP-24-18 Distribución y anomalías geoquímicas de torio (Th).
MAP-25-18 Distribución y anomalías geoquímicas de uranio (U).
MAP-26-18 Distribución y anomalías geoquímicas de cesio (Cs).
MAP-27-18 Distribución y anomalías geoquímicas de rubidio (Rb).
MAP-28-18 Distribución y anomalías geoquímicas de iterbio (Yb).
MAP-29-18 Anomalías geoquímicas.

Lista de figuras

Figura 1.1. Ubicación y accesibilidad.

Figura 1.2 Relieve abrupto de laderas pronunciadas y ríos encañonados. Vista tomada desde el flanco oriental de la Cordillera Occidental (Anexo Mendan).

Figura 1.3. Climas.

Figura 1.4. Hidrografía.

Figura 1.5. Pendientes.

Figura 1.6. Relieve muy fuerte formando cordilleras agrestes, vista al SO de la localidad de Bolívar.

Figura 1.7. Relieve montañoso estructural de pendiente muy escarpada, formada en rocas sedimentarias. Vista al norte (aguas abajo del río Marañón), localidad de Caña Brava.

Figura 1.8. Unidades geomorfológicas.

Figura 1.9. Relieve montañoso de pendiente pronunciada a fuerte, formada en rocas intrusivas, disectado por la quebrada Gollón. Vista al NE.

Figura 1.10. Valle del río Marañón, vista al NO desde la localidad de Jecumbuy.

Figura 2.1. Comportamiento geoquímico de oro en ambientes primarios y secundarios.

Figura 2.2. Dispersión química de sedimentos fluviales en un ambiente geoquímico secundario oxidado.

Figura 2.3. Aureolas de dispersión en un suelo residual, resultado de la dispersión secundaria de una estructura mineralizada.

Figura 2.4. Patrones secundarios clásticos en suelos transportados, (a) por acción glacial y (b) por acción del viento.

Figura 2.5. Patrones secundarios hidromórficos.

Figura 2.6. Movilidad de los elementos químicos en condiciones superficiales, Goldschmidt, 1937.

Figura 2.7. Abundancia química de la corteza continental, tomado de Rudnick & Fountain, 1995.

Figura 2.8. Medidas de posición.

Figura 2.9. Diagrama de cajas.

Figura 2.10. Histograma de distribución de As.

Figura 2.11. Gráfico de probabilidad normal.

Figura 2.12. Correlación bivariada en ambientes intrusivos del Paleozoico.

Figura 2.13. Análisis clúster de datos geoquímica de sedimentos fluviales.

Figura 2.14. Cálculo del umbral geoquímico.

Figura 2.15 Cálculo del umbral geoquímico por el método gráfico.

Figura 2.16. Columna litoestratigráfica del sureste de la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 2.17. Afloramiento de metandesitas de color verde del Complejo Marañón (PE-cm), vista en la margen derecha de la quebrada Saumate en la localidad de Huanabamba.

Figura 2.18. Afloramiento de lavas andesíticas de color gris de la Formación Lavasen cubierto por abundante likens y musgo de color verde en la quebrada Quinahuayco, vista al este.

Figura 2.19. Afloramiento de areniscas blanquecinas del Grupo Goyllarisquizga sobre el Complejo Marañón. Vista al norte en la localidad de Chuquiten.

Figura 2.20. Dominios litoestratigráficos.

Figura 2.21. Unidades estructurales.

Figura 2.21. Franjas metalogenéticas.

Figura 2.23. Veta de cuarzo con relleno de fractura por tensión vista en el sector suroccidental Cerro Minas, área Lavador (Sánchez, 2006).

Figura 3.1. Tipo y diseño de investigación.

Figura 3.2. Diseño de muestreo sistemático estratificado.

Figura 3.3. Análisis de control de Pb en muestras duplicadas.

Figura 3.4. Análisis de control de Pb en muestras estándares.

Figura 3.5. Análisis de control de Cu en blancos gruesos y finos.

Figura 4.1. Dispersión geoquímica de sedimentos fluviales provenientes de unidades intrusivas del Paleozoico en un ambiente ácido ($\text{pH}=4.45$) y $\text{CE}=2061$, quebrada Saumate.

Figura 4.2. Dispersión geoquímica de sedimentos fluviales procedentes de lavas andesíticas de la formación Lavasen en un ambiente ligeramente oxidado ($\text{pH}=6.61$ y $\text{CE}=112 \mu\text{S}/\text{cm}$), vista al NO en la quebrada Achupa.

Figura 4.3 Distribución del potencial de hidrógeno (pH).

Figura 4.4. Box plots de oro en las nueve poblaciones.

Figura 4.5. Niveles de fondo y umbrales del oro en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.6. Box plots de plata en las nueve poblaciones.

Figura 4.7 Niveles de fondo y umbrales de la plata en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.8. Box plots de cobre en las nueve poblaciones.

Figura 4.9. Niveles de fondo y umbrales de cobre en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.10. Box plots de plomo en las nueve poblaciones.

Figura 4.11. Niveles de fondo y umbrales de plomo en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.12. Box plots de zinc en las nueve poblaciones.

Figura 4.13. Niveles de fondo y umbrales de plomo en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.14. Box plots de molibdeno en las nueve poblaciones.

Figura 4.15. Niveles de fondo y umbrales de molibdeno en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.16 Box plots de arsénico en las nueve poblaciones.

Figura 4.17 Niveles de fondo y umbrales de arsénico en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.18. Box plots de antimonio en las nueve poblaciones.

Figura 4.19. Niveles de fondo y umbrales de antimonio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.20. Box plots de cobalto en las nueve poblaciones.

Figura 4.21. Niveles de fondo y umbrales de cobalto en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.22. Box plots de níquel en las nueve poblaciones.

Figura 4.23. Niveles de fondo y umbrales de níquel en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.24. Box plots de cromo en las nueve poblaciones.

Figura 4.25 Niveles de fondo y umbrales de cromo en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.26. Box plots de bario en las nueve poblaciones.

Figura 4.27 Niveles de fondo y umbrales de bario en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.28. Box plots de fósforo en las nueve poblaciones.

Figura 4.29. Niveles de fondo y umbrales de fósforo en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.30 Box plots de manganeso en las nueve poblaciones.

Figura 4.31 Niveles de fondo y umbrales de manganeso en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.32. Box plots de estroncio en las nueve poblaciones.

Figura 4.33. Niveles de fondo y umbrales de estroncio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.34. Box plots de vanadio en las nueve poblaciones.

Figura 4.35. Niveles de fondo y umbrales de vanadio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.37. Box plots de lantano en las nueve poblaciones.

Figura 4.38. Niveles de fondo y umbrales de lantano en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.39. Box plots de cerio en las nueve poblaciones.

Figura 4.40. Niveles de fondo y umbrales de cerio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.41. Box plots de terbio en las nueve poblaciones.

Figura 4.42. Niveles de fondo y umbrales de terbio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.43. Box plots de escandio en las nueve poblaciones.

Figura 4.44. Niveles de fondo y umbrales de escandio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.45. Box plots de itrio en las nueve poblaciones.

Figura 4.46. Niveles de fondo y umbrales de itrio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.47. Box plots de niobio en las nueve poblaciones.

Figura 4.48. Niveles de fondo y umbrales de niobio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.49. Box plots de galio en las nueve poblaciones.

Figura 9.50. Niveles de fondo y umbrales de galio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.51. Box plots de torio en las nueve poblaciones.

Figura 4.52. Niveles de fondo y umbrales de torio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.53. Box plots de uranio en las nueve poblaciones.

Figura 4.54. Niveles de fondo y umbrales de uranio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.55. Box plots de cesio en las nueve poblaciones.

Figura 4.56. Niveles de fondo y umbrales de cesio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.57. Box plots de rubidio en las nueve poblaciones.

Figura 4.58. Niveles de fondo y umbrales de rubidio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.59. Box plots de iterbio en las nueve poblaciones.

Figura 4.60. Niveles de fondo y umbrales de iterbio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Figura 4.61. Correlaciones bivariadas en sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo.

Figura 4.62. Correlaciones bivariadas en sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico.

Figura 4.63. Correlaciones bivariadas en sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior.

Figura 4.64. Correlaciones bivariadas en volcánicos del Paleozoico superior.

Figura 4.65. Correlaciones bivariadas en metamórficos del Proterozoico.

Figura 4.66. Correlaciones bivariadas en intrusivos del Paleozoico.

Figura 4.67. Dendrograma en sedimentos silicoclásticos del Cretáceo.

Figura 4.68. Dendrograma en sedimentos carbonatados del Triásico Jurásico.

Figura 4.69. Dendrograma en sedimentos carbonatados del Triásico Jurásico.

Figura 4.70. Dendrograma en sedimentos volcánicos del Paleozoico superior.

Figura 4.71. Dendrograma en sedimentos metamórficos del Proterozoico.

Figura 4.72. Dendrograma en sedimentos intrusivos del Paleozoico.

Lista de cuadros

Cuadro 1.1. Unidades hidrográficas del área de estudio.

Cuadro 2.1. Principales propiedades físicas y químicas de los elementos de tierras raras, modificado de Gupta y Krishnamurthy, 2005.

Cuadro 2.2. Afinidad de los elementos de las fases principales que componen la tierra, (Goldschmidt, 1937).

Cuadro 2.3. Clasificación de los productos sedimentarios principales provenientes de la meteorización, erosión y transporte (Goldschmidt, 1937).

Cuadro 2.4. Movilidad de los elementos en función del ambiente geoquímico, modificada de Andrews-Jones (1968).

Cuadro 2.5. Elementos indicadores "*pathfinder*" de distintos tipos de yacimientos minerales. Compilado de Boyle, 1974; Beus & Grigorian, 1977 y Rose et al., 1979.

Cuadro 3.1. Estructura de codificación de las muestras de sedimentos fluviales, tomado del Atlas Geoquímico del Perú.

Cuadro 3.2. Tamizado de sedimentos de corriente.

Cuadro 3.3. Límites de detección de los elementos químicos.

Cuadro 3.4. Muestras de control.

Cuadro 3.5. Dominios litoestratigráficos de la intercuenca Alto Marañón IV entre Bambamarca y Pisúquia.

Cuadro 4.1. Principales correlaciones en sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo.

Cuadro 4.2. Principales correlaciones en sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico.

Cuadro 4.3. Correlaciones bivariadas en sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior.

Cuadro 4.4. Correlaciones bivariadas en volcánicos del Paleozoico

Cuadro 4.5. Correlaciones bivariadas en metamórficos del Paleozoico.

Cuadro 4.6. Correlaciones bivariadas en intrusivos del Paleozoico.

Cuadro 4.7. Matriz de componentes rotados en sedimentos silicoclásticos del Cretácico.

Cuadro 4.8. Asociaciones geoquímicas en sedimentos silicoclásticos del Cretáceo según el análisis Clúster.

Cuadro 4.9. Asociaciones geoquímicas de sedimentos silicoclásticos del Cretáceo según el análisis de componentes principales.

Cuadro 4.10. Matriz de componentes rotados en sedimentos carbonatados del Triásico Jurásico.

Cuadro 4.11. Asociaciones geoquímicas de sedimentos carbonatados del Triásico Jurásico según el análisis de componentes principales.

Cuadro 4.12. Asociaciones geoquímicas en sedimentos carbonatados del Triásico Jurásico según análisis Clúster.

Cuadro 4.13. Matriz de componentes rotados en sedimentos silicoclásticos del Paleozoico superior.

Cuadro 4.14. Asociaciones geoquímicas en sedimentos silicoclásticos del Paleozoico superior según análisis Clúster.

Cuadro 4.15. Asociaciones geoquímicas de sedimentos silicoclásticos del Paleozoico superior según el análisis de componentes principales.

Cuadro 4.16. Matriz de componentes rotados en sedimentos volcánicos del paleozoico superior.

Cuadro 4.17. Asociaciones geoquímicas en sedimentos volcánicos del Paleozoico superior según análisis clúster.

Cuadro 4.18. Asociaciones geoquímicas de sedimentos volcánicos del Paleozoico superior según el análisis de componentes principales.

Cuadro 4.19. Matriz de componentes rotados en sedimentos metamórficos del Proterozoico.

Cuadro 4.20. Asociaciones geoquímicas en sedimentos metamórficos del Proterozoico según análisis clúster.

Cuadro 4.21. Asociaciones geoquímicas de sedimentos volcánicos del Paleozoico superior según el análisis de componentes principales.

Cuadro 4.22. Matriz de componentes rotados en sedimentos intrusivos del Paleozoico.

Cuadro 4.23. Asociaciones geoquímicas en sedimentos intrusivos del Paleozoico según análisis clúster.

Cuadro 4.24. Asociaciones geoquímicas de sedimentos intrusivos del Paleozoico superior según el análisis de componentes principales.

RESUMEN

El sureste de la intercuenca Alto Marañón IV, se ubica en los departamentos de La Libertad y Amazonas entre los paralelos 6° 25' y 07° 12' de latitud sur y meridianos 77° 37' - 78° 12' de longitud oeste, pertenece a la vertiente del Océano Atlántico y ocupa un área aproximada de 3 100 Km².

Se caracteriza por su relieve abrupto de laderas pronunciadas mayores a 45% y ríos encañonados, que conforman las estribaciones más altas de la cuenca del río Marañón. Asimismo, presenta climas variadas desde lluvioso y frío hasta climas semiseco cálido y húmedo.

El sistema hidrográfico lo conforman drenajes del tipo dentrítico y sub paralelo y recibe aporte de quebradas de primer y segundo orden, sus aguas desembocan en el río Marañón; se han definido tres unidades hidrográficas que reciben el nombre del río principal (Microcuencas de los ríos Chon Chon y Púsac y microcuenca de la quebrada Gramalote).

Se han definido cinco grados de pendientes: llano, suave, moderada, fuerte y escarpada, en el área de estudio predominan pendientes muy fuertes a escarpada (25 ° - 25 °). Las unidades geomorfológicas reconocidas en el área de estudio son resultado de la acción de los procesos tectónicos (litológico-estructural), erosionales y deposicionales.

Las unidades litoestratigráficas denotan un contexto geológico variado conformado por rocas que comprenden desde el Precámbrico hasta el Cuaternario reciente, las cuales han sido circunscritos en diez dominios litoestratigráficos, estos dominios serán base para el análisis e interpretación de la caracterización geoquímica de los elementos químicos del sureste de la intercuenca Alto Marañón IV.

El área de estudio corresponde al bloque levantado Marañón, se observan formaciones Paleozoicas y Mesozoicas que afloran en discordancia angular con rocas del Complejo Marañón, producto de eventos orogénicos, etapas de sedimentación, deformación y erosión. El Graben del Marañón es una faja angosta de cuencas tectónicas que coinciden con el valle del río Marañón y la Cordillera Oriental, las principales fallas del área de estudio son: Bambamarca Sicuaya, Lanchas, Marañón, San Vicente Poña, Bolívar Longotea, Millpo, Limón y Balsapampa.

Se ha definido tres franjas metalogenéticas: Franja I. Depósitos de Au en rocas meta-sedimentarias del Ordovícico y Silúrico Devónico, franja II. Depósitos orogénicos de Au-Ag-Pb-Zn-Cu del Carbonífero Permiano y franja XVI. Depósitos Mississippi Valley de Pb-Zn del Eoceno-Mioceno.

Se recolectaron 261 muestras de sedimentos fluviales, de las cuales se analizó la fracción granulométrica menor a 74 μm . El análisis multielemental se realizó por ICP-MS, previa digestión con agua regia, mientras que, para el oro se empleó el ensayo al fuego + espectroscopia de absorción atómica. Dichas técnicas determinaron las concentraciones de 53 elementos químicos, incluyendo elementos mayores y principales elementos trazas.

Los parámetros fisicoquímicos (pH y CE) fueron analizados por cuencas hidrográficas. Es así que, el pH de las aguas superficiales de la subcuenca quebrada Gramalote denota un comportamiento alcalino, donde los valores de conductividad eléctrica (CE) son menores a 500 $\mu\text{S/cm}$.

La subcuenca del río Púsac lo conforma los ríos Púsac, Jahuay, Illabamba y Balsapampa. Registrándose valores bajos de pH (4.45 y 5.42) en la quebrada Saumate, el cual define un contexto ácido asociados a valores altos de conductividad eléctrica (2061 $\mu\text{S/cm}$ y 1539 $\mu\text{S/cm}$). Los parámetros fisicoquímicos de la microcuenca del río Chon Chon definen contexto ácido en las quebradas Lirio, Del Huayo y San José. Mientras que, los valores altos que definen un comportamiento alcalino, se ubica en el río Chocta, quebrada Chulpe.

El análisis y la caracterización geoquímica de los elementos químicos del sureste de la intercuenca Alto Marañón IV, se realizaron en base a los dominios litoestratigráficos, se describió las anomalías geoquímicas de los elementos *comodities*, elementos traza y principales elementos lantánidos.

Se determinó correlaciones bivariales donde destaca la correlación muy fuerte entre los elementos lantánidos en ambientes metamórficos del Paleozoico. En el dominio intrusivo del Paleozoico destaca la correlación débil y negativa de Ce y La con oro, además, correlaciones muy fuertes entre Pb y Zn.

Se realizó una estadística multivariar para determinar asociaciones geoquímicas por dominio litoestratigráfico, es así que, en el dominio intrusivo destaca la asociación de los elementos geogénicos (Yb-Y-Lu-Tb-Th-Ce-La-Ga-P), en el dominio de rocas metamórficas destaca el PC3 cuya asociación es Pb-Sb-Zn-As-Ba-Mn, el cual estaría relacionada a alguna mineralización. Mientras que, en el dominio volcánico del Paleozoico, según, el análisis de conglomerados jerárquicos resalta la asociación Zn-V-Ce y Ni-Cr-Co-Sc-Ga-Cu.

INTRODUCCIÓN

El sureste de la intercuenca Alto Marañón IV, abarca un área de 3 100 km² y comprende las microcuencas de los ríos Chon Chon, Púsac y la quebrada Gramalote, los cuales discurren sus aguas en el río Marañón y forma parte del sistema hidrográfico del Océano Atlántico.

El diseño de muestreo geoquímico en la presente investigación, consiste en un muestreo sistemático de los sedimentos fluviales con el fin de establecer elementos o asociaciones de elementos que caracterizan cada dominio litoestratigráfico aflorantes en dicha intercuenca. La densidad de muestreo fue de 1: 10 km², se recolectó la muestra a 200 m antes de la confluencia con el curso fluvial de orden inmediato.

El objetivo principal es caracterizar la dispersión secundaria de elementos traza y tierras raras presentes en los sedimentos fluviales de las redes hidrográficas estudiadas, para ello se empleó el análisis y procesamiento estadístico de los datos geoquímicos, previa clasificación en los dominios litoestratigráficos de las principales unidades de aporte.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del Problema

El desarrollo socioeconómico del país y el avance geocientífico en el análisis de elementos traza y mayores, permiten caracterizar un evento geológico de mineralización, el cual implica un mayor estudio en la dispersión secundaria de ciertos elementos con el fin de comprender la relación con los minerales primarios y su migración externa.

El área entre la Cordillera Oriental y el Valle del Río Marañón, en alineamiento al Batolito de Patáz, no existen reportes de estudios geoquímicos, siendo una zona con potencial minero de acuerdo a sus rasgos geológicos, puesto que en dicho sector se encuentran afloramientos de unidades metamórficas e ígneas con evidencias de explotación artesanal de vetas de cuarzo con oro.

A 20 Km al sur del área de estudio, se ubican los yacimientos más septentrionales de Consorcio Minero Horizonte y Retamas del distrito minero Pataz-Buldibuyo, constituido por vetas de cuarzo con oro emplazado mayormente en rocas graníticas y distribuidas en un corredor estructural a lo largo de 60 Km. De este corredor estructural existen diversas investigaciones acerca del magmatismo y su mineralización,

considerándose como una zona de gran potencial en vetas auríferas tipo orogénico (Haeblerlin, 2002).

1.1.1. Formulación del problema

1.1.1.1. Problema general

¿Cómo la caracterización geoquímica por dispersión secundaria del sureste de la intercuenca Alto Marañón IV entre Bambamarca y Pisúquia ayuda a caracterizar unidades geológicas con mineralización?

1.1.1.2. Problemas Específicos

¿Qué patrones de elementos químicos, caracterizan a los dominios litoestratigráficos que afloran en el sureste de la intercuenca Alto Marañón IV entre Bambamarca y Pisúquia?

¿Qué elementos trazas y tierras raras se puede considerar como indicadores, para prospectar por los principales elementos *comodities* en el sureste de la intercuenca Alto Marañón IV?

¿Cuál es la relación de la dispersión geoquímica secundaria entre las unidades intrusivas y volcánicas aflorantes en el área de estudio?

1.1.2. Objetivos

1.1.2.1. Objetivo general

Caracterizar geoquímicamente por dispersión secundaria de elementos trazas y tierras raras, las unidades que afloran en el sureste de la intercuenca Alto Marañón IV entre Bambamarca y Pisúquia, Norte del Perú.

1.1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar los elementos o asociaciones de elementos que caracterizan cada dominio litoestratigráfico que aflora en el sureste de la Intercuenca Alto Marañón IV.
- Fijar elementos pathfinder para prospectar por los principales elementos commodities en el sureste de la intercuenca Alto Marañón IV.
- Identificar la relación de las anomalías geoquímicas en los dominios de rocas intrusivas y volcánicas en el sureste de la intercuenca Alto Marañón IV entre Bambamarca y Pisúquia.

1.1.3. Justificación de la investigación

En la zona de estudio no existen reportes sobre la caracterización geoquímica de la litoestratigrafía; a pesar de ser un área prospectiva en elementos económicos y en tierras raras (Sánchez, 2006).

Con la finalidad de conocer la distribución y la dispersión geoquímica de los elementos *comodities* y tierras raras, que conllevarían a determinar áreas de interés prospectivo.

Es importante, verificar, aportar y difundir nuevos conocimientos acerca del comportamiento geoquímico de dichos elementos en la naturaleza, específicamente referido a la dispersión geoquímica secundaria a escala regional. Estudiar los elementos de tierras raras que debido a sus propiedades especiales como: magnetismo, conductividad o semi-conductividad, los hacen idóneos en la tecnología actual para la fabricación de una gran variedad de productos como: Dispositivo Laser, monitores LCD, iPods, teléfonos móviles y cámaras digitales entre otros.

1.1.4 Importancia y alcances de la investigación

Contribuye con nuevos conocimientos acerca del comportamiento geoquímico secundario de los elementos presentes en sedimentos fluviales, cuya unidad de aporte corresponde a las unidades litoestratigráficas que afloran al sureste de la intercuenca Alto Marañón IV entre Bambamarca y Pisúquia.

1.2. Aspectos generales del área de estudio

1.2.1. Ubicación

Se localiza en el sector septentrional de los Andes Peruanos en el flanco derecho de la cordillera oriental, margen derecha del río Marañón; entre los paralelos 6° 25' y 07° 12' de latitud sur y meridianos 77° 37' - 78° 12' de longitud oeste, ocupa un área aproximada de 3 100 Km².

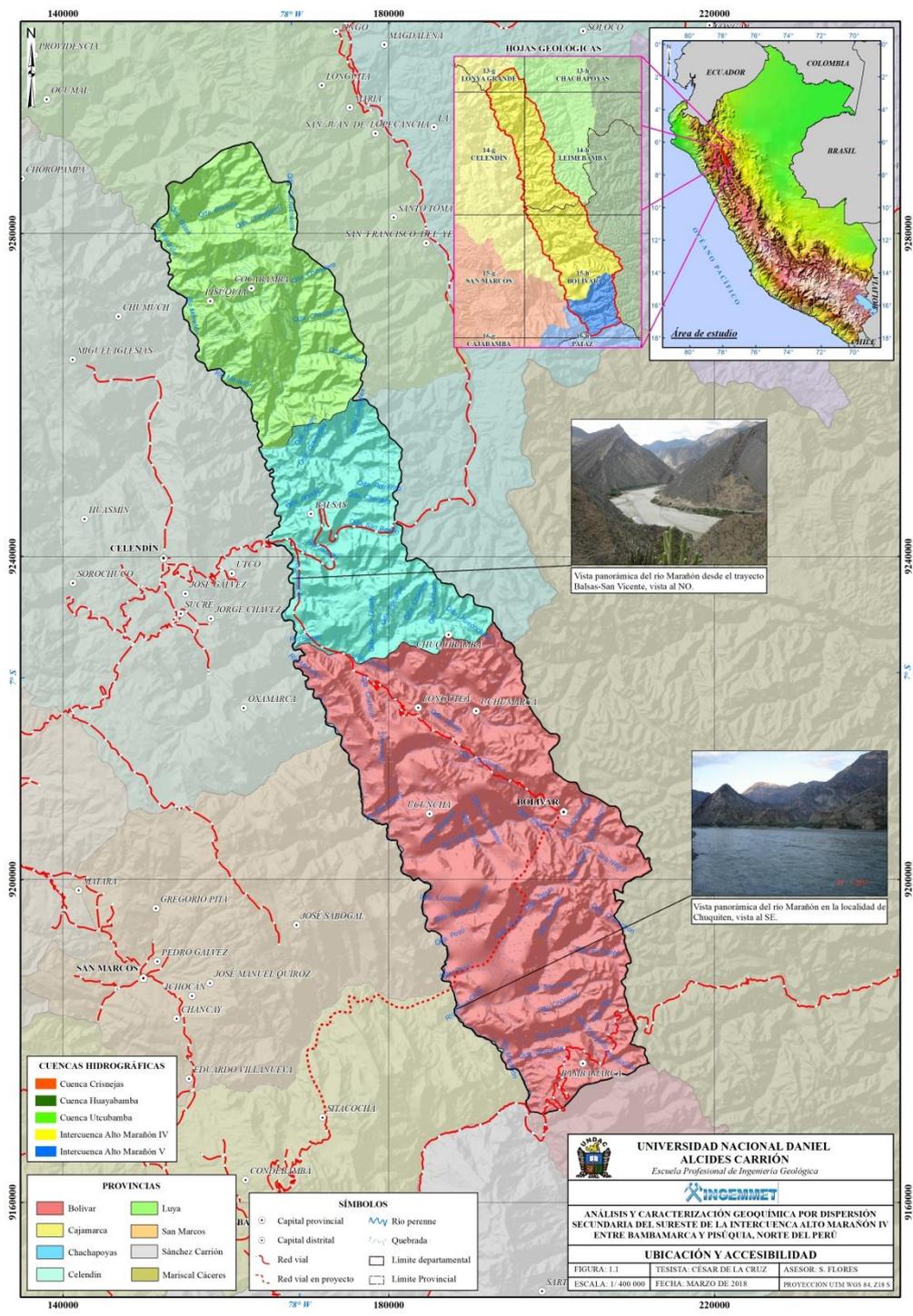
Comprende territorios de los departamentos de La Libertad y Amazonas. El sur del área de estudio lo constituyen los distritos de Bambamarca, Bolívar, Ucuncha, Longotea y Uchumarca de la provincia de Bolívar del departamento de La Libertad; la zona central está conformado por los distritos de Chuquibamba y Balsas de la provincia de Chachapoyas y el norte por los distritos de Cocabamba y Pisúquia de la provincia de Luya, ambas provincias pertenecen al departamento de Amazonas (Figura 1.1).

1.2.2. Accesibilidad

El acceso al área de estudio por vía terrestre, es por la carretera panamericana norte siguiendo la ruta de penetración hasta la localidad de Pacasmayo, luego se pasa por la localidad Ciudad de Dios (desvío a Cajamarca) hasta llegar al departamento de Cajamarca con un recorrido total de 856 Km.

Desde el departamento de Cajamarca, existen varias rutas de penetración a diferentes zonas del área de estudio, se tratan de vías asfaltadas y trochas carrozables (Figura 1.1).

- Zona sur:
 - Cajabamba – Saritabamba - Bambamarca.
 - Cajamarca - Celendín – Ucuncha – Uchumarca - Bolívar.
- Zona centro:
 - Cajamarca - Celendín - Balsas, asfaltado hasta la Encañada, vía que conecta el departamento de Amazonas y la provincia de Bolívar (La Libertad).
- Zona norte:
 - Cajamarca – Balsas – Leimebamba - Cocabamba – Pisúquia.



1.2.3. Fisiografía

Consiste de una faja angosta de cuencas tectónicas que coinciden con el alineamiento del Batolito de Pataz; se caracteriza por un relieve abrupto, con quebradas, ríos encañonados y laderas pronunciadas de pendientes mayores a 45%; valles en formación emplazados en el flanco occidental de la Cordillera Oriental de los Andes, cuyas aguas discurren de Sur a Norte y conforman las estribaciones más altas de la cuenca del Marañón (Figura 1.2).



Figura 1.2 Relieve abrupto de laderas pronunciadas y ríos encañonados. Vista tomada desde el flanco oriental de la Cordillera Occidental (Anexo Mendan).

1.2.4. Climas y vegetación

El clima es variado desde la alta cordillera hasta el fondo del valle del río Marañón, desde el mes de diciembre hasta marzo se tienen climas fríos y húmedos; mientras que, entre los meses de abril a noviembre los climas son secos y muy calurosos.

La distribución de la vegetación varía en relación con la altitud en donde las temperaturas cambian gradualmente. En una altitud de 4 500 m s. n. m. (como es el caso de la provincia de Bolívar) el clima es frígido con ausencia de vegetación; en altitudes que varían de 3 500 m s. n. m. a 4 500 m s. n. m., se tienen temperaturas que descienden hasta 0 °C por las noches y existe presencia de ichu; asimismo, en altitudes por debajo de 3 500 m s. n. m. los terrenos son usados para la agricultura. Según la clasificación climatológica del SENAMHI (2014) se tienen los siguientes climas (Figura 1.3).

1.2.4.1 Clima semiseco cálido y húmedo (Tropical húmedo)

Corresponde las llanuras de toda la franja del valle del río Marañón (NNO-SSE) hasta los 1000 m s. n. m.; en el día y la noche se tienen temperaturas altas durante todo el año, sin variaciones estacionales notables. Se caracterizan por presentar precipitaciones promedio anuales de 2 000 mm y temperaturas mayores a 25 °C (Sánchez, 1995). Este clima encontramos en las localidades de Tingo, Chuquitén, Moncada, Sute, Balsas, Mendan y San Vicente.

1.2.4.2 Clima semi cálido muy húmedo (sub tropical muy húmedo)

Localizado entre los 1 000 y 2 500 m s. n. m. y se caracteriza por presentar: temperaturas por debajo de 20 °C, precipitaciones de

200 mm a 350 mm y bolsones pluviales que sobrepasan los 5 000 mm. Este clima encontramos en las localidades de El Chorro, Chuñuen, Huayo y Sute.

1.2.4.3 Clima templado sub húmedo (Estepa y valles interandinos bajos)

Conocido como “clima de montaña baja”, corresponde principalmente a los valles interandinos bajos e intermedios, situados entre los 2 500 y 3 800 m s. n. m. Se caracteriza por presentar temperaturas que varían de 6 °C a 13 °C entre octubre y enero; entre mayo y agosto se registra la temperatura mínima (7 °C) con gran variación entre el día y la noche. Presenta precipitaciones de 400 mm y 800 mm al año, este corresponde a las localidades de Ranrapampa, Ucuncha, Sonche y Cocabamba.

1.2.4.4 Clima lluvioso y frío

Comprende altitudes mayores a 3 800 m s. n. m., la temperatura promedio anual oscila entre 2 °C y 6 °C (ocurren heladas), donde se desarrolla pastos naturales herbáceos y escasos arbustos. Entre los meses de diciembre a abril, las precipitaciones pluviales son intensas (900 – 1 000 mm al año). Este clima corresponde partes altas de las localidades de Bolívar, Laplar, Chuquibamba, Sonche entre otros (Figura 1.3).

1.2.5. Hidrografía

El sistema hidrográfico está conformado por los ríos que drenan sus aguas al Océano Atlántico, la red hidrográfica del sureste de la intercuenca Alto Marañón IV, está constituida por once (11) microcuencas hidrográficas.

La esorrentía superficial forma redes de drenaje del tipo dentrítico y sub paralelo, conformado por regímenes de escurrimiento muy irregular y torrencioso, sus nacientes se encuentran en los andes y su desembocadura en el río Marañón, que recibe aporte de numerosas quebradas de primer y segundo orden.

La hidrografía es la expresión local y regional del régimen de drenaje de la superficie y según las variaciones de la distribución del drenaje, diferencias en su densidad, textura y perfil del canal (transversal y longitudinal), se ha clasificado en tres unidades hidrográficas, los cuales reciben el nombre del río principal (Cuadro 1.1) (Figura 1.4).

1.2.5.1. Cuenca del río Chon Chon

Esta unidad hidrográfica tiene un área de 1 038 Km² y se caracteriza por presentar redes de drenaje sub paralelo dentrítico de pendiente pronunciada, controlado por la estructura geológica aflorante.

1.2.5.2. Cuenca del río Púsac

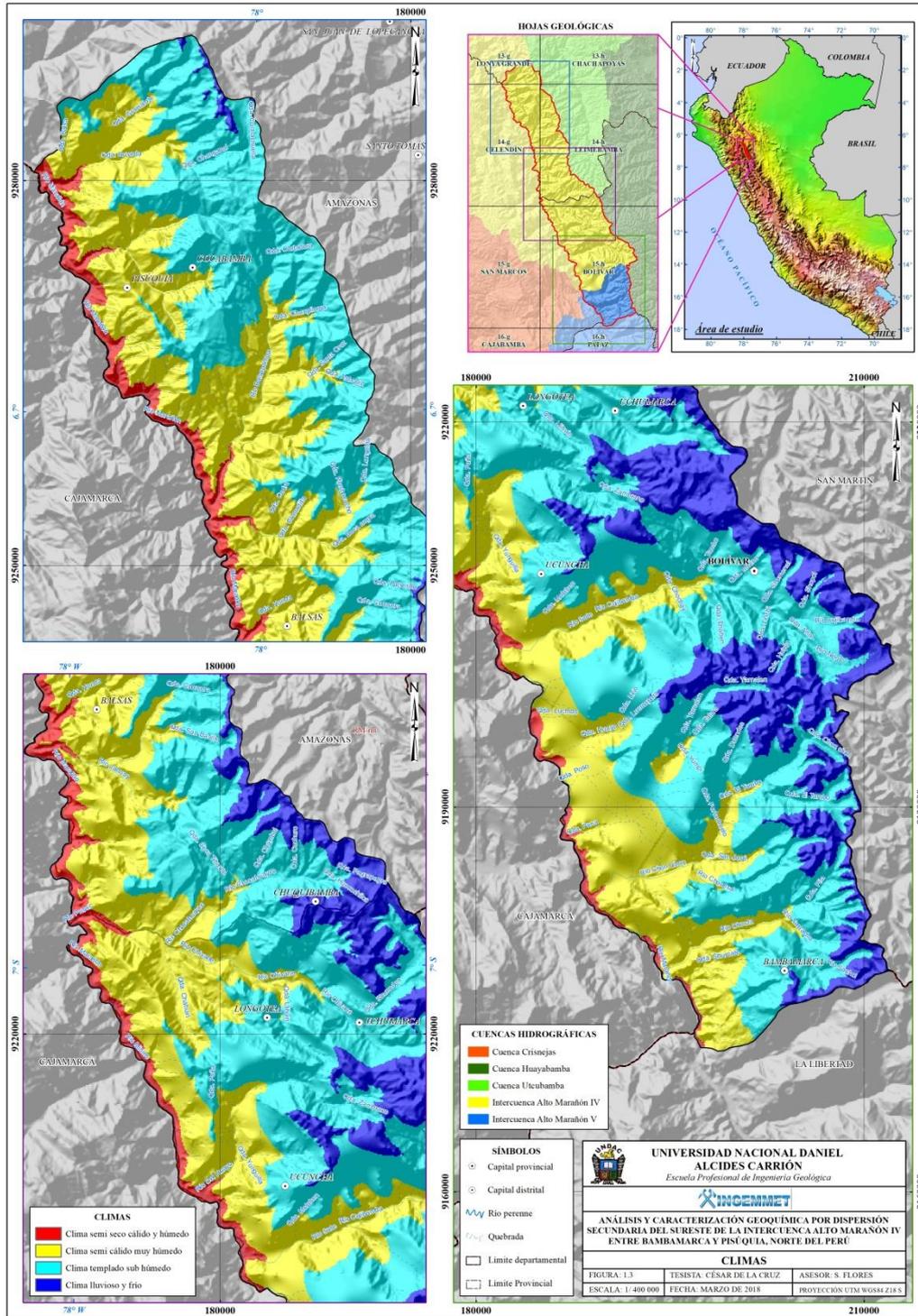
Ocupa un área de 1 038 Km² y se caracteriza por presentar redes de drenaje detrítico y pinado, así mismo, se observa drenajes de corto recorrido de dirección cuasi perpendicular.

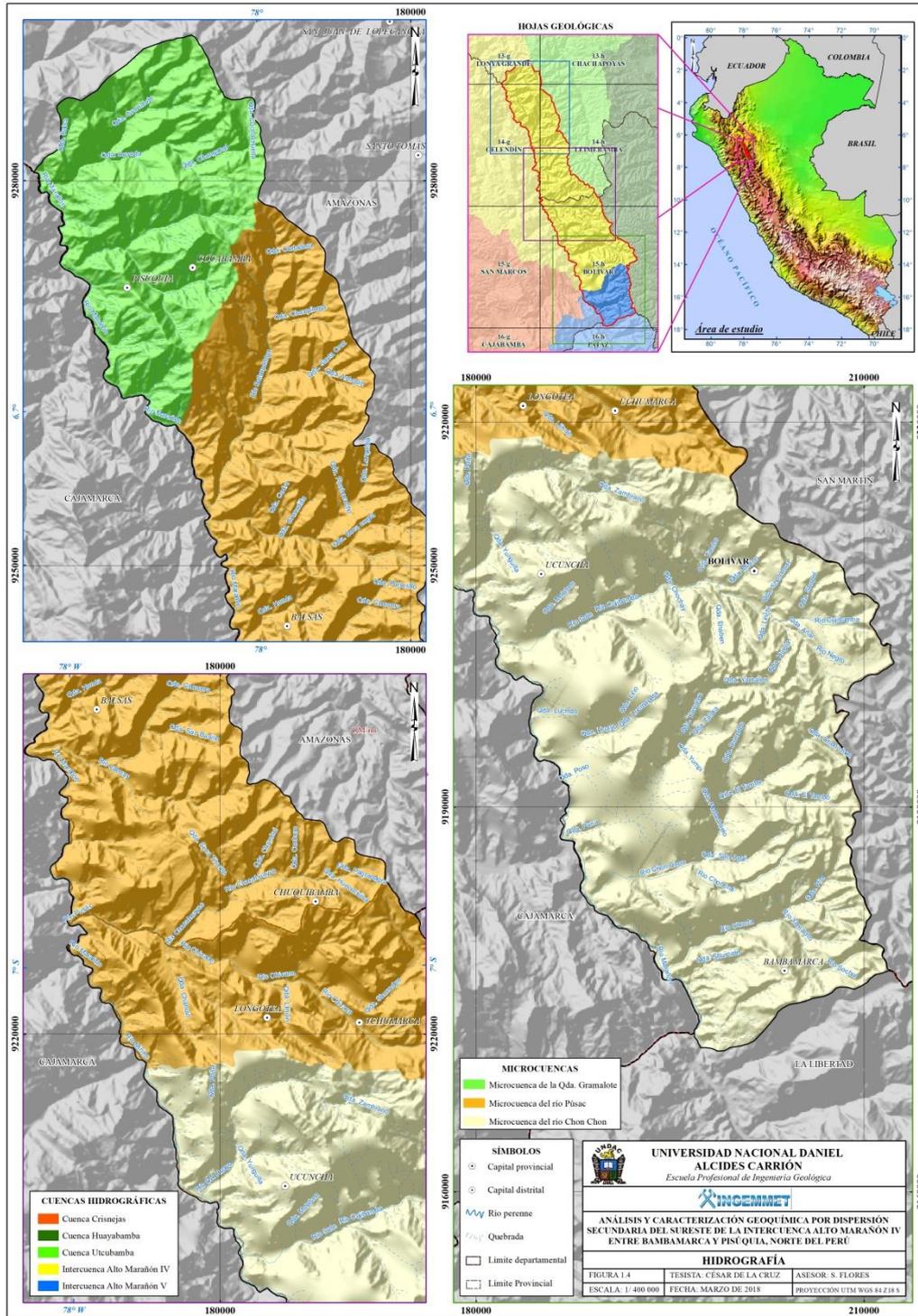
1.2.5.3. Cuenca de la quebrada Gramalote

Ocupa un área de 329 Km² y se caracteriza por presentar drenajes sub detrítico con afluentes de corto recorrido.

Cuadro 1.1. Unidades hidrográficas del área de estudio.

| ID | Microcuencas | Grupo | Área (Km ²) |
|----|----------------|---------------------------------|-------------------------|
| 1 | Río Chocta | Cuenca del río Chon Chon | 1 038 |
| | Río Chon Chon | | |
| | Qda. Pana | | |
| | Río Sute | | |
| | Río Del Huayo | | |
| 2 | Río Púsac | Cuenca del río Púsac | 1 038 |
| | Río Jahuay | | |
| | Río Illabamba | | |
| | Río Balsapampa | | |
| 3 | Río Pisuquía | Cuenca de la quebrada Gramalote | 329 |
| | Qda. Gramalote | | |





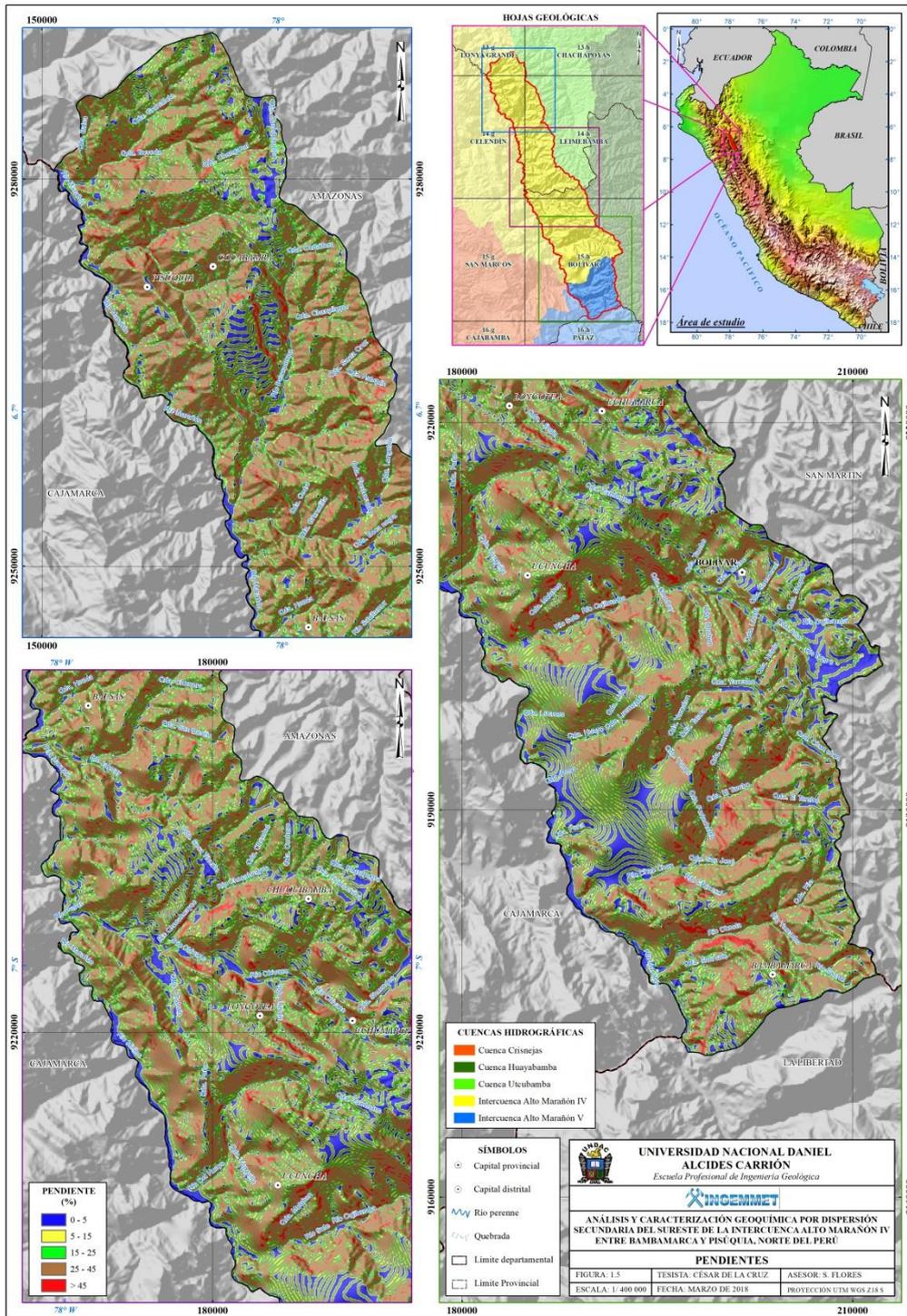
1.2.6. Pendientes de las cuencas

Uno de los aspectos más importantes en la clasificación de las unidades geomorfológicas, aparte del relieve, es la pendiente de los terrenos.

Es fácil que ocurran movimientos de masa en laderas y cauces cuya pendiente principal varía entre media a fuerte ($> 30^\circ$); también, es alta la erosión de laderas (laminar, surcos y cárcavas) en colinas o montañas; a mayor pendiente facilita el escurrimiento superficial y por ende la erosión hídrica o pluvial. Sin embargo, algunos procesos lentos como la reptación de suelos y ocasionales deslizamientos ocurren en terrenos con pendientes bajos o mínimos.

El mapa de pendientes del sureste de la intercuenca Alto Maraón IV, fue elaborado en base a las hojas fotogramétricas del Instituto Geográfico del Perú (IGN) a escala 1: 100 000; con 50m de espaciamiento de las curvas de nivel, los mismos que fueron procesados en el software Arcgis 10.3.

Se consideró cinco grados de pendientes: llano, suave, moderada a fuerte, muy fuerte a escarpada y muy escarpada; a continuación se describen cada uno de ellos (Figura 1.5).



1.2.6.1. Pendiente inclinado o llano (0° - 5°)

Se trata de terrenos planos con ligera inclinación, se distribuyen a lo largo de las zonas de planicies, planicies disectadas y elevadas, presentan ondulaciones (lomadas) formadas en depósitos de piedemonte.

1.2.6.2. Pendiente suave (5° - 15°)

Se asocian y se distribuyen en las zonas de montañas y colinas, constituye áreas restringidas limitados por colinas que tienen pendientes mayores a 15°; se observan alrededor de las localidades de Bambamarca y en ambas márgenes de la quebrada Zambrano.

1.2.6.3. Pendiente moderada a fuerte (15° - 25°)

Pendientes con amplia distribución en la zona de montañas, también, conforman las laderas superiores de los cerros. Este rango de pendiente se tiene en los cursos superiores de los ríos y afluentes del río Marañón.

1.2.6.4. Pendiente muy fuerte a escarpada (25° - 45°)

Se distribuye en las laderas de las montañas, este rango de pendiente es el que predomina en el área de estudio. Se observa en las localidades de Longotea, Uchumarca, Bolívar, Cocabamba y Pisúquia (Figura 1.6).

1.2.6.5. Pendiente muy escarpado (> 45°)

Su distribución es restringida a lo largo de las laderas de los valles encañonados; también, se observan en las cabeceras de los ríos Chocta, Chon Chon, Cujibamba y Balsapampa; y en las quebradas Molaben y El Tambo (Figura 1.7).



Figura 1.6. Relieve muy fuerte formando cordilleras agrestes, vista al SO de la localidad de Bolívar.



Figura 1.7. Relieve montañoso estructural de pendiente muy escarpada, formada en rocas sedimentarias. Vista al norte (aguas abajo del río Marañón), localidad de Caña Brava.

1.2.7. Unidades geomorfológicas

Las unidades geomorfológicas, son unidades del terreno diferenciadas según sus características morfométricas, morfogénesis y morfodinámica (Verstappen & Van Zuidan., 1991; Martín Serrano et al., 2004).

Para el cartografiado de las unidades geomorfológicas del SE de la intercuenca Alto Marañón IV (Figura 1.8), se tomó como base: el cartografiado realizado por el área de geología ambiental del INGEMMET; asimismo, la carta geológica, una base topográfica a escala 1: 50 000, el modelo de pendientes descritos, imágenes satelitales áster e imágenes de google earth.

Las unidades geomorfológicas son muy variables, los cuales son el resultado de la acción de los procesos tectónicos (litológico-estructural), erosionales y deposicionales ocurridos a lo largo de su historia geológica; la asociación morfogenética permitió establecer las siguientes unidades geomorfológicas (Figura 1.8).

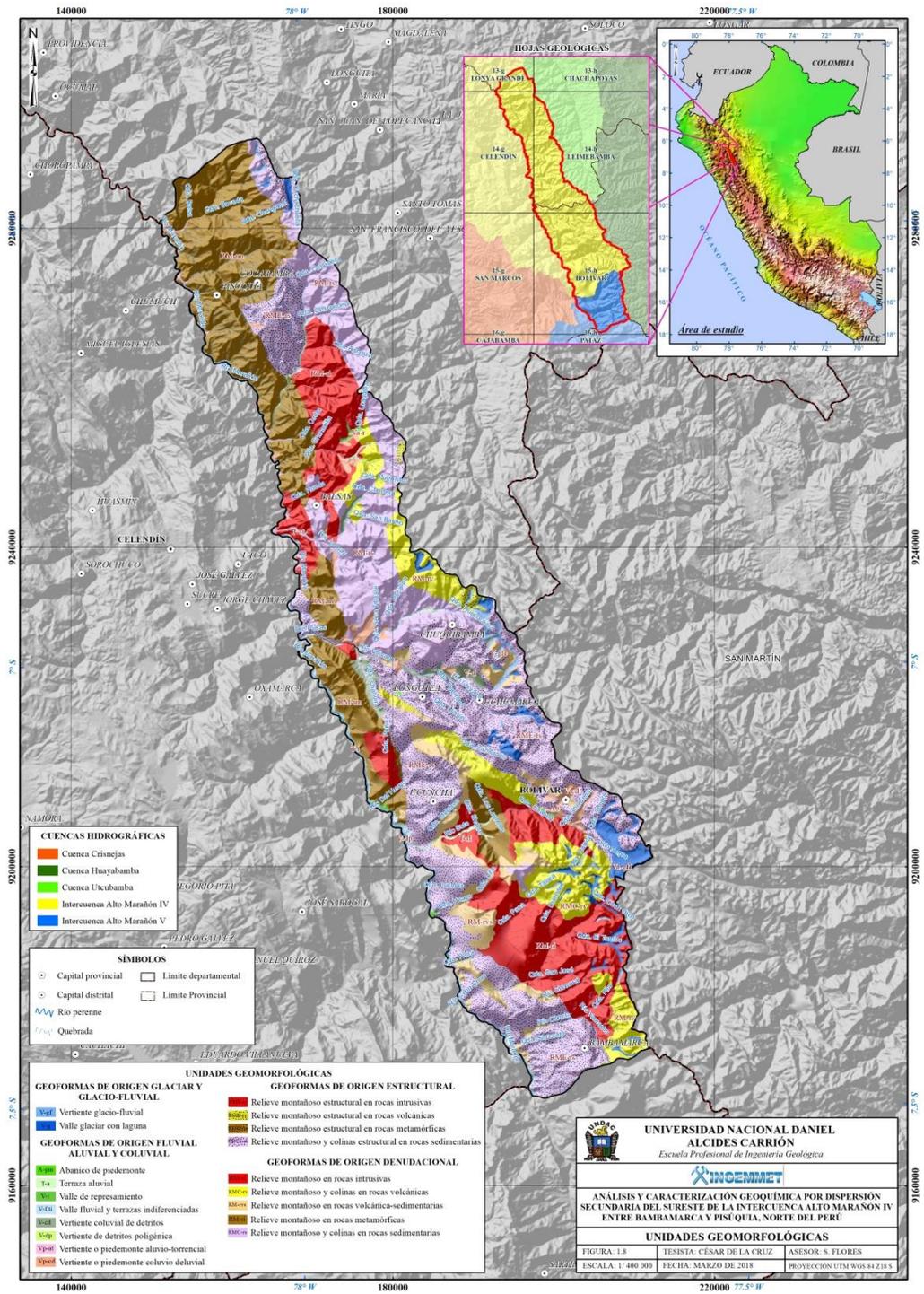
1.2.7.1. Geoformas de origen estructural.

1.2.7.2. Geoformas de origen denudacional.

1.2.7.3. Geoformas de origen deposicional o agradacional

a) Geoformas de origen glaciar y glacio fluvial.

b) Geoformas de origen fluvial, aluvial y coluvial



1.2.7.1. Geoformas de origen estructural

Esta unidad se formó sobre rocas sedimentarias y en menor medida en rocas metamórficas, intrusivas y volcánicas con un estado moderado de meteorización y de erosión; se encuentran influenciados por eventos tectónicos que originaron levantamientos, la unidad principal es relieve montañoso y colinas estructurales en rocas sedimentarias (RMC-rs).

A. Relieve montañoso y colinas estructurales en rocas sedimentarias (RMC-rs)

Se ubica en ambos márgenes del río Marañón, se extiende desde Bambamarca hasta Ucuncha, Longotea y Uchumarca. Se caracteriza por presentar laderas de montaña y colinas plegadas, formadas en rocas sedimentarias del Cretácico; constituido de lutitas, areniscas, lutitas carbonosas y calizas de los grupos Goyllarisquizga y Pucará; además, de las formaciones Crisnejas, Chúlec y Pariatambo.

1.2.7.2. Geoformas de carácter denudacional

Estas geoformas se originaron por procesos denudacionales y las principales unidades son:

A. Relieve montañoso y colinas en rocas metamórficas (RMC-rm)

Se localiza en ambos márgenes del río Marañón, desde Balsas hasta el norte de Pisuquía, comprenden relictos de cadenas montañosas

antiguas expuestas (Complejo Marañón y Formación Macno), cuya morfología está relacionada a procesos denudacionales.

Se tratan de superficies moderadas a ligeramente escarpadas, colinas de pendientes suaves a moderadamente empinadas con topografía ondulante; además, de drenajes dentríticos a subdentríticos muy densos con valles en “V”.

B. Relieve montañoso y colinas en rocas volcánicas

Esta unidad se ubica en las divisorias de aguas, entre las localidades de Balsas y Chuquibambilla. La morfología resaltante está representada por superficies planas y onduladas, que forman altiplanos volcánicos o mesetas volcánicas con frentes escarpados a muy escarpados, resultantes de la deposición de flujos piroclásticos o ignimbritas (Grupo Calipuy).

C. Relieve montañoso y colinado en rocas intrusivas (RMC-ri)

Se localiza al norte de las localidades de Bambamarca y Balsas, formadas en rocas intrusivas del batolito de Gollón Callangate, se caracteriza por presentar geoformas de laderas subredondeadas, cóncavas y escarpadas con drenajes dentrítico a dentrítico rectangular, por la presencia de fracturas se observan valles profundos en forma de “V” con laderas pronunciadas a fuertes (Figura 1.9).



Figura 1.9. Relieve montañoso de pendiente pronunciada a fuerte, formada en rocas intrusivas, disectado por la quebrada Gollón. Vista al NE.

1.2.7.3. Geoformas de origen deposicional o agradacional

Estas geoformas presentan características como depósitos, acumulación de material y rupturas de pendiente. Se ubican en los cursos fluviales y fondos de valle, limitados por depósitos de piedemontes y laderas de montañas o colinas. Entre las principales tenemos: Piedemonte aluvio-torrencial (P-at), piedemonte coluvio-deluvial (P-cd), vertiente de detritos (V-d), valle fluvial y terrazas indiferenciadas (VT-i), valle de represamiento (V-r), abanicos de piedemonte (Ab) y valle del río Marañón, vertiente glaciofluvial (V-gf), valle glacial con lagunas (V-g).

Valle del río Marañón

Está representado por el valle del río Marañón que discurre sus aguas de SE a NO, su orientación coincide con el del sistema de

fallas del Marañón y comprende altitudes que van desde los 500 m s. n. m. hasta los 1 000 m s. n. m. Forma un profundo cañón que erosiona la meseta andina con un desnivel de 3 000 m entre las cumbres y la línea de agua. La incisión de este valle se inició desde el Mioceno medio (~10 Ma) se observa una geomorfología lineal y un ancho de 100 m (Figura 1.10).



Figura 1.10. Valle del río Marañón, vista al NO desde la localidad de Jecumbuy.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El programa de Geoquímica del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, desde el 2000 hasta el 2015 desarrolló el Atlas Geoquímico del Perú, cuya segunda versión fue publicada en el 2017.

Los objetivos principales fueron: la determinación de los valores de fondo, umbrales, anomalías y patrones de distribución geoquímica secundaria de los principales elementos trazas en sedimentos activos de quebradas, en base a dominios geológicos regionales y su relación metalogenética; y contar a nivel nacional con una base de datos geoquímicos de calidad, que coadyuve al desarrollo de nuevas investigaciones multidisciplinarias en el Perú.

Así mismo, realizaron estudios por cuencas hidrográficas al norte del paralelo 10° de latitud sur, y estudios de la mineralización aurífera asociada a rocas graníticas, como es el caso de las siguientes publicaciones:

Chira, J.; Vargas, L.; Castañeda, D.; De La Cruz, C.; Aguilar, P.; Pascual, O. & Pérez, V. (2017) - Prospección geoquímica regional de las cuencas de la vertiente pacífica al norte del paralelo 8°00' sur. INGEMMET, Boletín, Serie B: Geología Económica, 44, 200 p., 11 mapas.

Esta publicación trata de la prospección geoquímica de las cuencas de la vertiente pacífica al norte del paralelo 8° 00'. En este trabajo recolectaron 997 muestras de sedimentos fluviales en las cuencas de los ríos Zaña, Chancay-Lambayeque, Motupe, Cascajal y Piura.

Dichas muestras fueron tamizadas a malla 200 y analizadas por ICP-MS y ensayo al fuego + espectrometría de absorción atómica para la cuantificación del oro. La base de datos geoquímica contiene más de 50 campos de información entre los que destacan el código de la muestra, las coordenadas UTM (en sistema WGS84) y la zona geográfica.

En cada población se realizó un análisis estadístico riguroso, definiendo las características univariantes, bivariantes y multivariantes de los 18 elementos traza estudiados (Sb, As, Ba, Cd, Co, Cu, Cr, Mn, Hg, Mo, Ni, Au, Ag, Pb, U, V, W y Zn).

Con el cálculo de los umbrales geoquímicos en las diferentes poblaciones estadísticas, se reconocieron 451 anomalías, de las cuales 56

corresponden a oro. Las más significativas ocurren en los volcánicos del Paleógeno-Neógeno y en los ambientes intrusivos.

Chira, J.; Vargas, L.; Vásquez, R. & Palomino, Ch. (2011) - Prospección geoquímica regional de sedimentos de corriente entre los paralelos 8° - 9°, cuencas de la vertiente Atlántica. INGEMMET. Boletín, Serie B: Geología Económica, 27, 98 p., 8 mapas.

En esta investigación, hicieron mención los resultados de la prospección geoquímica regional de sedimentos de corriente correspondientes a las cuencas hidrográficas de la vertiente Atlántica entre las latitudes 8° y 9° Sur. El área de estudio comprende un área de 6574 km² e involucra parte de los departamentos de La Libertad, Ancash y Huánuco.

Recolectaron 619 muestras de sedimentos activos de corriente, con una densidad de muestreo de 1/10km². Las muestras húmedas o secas han sido pre-tamizadas a malla 30 y finalmente analizadas a malla 200, tanto por el método de ensayo al fuego, como por absorción atómica previa digestión de agua regia.

Reportan los niveles de fondo y umbrales geoquímicos de Au, Ag, Pb, Zn, Mo, Ni, Co, As, Sb, U, Cd, Sr. Así mismo, determinaron 279 anomalías geoquímicas, de los cuales el 10% son productos de la contaminación minera.

Chira, J.; Valencia, M.; Chero, D.; Vargas, L.; Rodríguez, H. & Lizama, H. (2009) - Prospección geoquímica de sedimentos de quebrada en la Cuenca del Río Huaura. INGEMMET. Boletín, Serie B: Geología Económica, 20, 123 p., 7 mapas.

Este boletín trata sobre la prospección geoquímica regional de la cuenca del río Huaura, ubicado al norte de Lima, en la vertiente Pacífica. Los autores hacen mención, que, durante la etapa de muestreo de los sedimentos activos de corriente, registraron en cada estación datos relacionado a la ubicación, entorno geológico y características físicas de los litotipos predominantes, de la unidad geológica proveedora de los sedimentos; además, de los parámetros fisicoquímicos como pH, total de sólidos disueltos (TDS), conductividad eléctrica (CE) y temperatura (T°).

Las muestras se analizaron por Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS), con digestión de agua regia para 52 elementos y por ensayo al fuego-espectrometría de absorción atómica para la determinación de oro.

Para el tratamiento estadístico, la data geoquímica se separó en cuatro grandes grupos, en función de la litología y edad de las zonas de aporte: intrusivos del Cretáceo-Paleógeno-Neógeno, sedimentarios del Cretáceo inferior, sedimentarios calcáreos del Cretáceo inferior-Cretáceo superior y volcánicos paleógeno-neógenos.

Interpretaron 16 elementos: plata, arsénico, cobre, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, molibdeno, níquel, plomo, antimonio, uranio, vanadio, wolframio y zinc. Del cual, determinaron cincuenta y ocho (58) anomalías geoquímicas de los elementos *comodities*, distribuidas en cuatro dominios litoestratigráficos.

Sánchez A., 2006 - Estudia a las “Rocas graníticas y la mineralización aurífera asociada, en la cordillera oriental del norte del Perú”, donde las vetas que se encuentran en esquistos del Complejo del Marañón han rendido valores de 3.51 y 13.9 g/t de Au. En cambio, las vetas que se encuentran en el sector occidental del Complejo no muestran evidencia de la presencia de oro, parecen ser segregaciones metamórficas.

Kummel B., 1950 - En su trabajo «Stratigraphic Studies in Northern Peru» describe la sección estratigráfica del Permiano en el Cerro Caya Caya al sur del Abra Barro Negro en la carretera Celendín – Leymebamba. Geyer O., 1979, Hillebrandt A.V., 1981, Loughman D., Hallam A.V. 1982, Prinz P., 1985, etc. han investigado la bioestratigrafía y las facies del Grupo Pucará.

Existen además estudios mineralógicos, espectrográficos de pegmatitas en la Costa sur peruana (Caravelí) y Ancash con cantidades apreciables de Tierras Raras, sobre todo por la presencia de allanita y monacita, dentro de rocas metamórficas e ígneas.

Siegel F., 1992 - "Geoquímica Aplicada" Da a conocer fundamentos teóricos- prácticos y técnicas de la geoquímica aplicada a la exploración y biogeoquímica, asimismo, métodos de análisis de elementos traza, evaluación estadística de los datos, modelos conceptuales de dispersión geoquímica y su aplicación en diferentes disciplinas.

2.2. Bases teórico científicas

2.2.1. Aspectos fundamentes sobre tierras raras

Los elementos en la corteza terrestre se pueden clasificar en tres grupos, de acuerdo a su porcentaje ponderal, dado en unidades de concentración ppm (partes por millón). **Grupo I:** Comprenden los elementos cuyos contenidos sobrepasan los 1000 ppm y representan el 99.39% de la composición media de la corteza terrestre. **Grupo II:** Comprende los elementos cuya abundancia está entre 1 a 1000 ppm, representa el 0.37% y **Grupo III:** Comprende los elementos cuyos contenidos son inferiores a 1 ppm y representan el 0.0004%.

Los dos últimos grupos de elementos son los que encierran a los "elementos traza" de las rocas, entre los cuales es posible distinguir al grupo denominado "elementos lantánidos".

Durante la cristalización magmática llegan a formar sus propios minerales, como la monacita (CePO_4 ; LaPO_4 ; NdPO_4 ; SmPO_4), xenotima (Y, Yb) PO_4 y allanita ($\text{Ca}(\text{Ce}, \text{La}, \text{Y})(\text{Al}_2\text{Fe}^{2+}) (\text{O}/\text{OH}/\text{SiO}_4/\text{Si}_2\text{O}_7)$); los que en

ocasiones son encontrados en cantidades considerables como para ser considerados depósitos de tierras raras (carbonatitas y arenas de playa).

Las tierras raras según el *United States Geological Survey (USGS)*, comprende el Y (39) y la serie de los lantánidos de La a Lu (57 a 71), otros autores consideran junto a este grupo a los actínidos (especialmente el Th (90), U (92)) y Sc (21). Sin embargo, el paquete de elementos analizados con el método ICP-MS, solo incluye los elementos La, Ce, Lu, Tb, Yb e Y; el Th, U y Sc se toman en cuenta dentro de los demás elementos traza.

Todas las Tierras Raras presentan similar comportamiento químico (Cuadro 2.1), porque su configuración electrónica no está diferenciada en el grado de relleno de la capa 4f, implicada fuertemente en la vinculación química (Samson et al. 2005). Estos elementos forman principalmente iones trivalentes a excepción del Eu y Ce, los cuales presenta iones divalentes y tetravalentes respectivamente. Los radios iónicos de los iones trivalentes de La-Lu decrecen sistemáticamente con el aumento del número atómico, desde las tierras raras ligeras hasta las tierras raras pesadas, ocasionando principalmente el fraccionamiento de las tierras raras en la naturaleza. Esto se denomina el “efecto lantano” o “contracción lantánida”.

Las tierras raras se dividen en dos grupos: tierras raras livianas (La-Eu) y tierras raras pesadas (Gd-Lu, Y), con el Y incluido dentro de este último grupo debido a su similitud con el Ho, aunque él Y no posee ningún electrón f, en muchos procesos geoquímicos este se comporta similarmente al Holmio (Ho) por sus estados de oxidación trivalente e idéntico radio iónico.

Sin embargo, es posible una clasificación en tres grupos, incluyendo a tierras raras medianas (Eu-Dy). Las tierras raras son incompatibles, es decir que se concentran en la fase fundida que resulta de la fusión parcial del manto, permaneciendo durante la cristalización fraccionada de un magma.

El radio iónico condiciona la entrada de tierras raras en las redes cristalinas de los minerales, en base a la relación (Mineral /Fundido); es así que las tierras raras livianas que tienen mayor radio iónico, son fáciles de introducirse en las redes cristalinas de los feldespatos y apatitos. La esfena tiene fuerte contracción debido al fraccionamiento de tierras raras pesadas, además, en el apatito y en el circón pueden fraccionar fuertemente las tierras raras en los líquidos evolucionados. El granate admite en su red cristalina a las tierras raras pesadas, debido a su radio iónico relativamente menor, pero no admite las tierras raras ligeras que quedan relativamente concentrados en el fundido.

Cuadro 2.1. Principales propiedades físicas y químicas de los elementos de tierras raras, modificado de Gupta & Krishnamurthy, 2005.

| Element | Symbol | Atomic number | Atomic weight | Density (gcm ⁻³) ¹ | Melting point (°C) ¹ | Boiling point (°C) ¹ | Crustal abundance (ppm) ² | Vicker's hardness ³ | Crystal structure ^{1,4} |
|----------------------------------|--------|---------------|---------------|---|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Scandium | Sc | 21 | 44.95 | 2.989 | 1541 | 2832 | 8 | 85 | Hex |
| Yttrium | Y | 39 | 88.90 | 4.469 | 1522 | 3337 | 30 | 38 | Hex |
| <i>Light-rare-earth elements</i> | | | | | | | | | |
| Lanthanum | La | 57 | 138.90 | 6.146 | 918 | 3469 | 30 | 37 | Hex |
| Cerium | Ce | 58 | 140.11 | 8.160 | 789 | 3257 | 60 | 24 | Cub |
| Praseodymium | Pr | 59 | 140.90 | 6.773 | 931 | 3127 | 7 | 37 | Hex |
| Neodymium | Nd | 60 | 144.24 | 7.008 | 1021 | 3127 | 25 | 35 | Hex |
| Promethium ⁵ | Pm | 61 | 145.00 | 7.264 | 1042 | 3000 | 4.5 x 10 ⁻²⁰ | - | Hex |
| Samarium | Sm | 62 | 150.36 | 7.520 | 1074 | 1900 | 5 | 45 | Rho |
| Europium | Eu | 63 | 151.96 | 5.244 | 822 | 1597 | 1 | 17 | Cub |
| <i>Heavy-rare-earth elements</i> | | | | | | | | | |
| Gadolinium | Gd | 64 | 157.25 | 7.901 | 1313 | 3233 | 4 | 57 | Hex |
| Terbium | Tb | 65 | 158.92 | 8.230 | 1356 | 3041 | 0.7 | 46 | Hex |
| Dysprosium | Dy | 66 | 162.50 | 8.551 | 1412 | 2562 | 3.5 | 42 | Hex |
| Holmium | Ho | 67 | 164.93 | 8.795 | 1474 | 2720 | 0.8 | 42 | Hex |
| Erbium | Er | 68 | 167.26 | 9.066 | 1529 | 2510 | 2.3 | 44 | Hex |
| Thulium | Tm | 69 | 168.93 | 9.321 | 1545 | 1727 | 0.32 | 48 | Hex |
| Ytterbium | Yb | 70 | 173.04 | 6.966 | 819 | 1466 | 2.2 | 21 | Cub |
| Lutetium | Lu | 71 | 174.97 | 9.841 | 1663 | 3315 | 0.4 | 77 | Hex |

2.2.2 Principios básicos

La geoquímica es una herramienta valiosa que apoya a la investigación y exploración geológica, merced a la mejor comprensión de los procesos naturales que intervienen en la acumulación, distribución y dispersión de los elementos químicos en los diferentes dominios litoestratigráficos que conforman la tierra.

Las propiedades químicas de los elementos que influyen y controlan la afinidad química, movilidad, tendencia de migración, distribución en rocas u otras fases y la abundancia; están estrechamente relacionadas con el

número y la disposición de los electrones alrededor del núcleo atómico (Siegel, 1992).

2.2.2.1. Agrupación geoquímica de elementos

La agrupación geoquímica de dos o más elementos es un factor muy importante en estudios de prospección geoquímica o geoambientales. *Goldschmidt*, 1937, reconoció las asociaciones de elementos según la clase de material y formalizó el concepto de la afinidad de los elementos químicos de las fases que componen la tierra (Cuadro 2.2).

Los elementos pueden incorporarse en más de una fase, pero si un elemento tiene dos o más posibilidades para entrar en una red cristalina durante la formación de una roca, entrará en la fase en la cual se forman los enlaces más fuertes.

- **Elementos siderófilos:** Son aquellos que no se combinan cuando están en el estado metálico y son ricos en electrones libres.
- **Elementos calcófilos:** Son aquellos que tienden a formar enlaces covalentes y se unen con azufre en los sulfuros.
- **Elementos litófilos:** Tienden a formar enlaces iónicos, por lo general en los silicatos.
- **Elementos Atmófilos:** Suelen formarse de moléculas de gas o de compuestos simples de gases.

- **Elementos Biófilos:** Forman parte de la composición de los organismos y son necesarios para sus funciones vitales.

Cuadro 2.2. Afinidad de los elementos de las fases principales que componen la tierra, (Goldschmidt, 1937).

| FASE SIDERÓFILA | FASE CALCÓFILA | FASE LITÓFILA | FASE ATMÓFILA |
|---|---|--|---|
| Fe, Ni, Co, Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt, Au, Ge, Sn, Sb, (Pb), C, (As), P, Mo, W, (Nb), Ta, Se, Te, Cu, Ga | ((O)), S, Se, Te, Fe, Cr, (Ni), (Co), Cu, Zn, Cd, Pb, Sn, Ge, Mo, (O), As, Sb, Bi, Ag, (Au), Hg, Ru, (Pt), (Rh), Ga, In, Tl, (Pd) | O, (S), (P), (H), (C), Si, Ti, Zr, Hf, Th, Li, Na, K, Rb, Cs, F, Cl, Br, I, B, Al, (Ga), Sc, Y, TR (La-Lu), Be, Mg, Ca, Sr, Ba, (Fe), V, Cr, Mn, Nb, Ta, W, U, (Tl), (Ge), (Zn), (N) | (H), C, N, O, F, Cl, Br, I, Ar, He, Ne, Kr, Xe |
| | | | FASE BIÓFILA |
| | | | C, H, O, N, P, S, Cl, I, (Ca), (Mg), (K), (Na), (V), (Mn), (Fe), (Cu) |

Goldschmidt, 1937., también clasificó los productos de segregación intensa que tiene lugar durante la meteorización, erosión, transporte y deposición de material sedimentario (Cuadro 2.3).

Estos productos son minerales resistentes a la meteorización (resistatos), minerales que forman y que son estables en ambientes oxidantes o reductores (oxidados o reduzatos), minerales que componen los esqueletos de invertebrados (biodatos), arcillas (hidrolisados), carbonatos y evaporados; constituyen fases donde se concentran ciertos elementos relacionados con cada producto.

Cuadro 2.3. Clasificación de los productos sedimentarios principales provenientes de la meteorización, erosión y transporte (Goldschmidt, 1937).

| RESISTADOS (Si) | OXIDATOS (Fe, Mn) | HIDROLIZADOS (Al, Si, (K)) | Carbonatos (Ca, Mg) |
|---------------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------|
| Cuarzo | Goethita | Arcillas | Calcita |
| Circón | Limonita | Boemita | Dolomita |
| Magnetita | Pirolusita | Bauxita | Aragonito |
| Ilmenita | | Arcillas negras | |
| Rutilo | | | |
| Monacita | | | |
| Casiterita | | | |
| Au, Pt | | | |
| EVAPORADOS (Na, Ca, Mg, B) | REDUZADOS (C, S, CH, S²⁻) | BIODATOS (Ca, Mg, Si, P) | |
| Halita | Carbón | Calcita | |
| Yeso | Petróleo | Chert | |
| Anhidrita | Pirita | Fosforita | |
| Epsomita | Azufre | | |
| Boratos | | | |
| Calcita | | | |
| Aragonita | | | |
| Dolomita | | | |

Los elementos siderófilos Fe, Ni y Co; Ru, Rh y Pd; Re, Os, Ir y Pt, tienen reacciones químicas cristalográficas muy semejantes y los grupos presentan tendencias bastante similares en cuanto a reacciones fisicoquímicas.

Elementos calcófilos como: S, Se y Te; Cu, Zn y Cd; As, Sb y Bi; Ag y Hg, pueden agruparse según su configuración de electrones y tienden a formar enlaces covalentes o polares.

Los elementos litófilos presentan sub agrupaciones que muestran sub afinidades, como: Li, Na, K, Rb y Cs; Be, Mg, Ca, Sr y Ba; Ti, Zr, Hf, y Th; B, Al, Ga y las tierras raras. Esto se debe a su estructura similar de electrones extra nucleares y su tendencia a formar enlaces iónicos.

2.2.2.2 Sedimentos fluviales

Compuestos por los productos menos solubles de la meteorización, también se puede incluir elementos móviles como parte de los materiales clásticos y del material removido por las aguas y adsorbido en los sedimentos.

Este método es el más usado a nivel estratégico y se sostiene en la respuesta geoquímica de los elementos como estadio final de su evolución dentro del ciclo geoquímico de las esferas y el paisaje geoquímico. Es así, que las muestras de sedimentos fluviales son representativas de los productos de meteorización de las rocas; cuya área de influencia es aguas arriba de cualquier drenaje.

Los elementos resistentes de los ambientes primarios formados durante el proceso de lixiviación en forma de elementos metálicos, óxidos o sulfatos se depositan y se acumulan en función a su equivalencia hidráulica de las quebradas y ríos (Viladevall, 2008); asimismo, por su capacidad de ser absorbidos y por solubilidad otros elementos que no cumplan la primera condición de la dinámica fluvial, darán lugar a las denominadas aureolas de dispersión secundaria.

El contraste entre los valores anómalos y el valor de fondo, depende del contraste original de la procedencia de los sedimentos fluviales de la fracción analizada y del método de análisis. La persistencia de la

concentración de los elementos desde su fuente de emisión, obedece al aporte del metal a lo largo del curso del río y a la mezcla con sedimentos de bajo contenido metálico; estos factores a su vez se encuentran afectados por periodos estacionales y fisiográficos.

Las muestras de sedimentos fluviales, tienden a ser homogéneos cuando dicho metal se encuentra adsorbido en la fracción fina y cuando las variaciones sedimentológicas se deben a cambios locales de velocidad y el caudal del drenaje.

2.2.2.3 Ambientes geoquímicos

Es un conjunto de factores físicos y químicos que intervienen en la abundancia, distribución y migración de los elementos en los distintos procesos geológicos internos y externos que ocurren en las distintas esferas geoquímicas de la tierra. Sobre la base de estas variables, es posible clasificar los ambientes geoquímicos naturales de la Tierra en dos grandes grupos: (Rivera, 2007).

a) Ambiente geoquímico primario

Consiste de áreas que se extienden por debajo de los niveles de circulación de las aguas meteóricas hasta aquellos procesos de origen profundo, como: magmatismo y metamorfismo. Las condiciones presentes generalmente son: temperatura y presión relativamente alta, escaso oxígeno y limitado movimiento de fluidos (Figura 2.1).

La dispersión primaria se manifiesta como halos o aureolas geoquímicas de los elementos alrededor de las zonas mineralizadas, asociados o no, a alteraciones de la roca hospedante. En general como una distribución particular de los elementos en las rocas no alteradas.

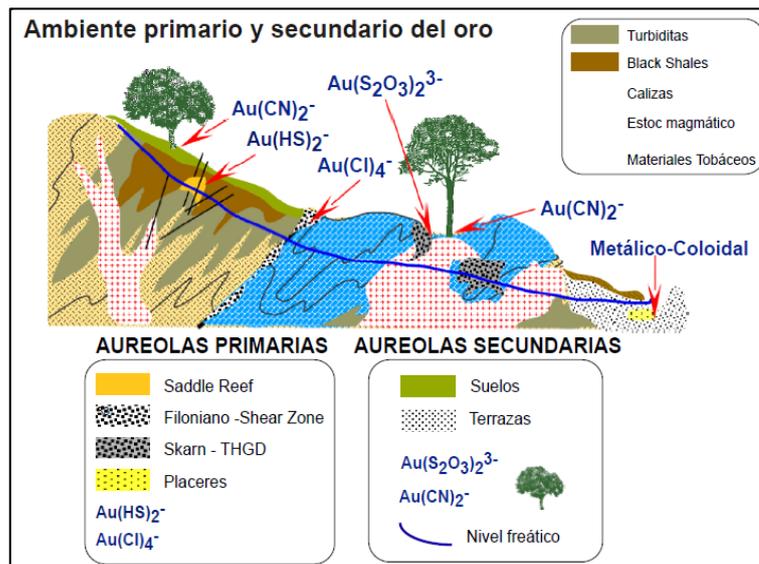


Figura 2.1. Comportamiento geoquímico de oro en ambientes primarios y secundarios.

b) Ambiente geoquímico secundario

Es el ambiente del intemperismo, lixiviación supergénica, transporte y sedimentación; caracterizado por bajas temperaturas y presiones, circulación libre de fluidos y abundante O_2 , H_2O y CO_2 . Las aureolas secundarias son extensas en relación a las aureolas primarias, donde los factores que activan los procesos de alteración que dan origen a estas aureolas, según Levison, 1980 son: geológicos, topográficos, climáticos, biológicos y antrópicos.

El origen de estas aureolas, se relaciona con el flujo de los distintos fluidos a distintas condiciones físico-químicas; que permite en función de la solubilidad, pH, Eh, fugacidad de oxígeno y azufre, depositarse en forma geométrica más uniforme a la mineralización primaria de la cual proceden (Viladevall, 2008) (Figura 2.2).



Figura 2.2. Dispersión química de sedimentos fluviales en un ambiente geoquímico secundario oxidado.

2.2.2.4. Dispersión geoquímica

Es la capacidad de migración de un elemento químico mediante procesos físicos y químicos. Depende de la movilidad geoquímica y se clasifica en:

- **Dispersión mecánica:** El elemento queda en el mismo estado químico durante su transporte. Hay poca diferenciación de material.
- **Dispersión química:** Hay diferenciación de material, elementos inmóviles (insolubles) y móviles (solubles).
- **Dispersión primaria:** Involucra los procesos de emplazamiento de minerales durante la formación de un depósito.

- **Dispersión secundaria:** Comprende la redistribución posterior de los elementos químicos a partir de ambientes primarios. Frecuentemente ocurren bajo condiciones de baja presión y temperatura (Figura 2.3).

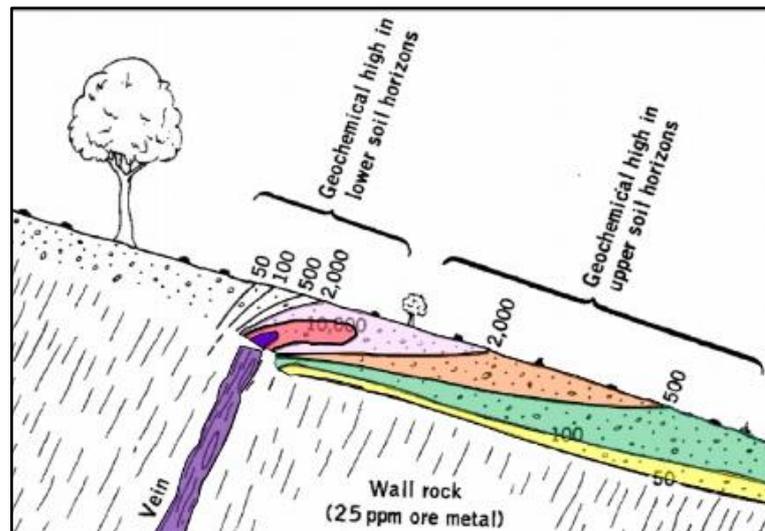


Figura 2.3. Aureolas de dispersión en un suelo residual, resultado de la dispersión secundaria de una estructura mineralizada.

a) Patrones de dispersión secundaria

Estos patrones son relativamente simples de interpretar, siempre y cuando la matriz provee una relación directa entre el patrón del metal dispersado y su fuente en la roca base.

- **Clásticos (singenéticos):** Cuando la dispersión ocurre por el movimiento de partículas sólidas (Figura 2.4).

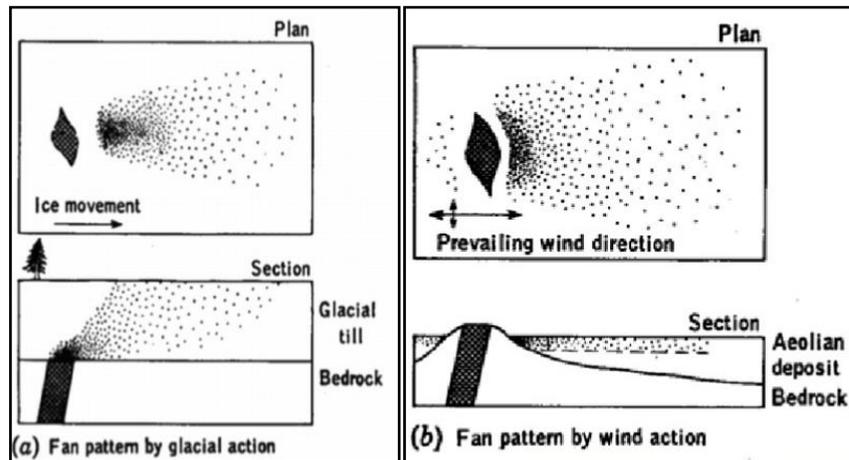


Figura 2.4. Patrones secundarios clásticos en suelos transportados, (a) por acción glacial y (b) por acción del viento.

- **Hidromórficos (epigenéticos):** Cuando los agentes dinámicos son soluciones acuosas (agua) (Figura 2.5).

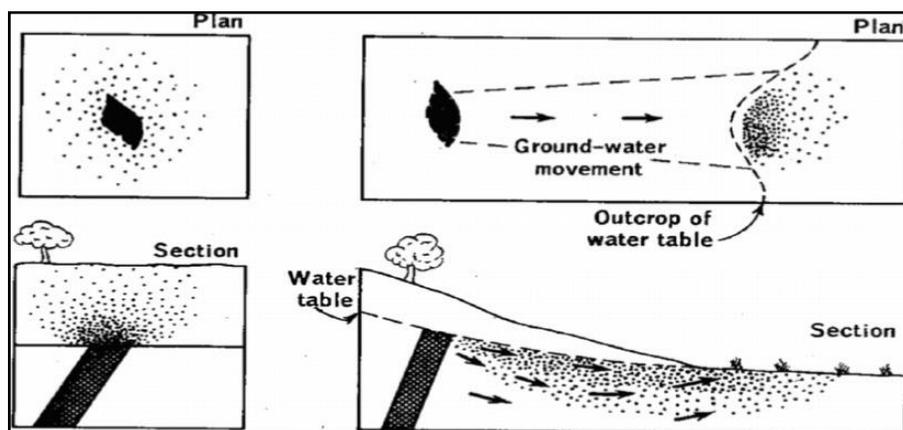


Figura 2.5. Patrones secundarios hidromórficos.

- **Biogénicos (epigenéticos):** Cuando los patrones son el resultado de la actividad biológica.

2.2.2.5. Movilidad geoquímica

La movilidad geoquímica de los elementos químicos, está en función de sus características físico-químicas (Figura 2.6). Según del tipo de alteración que sufren, adquirirían cierta movilidad en un medio; dando

lugar a su desplazamiento o migración de su aureola primaria para dar consecuentemente a las aureolas secundarias.

a) Movilidad hipógena

Es la movilidad bajo condiciones de alta presión y temperatura (ambientes primarios), depende de factores físicos como viscosidad del magma y presiones diferenciales. Por ejemplo: Durante la cristalización de los magmas o durante los procesos de metamorfismo.

b) Movilidad supérgena

Ocurre en ambientes secundarios a baja temperatura y presión, cerca o en la superficie. Los factores mecánicos importantes son: porosidad, tamaño de grano, densidad, todos relacionados a la viscosidad y velocidad de fluidos.

Cuando un elemento químico es liberado de las rocas mediante la meteorización, su migración supérgena; es decir su movilidad y dispersión, depende en gran parte de factores como: solubilidad, pH y Eh de un ambiente, adsorción y reacciones competidoras al cual se encuentra asociado (Cuadro 2.4). Por ejemplo, una relación de movilidad en estos ambientes es $Mg > Ca > Na > K > Si > Al = Fe$.

Cuadro 2.4. Movilidad de los elementos en función del ambiente geoquímico, modificada de Andrews & Jones, 1968.

| <i>Movilidad</i> | <i>Oxidante</i> | <i>Acido</i> | <i>Neutro y alcalino</i> | <i>Reductor</i> |
|---------------------------|--|---|--|---|
| Muy elevada | Cl, I, Br S, B | Cl, I, Br S, B | Cl, I, Br S, B Mo, V, U, Se, Ge | Cl, I, Br S, B |
| Elevada | Mo, V, U, Se, Re Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra Zn | Mo, V, U, Se, Re Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra Zn Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au | Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra | Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra |
| Media | Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au As, Cd | As, Cd | As, Cd | |
| Baja | Si, P, K Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi Sb, Ge, Cs, Tl | Si, P, K Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi Sb, Ge, Cs, Tl Fe, Mn | Si, P, K Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi Sb, Ge, Cs, Tl Fe, Mn | Si, P, K |
| Muy baja a Inexistente | Fe, Mn. Al, Ti, Sn, Te, W, Nb Ta, Pt, Cr, Zr Th, T.R. | Al, Ti, Sn, Te, W, Nb Ta, Pt, Cr, Zr Th, T.R. | Al, Ti, Sn, Te, W, Nb Ta, Pt, Cr, Zr Th, T.R. Zn | Al, Ti, Sn, Te, W, N Ta, Pt, Cr, Zr Th, T.R. S, B Mo, V, U, Se, Re, Zn Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au. As, Cd, Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl. |

Goldschmidt (1937), estudió el comportamiento de los elementos químicos en ambientes superficiales. Propuso que una primera evaluación de este comportamiento podía hacerse mediante un factor que designó “Potencial Iónico” y que se define por Z/r (la carga iónica de un elemento dividida por su radio iónico).

La figura 2.6 denota la categorización del comportamiento de los iones con respecto al agua en tres campos de actividad en base a sus valores de Z/r .

Los iones menos reactivos en medios acuosos, mantienen sus características iónicas en solución y tienen un potencial iónico (Z/r) de hasta 3. Otros iones con potencial iónico intermedios (entre 3 y 12), se unen con el ión hidroxilo (OH^-) y son elementos relativamente inmóviles y

están asociados a las arcillas y a los óxidos/hidróxidos de Fe y Mn (hidrolisados). Los elementos con potencial iónico superior a 12 forman complejos iónicos solubles con el oxígeno.

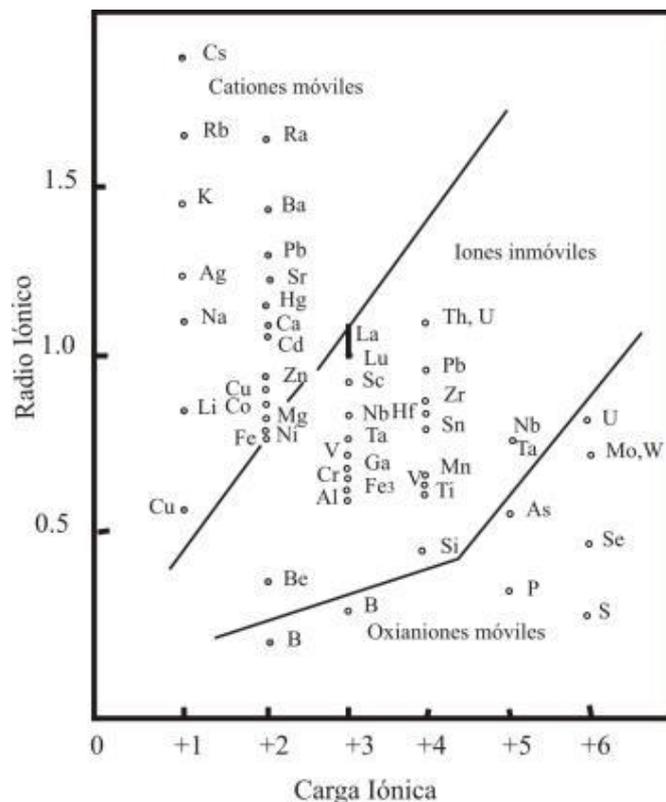


Figura 2.6. Movilidad de los elementos químicos en condiciones superficiales, Goldschmidt, 1937.

2.2.2.6 Asociación de elementos

Ciertos elementos tienden a ocurrir juntos bajo ciertas condiciones, en respuesta a movilidades relativas similares. En prospección geoquímica se hace mucho uso de los elementos “*pathfinder*” o elementos guías.

Las asociaciones geoquímicas se manifiestan en general por las condiciones de formación, las cuales muestran asociaciones de elementos con características comunes en cualquier ambiente geológico;

algunos elementos pueden viajar juntos durante los procesos ígneos y metamórficos, sin embargo, dichos elementos pueden separarse durante el ciclo de meteorización.

En algunos casos, los elementos que conforman una asociación no resultan apropiados para ser considerado como un elemento guía, debido a que dichos elementos carecen de movilidad geoquímica.

Sin embargo, estas asociaciones tienen un importante significado, dado a que estos elementos podrían indicar la presencia de otros elementos. Por ejemplo, las tierras raras La-Ce-Pr-Nd y Sm, están siempre asociadas y los depósitos porfiríticos de Cu y estos depósitos generalmente contienen Mo y Au (Sieguel, 1992).

2.2.2.7 Elementos indicadores

Los elementos muestran diferentes grados de movilidad, controlados por la estabilidad de los minerales que los contienen y por el ambiente en los cuales ellos están migrando, es preferible usar un pathfinder o elemento indicador para prospectar un elemento determinado.

El conocimiento de asociaciones lleva al concepto de elementos indicadores, definido como un elemento fácilmente detectable, usado como un guía para ubicar la presencia de un elemento económico deseado, el cual es difícil de detectar debido a problemas analíticos, costo

y a la ausencia de la movilidad diferencial del elemento buscado (Rivera, 2007) (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5. Elementos indicadores “*pathfinder*” de distintos tipos de yacimientos minerales. Compilado de Boyle, 1974; Beus & Grigorian, 1977 y Rose et al., 1979.

| | TIPO DE DEPÓSITO | Elementos Mayores | Elementos Asociados | Elementos indicadores Analizados por Métodos Comunes | Elementos Indicadores Analizados por Métodos Especiales |
|-----------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|--|---|
| YACIMIENTOS HIDROTÉRMICALES | Pórfido de Cu | Cu | Mo, Au, Ag, Re, As, Pb, Zn, K | Cu, Mo, Zn, W, Sb | Au, As |
| | Pórfido de Mo | Mo | W, Sn, F, Cu | Cu, Mo, Sn, W | F |
| | Skarn-magnetita | Fe | Cu, Co | Fe, Cu, Co | |
| | Skarn Cu | Cu, Fe | Au, Ag | Cu, Fe, Ag | Au |
| | Skarn Pb-Zn | Pb, Zn | Cu, Co | Pb, Zn, Cu, Co | |
| | Skarn W-Mo-Sn | W, Mo, Sn | F, Cu, Be, Bi | W, Mo, Sn, Cu, Be, Bi | F |
| | Vetas de metales bases polimetálicos y sulfuros masivos volcánogénicos | Pb, Zn, Cu | Ag, Au, As, Sb, Mn, Ba | Pb, Zn, Cu, Ag, Sb, Ba | Au, As |
| | Sn-W en greisenes de cuarzo | Sn, W | Cu, Mo, Bi, Li, Rb, Cs, Re, B, F | Sn, W, Mo, Cu, Bi | F, Li, Rb |
| | Veta sulfuro de Sn | Sn | Cu, Pb, Zn, Ag, Sb | Sn, Cu, Pb, Zn, Ag, Sb | |
| | Veta de Co-Ni-Ag | Co, Ni, Ag | As, Sb, Bi, U | Co, Ni, Ag, Sb, Bi | As, U |
| | Mena de Au | Au, Ag | As, Hg, Sb, Te, Se, U, Tl | Ag, Sb | Au, As, Hg |
| | Hg y Sb-Hg | Hg, Sb | As, Ba | Sb, Ba | Hg, As |
| | Vetas de U | U | Mo, Pb, F, Zn, Ag, Cu | Mo, Pb, Zn, Ag, Cu | U, F |
| | Cu en basalto | Cu | Ag, As | Cu, Ag | As |
| | Skarn Bi | Bi | Cu, Pb, Zn | Bi, Cu, Pb, Zn | |
| | Sulfuro de Cu masivo volcánogénico | Cu | Zn, Au | Cu, Zn | Au |
| | Capa de Fe rico de Au-As | Au, As | Sb | Sb | Au, As |
| | Pb-Zn, Valle Mississippi | Zn, Pb | Ba, F, Cd, Cu, Ni, Co, Hg | Zn, Pb, Cu, Ni, Co, Ba | F, Hg, Cd |
| | Fluorita, Valle Mississippi | F | Ba, Pb, Zn | Ba, Pb, Zn | F |
| | Arenisca con U | U | Rn, Se, Mo, V, Cu, Pb | Mo, V, Cu, Pb | U, Rn, Se |
| Estrato rojo con Cu | Cu | Ag, Pb | Cu, Ag, Pb | | |
| Calcreta de U | U | Rn, V | V | U, Rn | |
| YACIMIENTOS MAGMÁTICOS | Mena de cormita | Cr | Ni, Co, Fe, Mg | Cr, Ni, Co, Fe, Mg | |
| | Intrusivo estratificado con Pt-Ni-Cu | Pt, Ni, Cu | Cr, Co, Zn | Cu, Zn, Pt, Ni, Cr, Co | |
| | Magnetita estratificada | Fe | V, Ti, P | Fe, V, Ti, P | |
| | Sulfuro de Cu-Ni inmiscible | Cu, Ni | Pt, Co, As, Au | Cu, Ni, Co, Pt | As, Au |
| | Óxido de Fe-Ti inmiscible | Fe, Ti | P | Fe, Ti, P | |
| | Carbonatitas | Nb, Ta | Na, Zr, P, U | Nb, Ta, Na, Zr, P | U |
| Pegmatitas y aplogranitos | Be, Li, Cs, Rb | B, U, Th, tierras raras | Be, Sn, Nb, Ta, W | Li, Cs, Rb, F, U, Th | |
| YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS | Fosforitas | P | U | P | U |
| | Lutita con Cu | Cu | Ag, Zn, Pb, Co, Ni, Cd, Hg | Cu, Ag, Zn, Pb, Co, Ni | Hg, Cd |
| | Arenisca con Cu | Cu | Ag, Co, Ni | Cu, Ag, Co | |

2.2.2.8 Distribución geoquímica

Ciertas rocas tienen elementos característicos o tienen una concentración típica de un elemento, es decir existe una relación directa entre la geología y la dispersión de los elementos, a esta distribución se llama topografía geoquímica. La abundancia normal de un elemento en

materiales terrestres no mineralizados es comúnmente llamada el fondo o background (Figura 2.7).

| Elemento | Unidad | Valor | Elemento | Unidad | Valor |
|--------------------------------|--------------------|-------|----------|--------------------|-------|
| SiO ₂ | Peso% | 60.6 | Pd | µg.g ⁻¹ | 1.5 |
| TiO ₂ | Peso% | 0.7 | In | µg.g ⁻¹ | 0.052 |
| Al ₂ O ₃ | Peso% | 15.9 | Sn | µg.g ⁻¹ | 1.7 |
| FeO _T | Peso% | 6.7 | Sb | µg.g ⁻¹ | 0.2 |
| MnO | Peso% | 0.10 | I | µg.g ⁻¹ | 0.7 |
| MgO | Peso% | 4.7 | Cs | µg.g ⁻¹ | 2 |
| CaO | Peso% | 6.4 | Ba | µg.g ⁻¹ | 456 |
| Na ₂ O | Peso% | 3.1 | La | µg.g ⁻¹ | 20 |
| K ₂ O | Peso% | 1.8 | Ce | µg.g ⁻¹ | 43 |
| P ₂ O ₅ | Peso% | 0.1 | Pr | µg.g ⁻¹ | 4.9 |
| Be | µg.g ⁻¹ | 1.9 | Nd | µg.g ⁻¹ | 20 |
| B | µg.g ⁻¹ | 11 | Sm | µg.g ⁻¹ | 3.9 |
| N | µg.g ⁻¹ | 56 | Eu | µg.g ⁻¹ | 1.1 |
| F | µg.g ⁻¹ | 553 | Gd | µg.g ⁻¹ | 3.7 |
| S | µg.g ⁻¹ | 404 | Tb | µg.g ⁻¹ | 0.6 |
| Cl | µg.g ⁻¹ | 244 | Dy | µg.g ⁻¹ | 3.6 |
| Sc | µg.g ⁻¹ | 21.9 | Ho | µg.g ⁻¹ | 0.77 |
| V | µg.g ⁻¹ | 138 | Er | µg.g ⁻¹ | 2.1 |
| Cr | µg.g ⁻¹ | 135 | Tm | µg.g ⁻¹ | 0.28 |
| Co | µg.g ⁻¹ | 26.6 | Yb | µg.g ⁻¹ | 1.9 |
| Ni | µg.g ⁻¹ | 59 | Lu | µg.g ⁻¹ | 0.30 |
| Cu | µg.g ⁻¹ | 27 | Hf | µg.g ⁻¹ | 3.7 |
| Zn | µg.g ⁻¹ | 72 | Ta | µg.g ⁻¹ | 0.7 |
| Ga | µg.g ⁻¹ | 16 | W | µg.g ⁻¹ | 1 |
| Ge | µg.g ⁻¹ | 1.3 | Os | n.g ⁻¹ | 0.041 |
| As | µg.g ⁻¹ | 2.5 | Ir | n.g ⁻¹ | 0.037 |
| Se | µg.g ⁻¹ | 0.13 | Pt | n.g ⁻¹ | 1.5 |
| Br | µg.g ⁻¹ | 0.88 | Au | n.g ⁻¹ | 1.3 |
| Rb | µg.g ⁻¹ | 49 | Tl | µg.g ⁻¹ | 0.5 |
| Sr | µg.g ⁻¹ | 320 | Pb | µg.g ⁻¹ | 11 |
| Y | µg.g ⁻¹ | 19 | Bi | µg.g ⁻¹ | 0.18 |
| Zr | µg.g ⁻¹ | 132 | Th | µg.g ⁻¹ | 5.6 |
| Nb | µg.g ⁻¹ | 8 | U | µg.g ⁻¹ | 1.3 |
| Mo | µg.g ⁻¹ | 0.8 | Li | µg.g ⁻¹ | 16 |
| Ru | n.g ⁻¹ | 0.6 | Ag | n.g ⁻¹ | 56 |
| Cd | µg.g ⁻¹ | 0.08 | Re | n.g ⁻¹ | 0.188 |
| Hg | µg.g ⁻¹ | 0.03 | | | |

Figura 2.7. Abundancia química de la corteza continental, tomado de Rudnick & Fountain, 1995.

2.2.2 Parámetros estadísticos

2.2.2.1. Medidas de tendencia central

Son medidas estadísticas que pretenden resumir en un solo valor o conjunto de valores. Las medidas más utilizadas son: la moda, mediana, media y el promedio geométrico.

2.2.2.2. Medidas de dispersión

Estas medidas de resumen, están orientadas a cuantificar el grado o magnitud de como los datos se dispersan en torno a una medida de tendencia central. Por el contrario, poca dispersión, es señal de homogeneidad en los datos (Maluenda, 2014). Estas medidas son: rango, varianza, desviación estándar, error estándar, coeficiente de variación, desviación media.

La desviación estándar se usa para construir intervalos de confiabilidad que contienen valores límites extremos (mínimos y máximos) en torno a los cuales oscila un parámetro de un dominio en estudio.

Si el perfil de la curva que representa a un conjunto de datos tiene la forma de una campana, estamos seguros que aproximadamente un 68.27% de las veces, la medición estará en el intervalo: $X \pm$ desviación estándar; y con las características de la curva tipo campana, el intervalo $X \pm 2$ desviación estándar contendrá el 95% de los valores de la variable (Maluenda, 2014).

El error estándar suele representarse por “e.e”. Se trata de la desviación estándar dividida por la raíz cuadrada del número de datos. $e.e = S / \sqrt{n}$. Permite construir intervalos de confiabilidad para el promedio aritmético de los datos o población. A mayor número de datos “n”, menor es el error

estándar y por lo tanto más estrecho o preciso será el intervalo de estimación para el promedio (Maluenda, 2014).

2.2.2.3. Medidas de posicionamiento

Las medidas de posición son los cuartiles, quintiles, deciles y percentiles, los cuales dividen a una distribución ordenada en partes iguales. La mediana separa una serie estadística en dos subseries, la mediana de la primera subserie se le denomina primer Cuartil Q1 y el de la segunda subserie tercer Cuartil Q3 (Maluenda, 2014) (Figura 2.8). El percentil proporciona valores límites que separan los datos de manera que, por ejemplo, el percentil 80% nos indica que un 80% de los valores de la variable están por debajo de dicho valor, y el 20% restante por sobre el valor del percentil 80 (Maluenda, 2014).

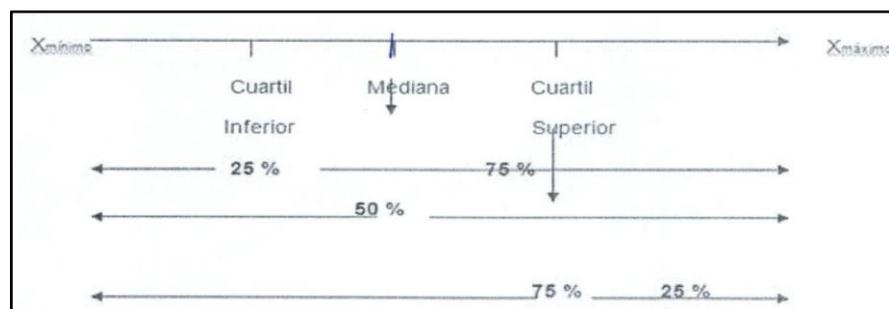


Figura 2.8. Medidas de posición.

2.2.2.4. Coeficiente de la forma de distribución

Otras medidas de resumen que se utilizan para caracterizar el comportamiento de una muestra de valores de una variable son el coeficiente de sesgo y el coeficiente de kurtosis.

a) Coeficiente de sesgo o coeficiente de asimetría

Cuantifica el grado de asimetría de una distribución. Cuando este valor es “cero”, sugiere que los datos están simétricamente distribuidos en torno a una medida de tendencia central, que generalmente es el promedio aritmético o la mediana.

b) Coeficiente de kurtosis E

Mide el grado de achatamiento o alargamiento de la curva generada por los datos (o el histograma), respecto del modelo teórico de Karl F. Gauss o curva de distribución normal. Mientras más alargada o aflautada es la curva, se dice leptocúrtica $E > 0$, mientras más aplastada o achatada es la curva, se dice platicúrtica $E < 0$ y cuando no hay achatamiento, se dice Mesocúrtica $E = 0$.

2.2.2.5. Diagramas estadísticos

Una de las maneras de presentar información estadística es la representación gráfica, el cual debe ser sencillo y auto-explicativo.

a) Gráfico de caja y bigotes

Es un diagrama de caja que presenta los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos sobre un rectángulo alineado horizontal o verticalmente. El rectángulo delimita el rango intercuartílico con la arista izquierda o inferior ubicada en el primer cuartil (cuartil inferior),

Q1 y la arista derecha o superior en el tercer cuartil (cuartil superior), Q3.

Las observaciones que están entre 1.5 y 3 veces el rango intercuartílico a partir de las aristas del rectángulo recibe el nombre de valores atípicos (outliers). Las observaciones que están más allá de 3 veces el rango intercuartílico a partir de las aristas del rectángulo, reciben el nombre de valores atípicos extremos (Figura 2.9).

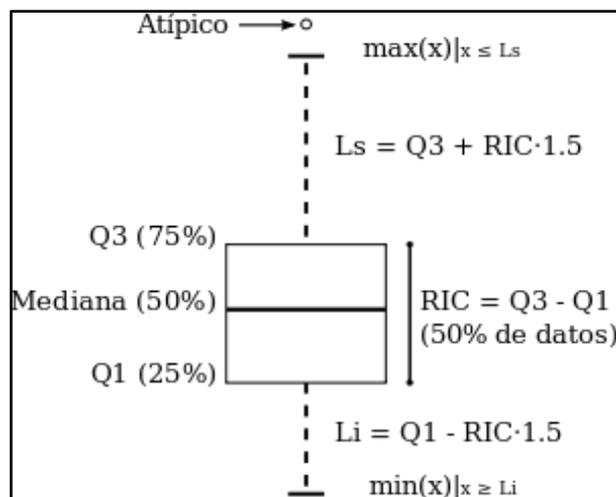


Figura 2.9. Diagrama de cajas.

b) Histograma de frecuencias

La organización de un buen número de datos en una tabla de frecuencia y luego la confección de un histograma nos permite comprender el comportamiento de la población de manera objetiva (Figura 2.10).

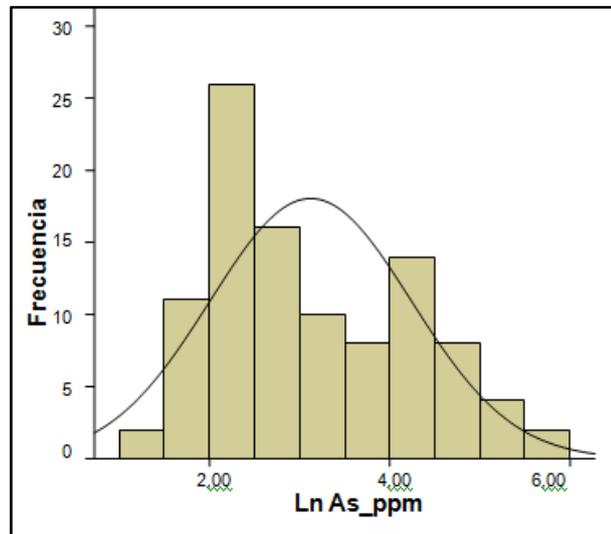


Figura 2.10. Histograma de distribución de As.

c) Gráfico de probabilidad

La gráfica de probabilidad es un método gráfico para determinar si los datos muestrales se ajustan a una distribución propuesta con base en un examen visual subjetivo de los datos.

En el caso que una distribución normal describa de una manera adecuada los datos, los puntos de la gráfica se ubicarán de manera aproximada a lo largo de una línea recta. Si los puntos se desvían de manera significativa de una línea recta, entonces el modelo propuesto no es el apropiado. Habitualmente, la determinación de si la gráfica de los datos es o no una línea recta, es subjetiva (Maluenda, 2014) (Figura 2.11).

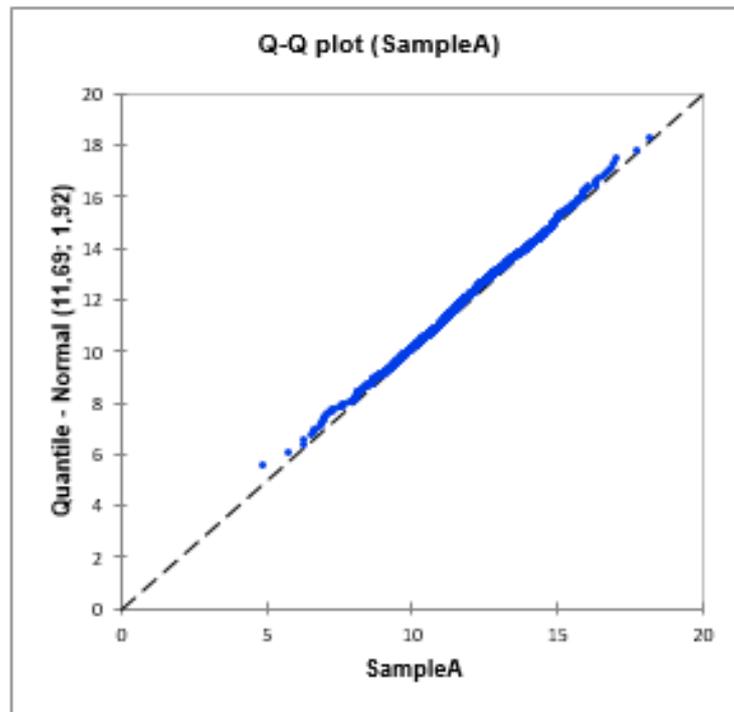


Figura 2.11. Gráfico de probabilidad normal.

2.2.2.6. Análisis bivarial

El propósito de este análisis es obtener y analizar el comportamiento de un indicador (intensidad o la fuerza de la relación entre dos variables cuantitativas “x” e “y”), que no depende de sus respectivas escalas de medición. Existe en varios indicadores de correlación.

a) Coeficiente de correlación de Pearson (r)

Es el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean aleatorias cuantitativas, a diferencia de la covarianza es independiente de la escala de medida de las variables (Figura 2.12). El valor del coeficiente de correlación “r” puede tomar valores, desde menos uno hasta uno (-1 a 1), mientras más cercano a uno, más fuerte

será la asociación lineal; mientras más cercano a cero indicaría que más débil es la asociación entre ambas variables y si es igual a cero se concluirá que no existe relación lineal entre ambas variables. (Maluenda, 2014).

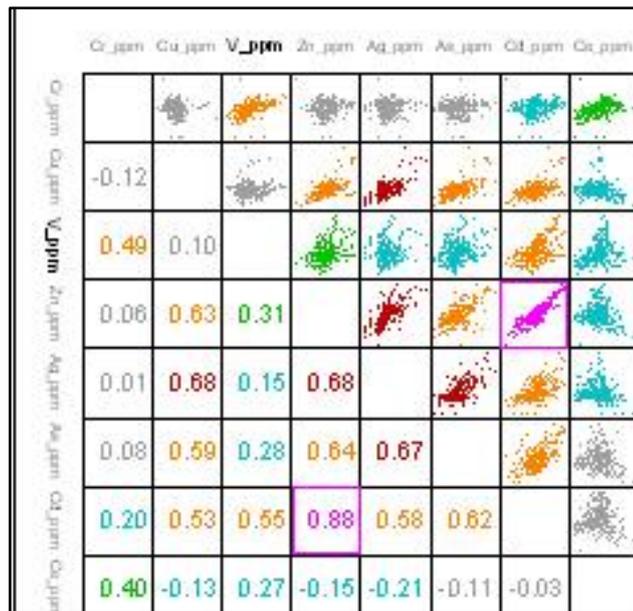


Figura 2.12. Correlación bivariada en ambientes intrusivos del Paleozoico.

2.2.2.7. Análisis multivariial

Muchos estudios de geoquímica aplicada, evalúan en primer término una sola variable por vez y luego se combinan los resultados de cada una; incluyen técnicas multivariiales, que se basan en la relación entre las concentraciones de varios elementos y otras mediciones que pueden hacerse con las muestras.

Los análisis de regresión múltiple, análisis agrupado, análisis discriminante, análisis de los componentes principales, análisis de

factores y vectores y una modificación del análisis factorial que se denomina el análisis por correspondencia, tienen múltiples aplicaciones en geoquímica (Maluenda, 2014).

En el presente estudio se usó la técnica análisis de componentes principales (ACP) y el análisis agrupado (*“cluster jerárquico”*).

a) Análisis de componentes principales

El método se basa en obtener los autovalores y autovectores de S o de R. El interés está puesto en la información aportada por los objetos, ya que con el buscamos describir los valores observados de p variables mediante un número $q < p$ de variables no correlacionadas entre sí, formadas por combinaciones lineales de las variables originales, que son los componentes principales.

Para determinar cuáles cuales CPs retener se pueden emplear diferentes criterios, por ejemplo, solo aquellas con autovalore >1 o el 90% de la variabilidad total, o graficar los autovalores en función de su orden (gráfica de sedimentación) y buscar el quiebre de la pendiente (codo) y retener solo los componentes anteriores a él.

El ACP es un método que da una solución única, y añadir o descartar CPs no cambia a las anteriores. Como las CP son no correlacionadas, son ortogonales entre sí y están elegidas de manera que la varianza en ellas sea máxima. En este nuevo sistema de ejes ortogonales cada objeto va a tener sus coordenadas, a las que llamamos las marcas de los objetos.

También cada variable original va a tener sus propias coordenadas, a las que llamamos las cargas de las variables. La representación de marcas y cargas en un gráfico cartesiano con las dos primeras CP se conoce como biplot. Generalmente los objetos se grafican como puntos y las variables como vectores con origen en el centro de coordenadas. Cuanto menor sea el ángulo entre la variable y un eje de CP mayor será la correlación entre ambas y cuanto más largo el vector mejor representado estará en el plano de esas dos CP. De la misma manera se puede interpretar el ángulo entre dos variables. Por otra parte, la cercanía entre puntos-objetos indica las similitudes entre ellos.

A veces es conveniente rotar los ejes de las CP de manera de que algunas cargas aumenten y otras disminuyan. Aunque los ejes rotados no cumplan la condición de máxima varianza van a explicar con la misma eficiencia la relación entre los datos. Es decir, con la rotación buscamos que las CP estén muy correlacionadas con un grupo de variables y muy poco con otras (Mena, 2016).

b) Análisis agrupado (*clúster* jerárquico)

Es un método multivariado, con el cual se clasifican los datos geoquímicos por grupo a fin de que cada grupo sea más o menos homogéneo y distinto de otros grupos.

Hay varios tipos de análisis agrupado, pero en geoquímica aplicada se usa más la agrupación jerárquica. La agrupación jerárquica une las observaciones más parecidas (Figura 2.13). Los grados de semejanza (determinados por la correlación iterativa) a los cuales se unen las observaciones se utilizan para construir un dendrograma Según Davis, 1986, las características de este método de análisis agrupado se resumen como sigue:

1. Se usa el coeficiente de correlación como medida de la semejanza.
2. Los valores semejantes más altos son los primeros que se vinculan.
3. Dos objetos pueden unirse mutuamente solamente si tienen las correlaciones más altas.
4. Después de agruparse los dos objetos, se calculan los términos medios de sus correlaciones con todos los otros objetos.
5. Las agrupaciones sirven, para ayudar al geólogo-geoquímico a definir las características de los valores de fondo litológicos y de la mineralización.

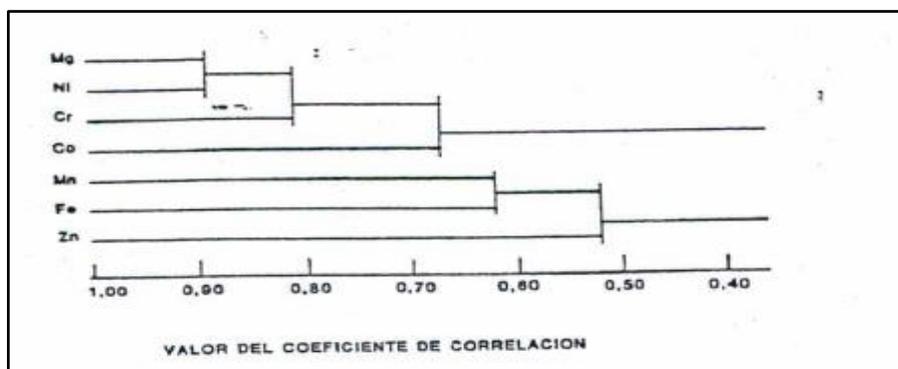


Figura 2.13. Análisis clúster de datos geoquímica de sedimentos fluviales.

2.2.3. Parámetros geoquímicos

Los parámetros geoquímicos usados en prospección geoquímica son: El *background*, *threshold* y anomalía geoquímica.

2.2.3.1. Valor de fondo o *Background*

Las abundancias de cualquier elemento particular en materiales terrestres estériles se consideran comúnmente como la abundancia media denominada *background*, que se puede definir como el valor normal o de fondo del material de un ambiente geológico, geomorfológico y geoquímico determinado (Rivera, 2007). Estadísticamente se define como media geométrica.

$$\bar{X} = \sum \frac{\log x}{N}$$

2.2.3.2. Umbral geoquímico o *Threshold*

Rivera, 2007, define el threshold como los límites de fluctuación local y regional del valor normal o background. Es la concentración de un elemento por encima del cual una muestra se considera anómala, podemos determinarlo de las siguientes maneras:

1) *Comparación de datos a partir de una bibliografía y/o con los resultados de una exploración de orientación*

Es útil si sólo unos pocos análisis están disponibles de un área. Es aplicable si una exploración de orientación ha sido realizada, como debe ser para toda región.

2) Cálculo del umbral a partir de la media más dos o tres veces la desviación estándar

Es asumir un umbral a un número específico de desviaciones estándares por encima de la media (Figura 2.14).

$$F = \frac{\sum T}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T - F)^2}{n - 1}}$$

F: fondo
T: tenor en ppm
N: número de muestras
 σ : desviación standard.

Figura 2.14. Cálculo del umbral geoquímico.

3) Cálculo gráfico (frecuencia acumulativa sobre papel logarítmico, método de Lepeltier)

Se determina del grafico de frecuencia acumulativa, método de Lepeltier, 1969. Es la agrupación de valores en un número adecuado de intervalos logarítmicos. El fondo "b" es la frecuencia correspondiente al 50% y el umbral es en la frecuencia correspondiente al 2.5% (Figura 2.15).

| Log ppm | Número de muestras | Número acumulativo | Porcentaje acumulativo |
|-------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| 1.10 - 1.20 | 1 | 240 | 100.0 |
| 1.20 - 1.30 | 16 | 239 | 99.6 |
| 1.30 - 1.40 | 33 | 223 | 93.0 |
| 1.40 - 1.50 | 50 | 190 | 79.2 |
| 1.50 - 1.60 | 50 | 140 | 58.3 |
| 1.60 - 1.70 | 36 | 90 | 37.5 |
| 1.70 - 1.80 | 9 | 54 | 22.5 |
| 1.80 - 1.90 | 6 | 45 | 18.8 |
| 1.90 - 2.00 | 5 | 39 | 16.3 |
| 2.00 - 2.10 | 4 | 34 | 14.2 |
| 2.10 - 2.20 | 10 | 30 | 12.5 |
| 2.20 - 2.30 | 8 | 20 | 8.3 |
| 2.30 - 2.40 | 5 | 12 | 5.0 |
| 2.40 - 2.50 | 4 | 7 | 2.9 |
| 2.50 - 2.60 | 2 | 3 | 1.2 |
| 2.60 - 2.70 | 0 | 1 | 0.4 |
| 2.70 - 2.80 | 1 | 1 | 0.4 |

Proyección de distribución de frecuencias acumulativas sobre papel de probabilidad.

Los porcentajes en cada clase sucesiva son acumulados desde la clase más alta hacia abajo.

Figura 2.15 Cálculo del umbral geoquímico por el método gráfico.

2.2.3.3. Anomalías geoquímicas

Una anomalía geoquímica es una desviación de los patrones geoquímicos que son normales para un área dada o ambiente geoquímico. Las anomalías relacionadas a una mineralización, son usadas como guía en la prospección y es denominado anomalías significativas; y las anomalías que no están relacionadas a una mineralización son conocidas como anomalías no significativas.

Se consideran anomalías no significativas a aquellas que son relacionadas a: ciertas rocas que están caracterizadas por tener un background alto, producto de la contaminación por factores antrópicos; y a los que resultan de los errores de muestreo, análisis químico e interpretación geoestadística (anomalías aparentes).

Las anomalías negativas, se define como una concentración muy por debajo del contenido normal (background).

En la distribución de las anomalías (positivas o negativas) de cada elemento pueden ocurrir los siguientes escenarios:

- Anomalías negativas acompañadas de anomalías positivas.
- Solo anomalías positivas sin ninguna anomalía negativa cercana.
- Solo anomalías negativas.

- Pocas anomalías negativas pueden ser delineadas donde la distribución de la data cruda esta sesgada positivamente.
- Las anomalías negativas no pueden ser reconocidas o alineadas en áreas de alto *background*.

2.3. Marco geológico

2.3.1. Estratigrafía regional

La cordillera Oriental es parte de la faja orogénica paleozoica orientada de NO a SE, conformada por rocas metamórficas, sedimentarias y volcánicas del Paleozoico. Las unidades lito-estratigráficas que se encuentran en el área de estudio, comprenden desde el Proterozoico (Complejo Marañón) hasta el Cuaternario Reciente.

Según Wilson y Reyes, 1964; Wilson et al., 1967; Sánchez, 1995, el Complejo Marañón, las formaciones Macno y Contaya y el Grupo Ambo constituyen la roca caja del batolito en el norte del Perú. Estas unidades serán base para el análisis e interpretación de la caracterización geoquímica de los elementos químicos del sureste de la intercuenca Alto Marañón IV, a continuación, se describen cada una de estas unidades:

2.3.1.1. Metamórficos del Neoproterozoico

Complejo Marañón (PE-cm)

Según su posición estratigráfica y el grado de metamorfismo, esta unidad se considera como las rocas más antiguas que conforman el basamento

cristalino, sobre el cual se han desarrollado las cuencas paleozoicas y mesozoicas.

Se trata de cuerpos alargados de diferentes altitudes, constituidos por rocas metandesitas verdosas, micaesquistos gris verdoso, filita negra, pizarras y cuarcitas con contenido de anfibolitas y vetas de cuarzo, limitado por fallas en su contacto oriental.

Los mejores afloramientos se encuentran al norte de la localidad de Balsas, entre Poña y Utco; asimismo, entre las localidades de Santo Tomas y Yomblón. En los alrededores de Poña y al norte de Lavador, San Vicente de Púsac, Huanabamba, Balsas, Chacanto-Tuén, se observan paragneises, gneis migmatíticos, esquistos, anfibolitas, filitas y algunas apófisis de rocas intrusivas (Sánchez, 2006). El relieve que caracteriza a estas rocas es accidentado y desértico (Figura 2.16 y 2.17).

| ERA | SERIE | SISTEMA | AMBIENTES LITOESTRATIGRÁFICOS | UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS | SIMBOLOGÍA | DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA | AMBIENTES LITOESTRATIGRÁFICAS | SIMBOLOGÍA | | | |
|-------------|-------------|---|---|--|--|---|-------------------------------|--|--|---------------------------|--|
| CENOZOICO | CUATERNARIO | Holocena | Depósitos cuaternarios | Dep. Aluvial | Q-al | Gravas en matriz arena rojiza. | Intrusivos del Paleozoico | C-10/gol, C-10z/gol, C-8/gol, C-9n/gol | | | |
| | | | | Dep. Fluvial | Q-fl | Se ubican en los bordes de los ríos. Consiste mayormente por gravas, arenas y limos. | | | | | |
| MEZOSÓICO | PALEÓGENO | Eocena | Sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo superior - Paleógeno | Dep. Coluvial | Q-co | Gravas englobadas en matriz arenosa. | Intrusivos del Paleozoico | C-10/gol, C-10z/gol, C-8/gol, C-9n/gol | | | |
| | | | | Dep. Morrénticos | Q-mo | Gravas con matriz arena-limosa. | | | | | |
| | CRETÁCEO | SUPERIOR | Fm. Chota | KSP-ch | Areniscas y conglomerados en la base. | | | | | | |
| | | | Gpo. Pullucana | Ks-pu | Calizas nodulares con límites ondulados en estratos gruesos. | | | | | | |
| | | | Fm. Chulesc/Pariatambo | Kl-chpt | Calizas, margas de color beige con intercalación de estratos delgados y gruesos. | | | | | | |
| | | | Gpo. Goyllarisquizga | Klg | Areniscas cuarzosas blanquecinas bien estratificadas de grano medio a grueso, en algunos sectores presenta lutitas verdes. | | | | | | |
| | JURÁSICO | SUPERIOR | Fm. Sarayaquillo | Js-sa | Areniscas rojizas, feldespáticas estratificadas con lentes de yeso. | | | | | | |
| | | | Fm. Condorsinga | Ji-c | Calizas masivas grises bien estratificadas con presencia de dolinas. | | | | | | |
| | PALEOZOICO | TRÁSICO | SUPERIOR | Sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico | Fm. Aramachay | Jl-a | | | Areniscas bituminosas, lutitas negras, con algunos estratos de calizas, con presencia de amonites. | Intrusivos del Paleozoico | C-10/gol, C-10z/gol, C-8/gol, C-9n/gol |
| | | | | | Fm. Chambará | TR-ch | | | Calizas masivas micríticas, gris azuladas en estratos gruesos. | | |
| PÉRMIANO | | SUPERIOR | Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior | Gpo. Mtu | Ps-m | Conglomerados y areniscas de coloraciones rojizas. | | | | | |
| | | | | Gpo. Copacabana | Pl-co | Calizas azuladas masivas y marrones recristalizadas. | | | | | |
| CARBONÍFERO | | SUPERIOR | Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior | Gpo. Ambo | C-av | Tobas de cristalinas, litcos en estratos gruesos. | | | | | |
| | | | | Fm. Lavasen | C-a | Areniscas verdes, lutitas negras y conglomerados. | | | | | |
| DEVÓNIANO | | SUPERIOR | Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior | Fm. Tres Lagunas | Dscl-tl | lavas en almohadillas, de composición basáltica de color verde con intercalaciones esporádicas de hialoclastias, aglomerados y volcánicos verdosos. | | | | | |
| | | | | Fm. Contaya | O-c | lutitas y pizarras negras a gris oscuras, en capas gruesas, a veces laminadas, intercaladas con areniscas, algunas cuarcitas | | | | | |
| ORDOVICIANO | | SUPERIOR | Sedimentarios y metasedimentarios silicoclásticos del Paleozoico inferior | Fm. Mamo | CaO-m/CaO-m/mcz | Areniscas, limoarcillitas gris oscuras con intercalaciones de filitas verdes/Esquistos de mica y filitas verdes con presencia de cuarzo blanco con contenidos de oro. | | | | | |
| | | | | | PE-e, gn | Esquistos y filitas verdes. | | | | | |
| CAMBIANO | INFERIOR | Sedimentarios y metasedimentarios silicoclásticos del Paleozoico inferior | Complejo del Marañón | PE-e, gn | Esquistos y filitas verdes. | | | | | | |
| | | | | | | NEO PROTEROZOICO | | | | | |

Figura 2.16. Columna litoestratigráfica del sureste de la intercuenca Alto Marañón IV.



Figura 2.17. Afloramiento de metandesitas de color verde del Complejo Marañón (PE-cm), vista en la margen derecha de la quebrada Saumate en la localidad de Huanabamba.

2.3.1.2. Sedimentarios y metamórficos silicoclásticos del Paleozoico inferior

Formación Macno (CaO-m)

Definida por Sánchez et al., 2006, en el cuadrángulo de Bolívar. Consiste de esquistos, filitas, meta areniscas y metavolcánicos, yace en leve discordancia angular sobre las filitas y esquistos del Complejo Marañón, su límite superior está marcado por una leve discordancia con las pelitas sobreyacientes de la Formación Contaya.

La Formación Macno aflora en la localidad de Chalabamba, Succha, Achupas, sur de la falla Poña, a lo largo del río Chusgón, norte de Leymebamba. En la quebrada Ventanas se encuentra en discordancia

angular con lavas de la Formación Tres Lagunas. Se le atribuye una edad Cambriana a Ordoviciana.

Formación Contaya (O-c)

Esta unidad fue descrita por Wilson y Reyes, 1964 en la región Pataz, como lutitas y pizarras negras o gris oscuras, en capas delgadas con presencia de graptolites. Afloran en ambos márgenes del río Marañón, intercalados con areniscas grises de grano fino y cuarcitas.

Sánchez, 2006., ha registrado la Formación Contaya en el cuadrángulo de Leymebamba en la carretera Balsas-Leymebamba cerca de la Cordillera Calla Calla. Asimismo, al oeste de Bolívar se observa pelita gris oscura con patinas blanco amarillentas y óxidos.

Sobreyace a la Formación Macno e infrayace al Grupo Ambo en discordancia angular, su posición litoestratigráfica indica una edad pre Carbonífera, la característica resaltante es el contenido de graptolites en los Cerros de Contaya el cual indican una edad correspondiente al Ordoviciano medio (Sánchez, 2006).

2.3.1.3. Sedimentarios siliciclásticos del Paleozoico superior

Grupo Ambo (Ci-a)

Las secuencias representativas se encuentran al norte de la localidad de Bolívar en las localidades de Abra Barro Negro entre Pana y Lanchas

Chico, Molino Viejo-Aricapampa-Succha. Las secuencias volcanosedimentarias se observan en el valle del río Marañón en la localidad de Jecumbuy y consiste de dos secuencias importantes: 1) Secuencias sedimentarias constituidos de areniscas grises, lutitas grises y calizas en estratos delgados (cuadrante I) y 2) Secuencias volcánicas constituido de estratos masivos de ignimbritas y estratos de flujos de lavas (cuadrante II), se considera parte de la Formación Lavasen y parte del Grupo Ambo (Sánchez, 1995).

Este grupo sobreyace en discordancia angular a la Formación Contaya, y la litofacies sedimentaria se han descrito como Grupo Ambo. Según Steinman, 1929., esta unidad ha sufrido un metamorfismo de contacto debido a su proximidad a los intrusivos de la localidad de Balsas.

Grupo Copacabana (Pi-co)

Consiste de afloramientos restringidos y aislados (Kummel, 1950) de calizas en estratos delgados intercalados con areniscas calcáreas y limoarcillitas calcáreas, con algunos niveles delgados de arenisca gris; algunas calizas tienen restos de corales, equinodermos, briozarios, ostrácodos y foraminíferos, como se observó en los cerros de Calla Calla al sur de Barro Negro y al sureste de Bolívar en el camino al Tambo de Callangate (Sánchez A., 1995).

Este Grupo descansa sobre secuencias volcánicas de la Formación Lavasen y en el camino de Bolívar a Callangate se encuentra cubierto por los grupos Pucará y Goyllarisquizga. De acuerdo a sus relaciones estratigráficas y al contenido de fósiles se considera que se ha depositado entre el Pensilvaniano superior y Permiano inferior.

Grupo Mitu (Ps-m)

Este grupo sobreyace en discordancia angular a las calizas del Grupo Copacabana, en algunas localidades sobreyace a la Formación Lavasen e infrayace a las calizas del Grupo Pucará, como se observa en el río Chon Chon.

Consiste de areniscas tipo arcosas, subarcosas, subcuarzosas y líticas de grano medio a grueso, mal clasificados; asociados a niveles de lodolitas y limolitas rojizas. La secuencia volcanoclástica y piroclástica está constituida por tobas de lapilli, tobas de ceniza en estratos gruesos, algunos conglomerados y areniscas tobáceas. Se le asigna una edad correspondiente al Permiano medio a superior por las dataciones radiométricas realizadas en rocas volcánicas (221 ma) por el INGEMMET, 1995.

2.3.1.4 Volcánicos del Paleozoico superior

Formación Tres Lagunas (DsCi-tl)

Se trata de una secuencia de lavas de composición basáltica y basalto andesítico con flujos piroclásticos y areniscas líticas descritas por Wilson & Reyes, 1964. Esta unidad infrayace en discordancia erosional a los conglomerados del Grupo Ambo y sobreyacen discordante a la Formación Macno.

Según, Sánchez & Galdós., 2006, esta formación aflora restringidamente y discontinua desde el NE de La Libertad hasta el oeste de Leymebamba; sobreyace en discordancia angular al Complejo Marañón y a la Formación Contaya e infrayace en discordancia erosional a conglomerados del Grupo Ambo y a rocas piroclásticas de la Formación Lavasén.

Formación Lavasen (Csp-vl)

Se trata de una secuencia piroclástica de naturaleza dacítica a riolítica y en menor proporción rocas andesíticas tardías con textura afanítica fluidal, donde se observan fenocristales de plagioclasas, inmersos en una pasta silíceo, piroclástica y amigdaloides, como alteración principal se observa silicificación débil, con diseminación de trazas de pirita y arsenopirita y en la parte superior se constituye de brechas y tobas que afloran en la quebrada Lavasen cerca de la localidad de Pataz (Figura 2.18).

Esta formación constituye el núcleo de la cordillera oriental y se caracteriza por presentar numerosos valles en U, circos glaciares y crestas irregulares tipificando un relieve característico de montañas altas (Wilson & Reyes, 1964).



Figura 2.18. Afloramiento de lavas andesíticas de color gris de la Formación Lavasen cubierto por abundante likens y musgo de color verde en la quebrada Quinahuayco, vista al este.

Sánchez 1995, en la localidad de Bolívar define la posición estratigráfica, el cual indica que esta unidad infrayace a areniscas y conglomerados rojos del Grupo Mitu, por lo que se les asigna una edad correspondiente al Permiano-Carbonífero y sobreyace a las litofacies sedimentarias detríticas del Grupo Ambo (en la localidad de Jecumbuy y Yarnalen). Dataciones radiométricas de U-Pb en zircón, reportan una edad de 336.87 ± 0.18 ma (Miskovic et.al., 2009).

2.3.1.5. Sedimentarios carbonatados del Triásico - Jurásico

Grupo Púcara (TrJi-p)

Según Mégard 1968, esta secuencia calcárea sobreyace al Grupo Mitu, quien ha dividido a este Grupo en las formaciones: Chambará, Aramachay y Condorsinga. Este grupo se distribuye en el sector norte de los cuadrángulos de Bolívar y Leymebamba.

Sobreyace en discordancia erosional al Grupo Mitu e infrayace al Grupo Goyllarisquizga en discordancia angular, tiene una potencia máxima aproximada de 600m, medidos en la parte norte de los ríos Parcoy y Marañón.

Formación Chambará

Se caracteriza por presentar estratos gruesos en la parte inferior y su contenido de fósiles del Noriano-Retiano, sobreyace la Formación Aramachay.

Formación Aramachay

Presentan afloramientos menos resistentes a la erosión, con estratificación plana, paralela y tabular cuyos estratos tienen 0.40m de espesor. Consiste de calizas y limoarcillitas color marrón oscuro, intercaladas con calizas grises a negras, bituminosas, limoarcillitas calcáreas color marrón oscuro en estratos tabulares y delgados.

Formación Condorsinga

Esta unidad tiene una estratificación delgada en su base y gruesa en el tope, los estratos delgados (10 a 30 cm de grosor) de calizas micríticas son de color gris a beige y presentan superficies de estratificación paralelas, discontinuas y ligeramente onduladas; en algunos sectores se observa intercalaciones silicoclásticas finas de color verde y gris.

2.3.1.6. Sedimentarios siliciclásticos del Cretácico

Grupo Goyllarisquizga (Ki-g)

Esta secuencia se halla distribuida en ambos flancos del valle del río Marañón, tal como se observa en la localidad de Saumate. Se le denomina indiviso por ser imposible de separar las formaciones que si se pueden cartografiar en el sector de Celendín a Chacanto.

Consiste de areniscas cuarzosas estratificadas de color blanco, blanco rojizo a gris de grano grueso a conglomerádico intercaladas por lutitas gris rojiza (Figura 2.19). Sobreyace al Grupo Pucará en discordancia angular y a unidades más antiguas como el Complejo Marañón generalmente desde Balsas hacia el norte. El contacto superior es concordante (discordancia paralela) con las calizas de las formaciones Chúlec y Pariatambo (Albiano).



Figura 2.19. Afloramiento de areniscas blanquecinas del Grupo Goyllarisquizga sobre el Complejo Marañón. Vista al norte en la localidad de Chuquiten.

2.3.1.7 Sedimentarios carbonatados del Cretáceo

Formación Chúlec (Ki-ch)

Consiste de secuencias calcáreas en estratos medianos a delgados de tonalidad blanca a crema con bioturbación, biomicríticas y abundantes fósiles como turrítelas y bivalvos. Las calizas son lutáceas a margosas, presentan niveles de lutitas grises, margas amarillentas y calizas marrones a cremas. Esta unidad contiene una fauna abundante de fósiles, los que indican la parte inferior del Albiano medio. La naturaleza de material clástico indica que el mar alcanzó una mayor profundidad, lo cual representaría una segunda etapa de transgresión marina, como se observa en la carretera Chacanto - San Vicente - Longotea.

Formación Pariatambo (Ki-pt)

Según Wilson y Reyes 1984, esta formación se constituye de calizas y lutitas, en capas delgadas estratificadas, presentan espesores de 200 a 250 m. La caliza es bituminosa con un olor fétido, además de nódulos silíceos formando lajas, las lutitas son negras y ocurren como intercalaciones delgadas entre las capas calcáreas, presentando abundantes amonites y escamas de peces bien conservados, los que pertenecen al Albiano medio.

Grupo Pulluicana (Ks-pu)

Se trata de calizas biomicríticas de estratos gruesos resistentes a la erosión y margas de color gris, con niveles arcillosos y arenosos en la parte inferior, conforman superficies de estratificación ondulada. Presentan abundantes fósiles (ammonites, gasterópodos y bivalvos), dicha fauna indica una edad entre el Albiano tardío y el Cenomaniano medio (90 ma) (Benavides, 1956). Sobreyace en concordancia a la Formación Pariatambo e infrayacen en discordancia con la Formación Chota del Cretáceo superior-Paleógeno.

2.3.1.8 Sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo superior - Paleógeno

Formación Chota (Ksp-ch)

Esta formación yace en forma discordante a la formación Crisnejas que afloran en el flanco oeste del batolito y sobreyace a las calizas del Grupo Pulluicana. Los afloramientos importantes se ubican en la localidad de

Bolívar y a lo largo de la depresión estructural entre Bolívar-Longotea y en el valle del río Marañón que consisten de areniscas y lodolitas rojizas a púrpuras. Megard, 1979., le asigna una edad de 115 Ma, el cual pertenece al Cretáceo superior (entre el Santoniano y Eoceno).

2.3.1.9. Depósitos Cuaternarios (Q-al/fl/co/fg)

En el Pleistoceno ocurre una sedimentación generada por eventos glaciares que dieron origen a depósitos glacio-fluviales (acumulación restringida de morrenas). Las morrenas de mayor dimensión se localizan en las localidades de Unamen y Chincahuayco de la provincia de Bolívar.

2.3.1.10. Intrusivos del Paleozoico

Las rocas plutónicas fueron descritas por Wilson & Reyes 1964 y Sánchez 1995; como una faja alargada de rumbo NO-SE y tienen como roca hospedante al Complejo del Marañón que fue denominado Batolito de Pataz por Screiber et al., 1990., se considera una edad Carbonífera en base a su posición estratigráfica y algunas dataciones. Estas unidades están representadas por los intrusivos del Batolito Gollón-Callangate de edad Carbonífera.

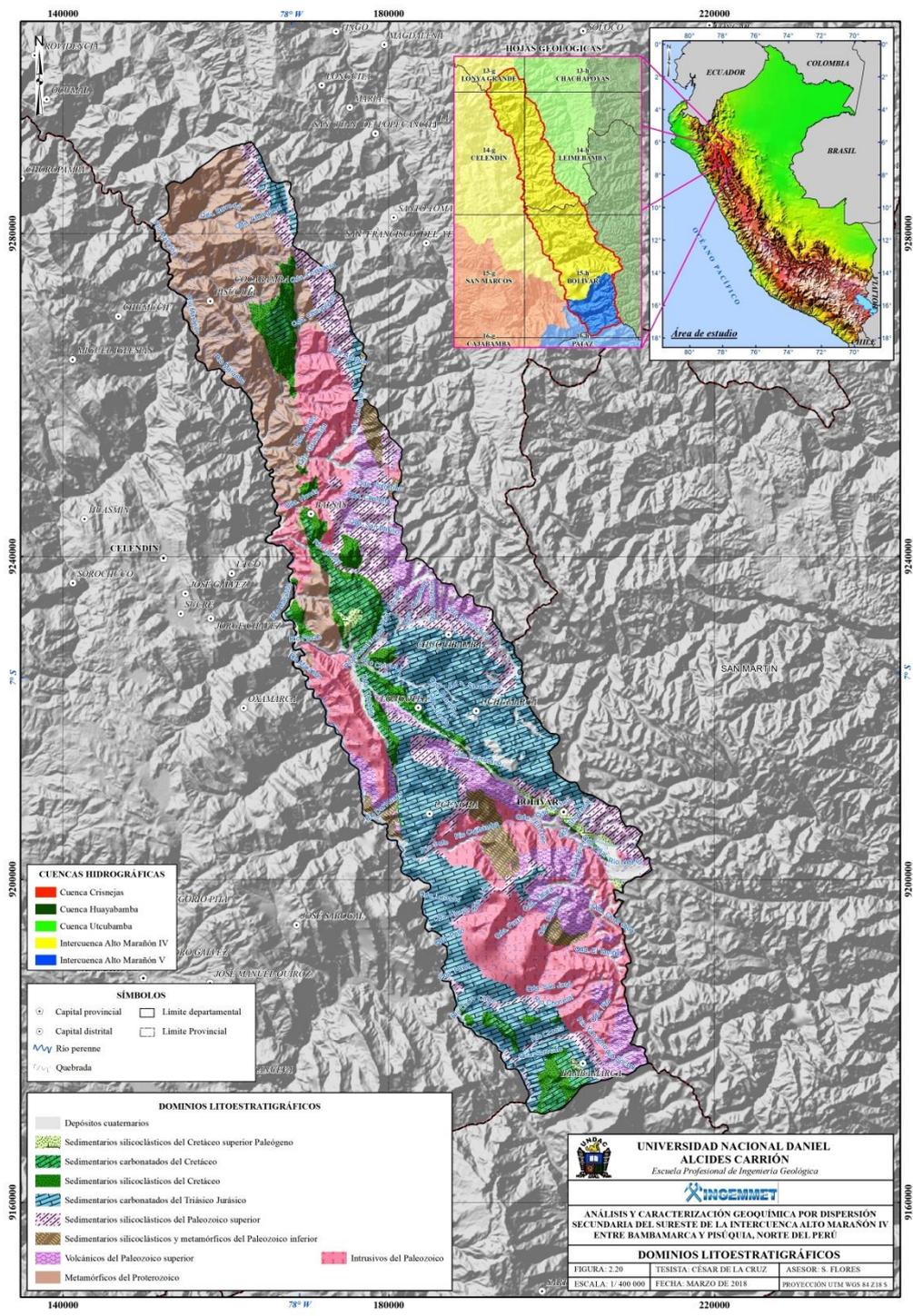
Batolito Gollón Callangate

Sánchez 2006, denomina así, a unos cuerpos plutónicos distribuidos de manera discontinua en una faja de 15 a 20 Km de ancho; según a su ubicación recibe el nombre, es así que en la localidad de Gollón se ubica

la zona central de los cuerpos plutónicos del área de estudio. Se trata de un batolito compuesto mayormente de plutones simples que forman parte de la faja granítica de la Cordillera Oriental.

Este batolito se encuentra emplazado en rocas del Paleozoico incluyendo el Grupo Ambo y parte de la Formación Lavasen. Las capas rojas del Grupo Mitu del Permiano superior, sobreyacen en disconformidad a este Batolito. Asimismo, la mayoría de los cuerpos plutónicos tienen por lo menos un contacto tectónico ya sea con las rocas de caja o con rocas más jóvenes.

Las principales unidades son: Diorita Yalen, Tonalita – Granodiorita Gollón, Granodiorita - Tonalita Balsas, Tonalita - Granodiorita Lavador, Granodiorita Los Alisos, Monzogranito Abra Chanchillo, Monzogranito Yalen, Monzogranito - Granodiorita Callangate, Sienogranito Chacanto, Monzogranito Enaben.



2.3.2 Geología Estructural

El área de estudio corresponde al bloque del Marañón, se observan formaciones Paleozoicas y Mesozoicas que afloran en discordancia angular con rocas del Complejo Marañón, producto de eventos orogénicos, etapas de sedimentación, deformación y erosión; representados por bloques levantados fallados, los cuales corresponden a una zona de movimientos verticales originados durante el Paleógeno Neógeno (Haeberlin, 2002; Cardona, 2006).

Los movimientos orogénicos tardihercínicos del Pérmico medio afectaron a las formaciones durante el Paleozoico superior (Grupo Ambo) y a sedimentos del Pensilvaniano y Pérmico inferior (lutitas, margas y calizas) que generó algunos plegamientos. La erosión posterior dio origen a las molasas continentales del Grupo Mitu, paralelamente se produjo un periodo de vulcanismo durante el Pérmico. Las calizas del Grupo Pucará tienen plegamientos al igual que el Grupo Mitu, a consecuencia de los movimientos orogénicos del ciclo andino.

2.3.2.1 Bloque del Marañón

Se ubica al noreste de la deflexión de Cajamarca y al este de la unidad imbricada, corresponde a una zona donde los movimientos verticales originaron grandes bloques fallados durante el Paleógeno Neógeno, sus efectos se localizan en el denominado Complejo del Marañón del Ordoviciano (Haeberlin, 2002; Cardona, 2006), donde ciertas fajas

hundidas constituyen una zona estructural distinta, a la cual se le aplica el nombre de fosas tectónicas (Graben del Marañón).

El Graben del Marañón es una faja angosta de cuencas tectónicas que coinciden con el valle del río Marañón, en este sector se distingue la separación entre el Macizo del Marañón y la Cordillera Oriental, los cuales delimitan bloques levantados en rocas del Proterozoico y Paleozoico con bloques de unidades Mesozoicas las cuales se encuentran plegadas y falladas (Sánchez, 1995).

La deformación relacionada consiste de fallas verticales de alto ángulo de recorrido regional con diversas reactivaciones, las principales fallas que existen en el área de estudio son:

A. Zona sur del Bloque Marañón

Fallas Bambamarca - Sicuaya

Se ubica al sur del área de estudio y se caracteriza por un conjunto de fallas normales escalonadas de dirección N° 40° a 55° O, estos sistemas de fallas han levantado el bloque conformado por rocas intrusivas del Batolito y unidades de la Formación Lavasen; asimismo, forman un graben en rocas mesozoicas.

B. Zona centro del Bloque Marañón

Las fallas principales de esta zona son paralelas al río Marañón y coinciden con la mayor debilidad que está relacionada a la antigua margen oeste del cratón Amazónico (Miskovic et al., 2009).

Falla Lanchas

Se extiende desde el sur hasta el SE de Bolívar, tiene una longitud de 20 Km, al oeste limita con la falla Poña y al NE con la falla Bolívar, este sistema se encuentra deformando rocas intrusivas (bloque rígido exhumado). Se orientan de NO a SE y forman parte del sistema de fallas Marañón que controlaron la evolución del emplazamiento del Batolito de Pataz.

Falla Marañón

Se trata de una falla cortical originado desde el Paleozoico. En el Paleozoico superior y Mesozoico estas estructuras han sido reactivadas como falla de rumbo dextral y sinistral, el cual generó el metamorfismo tectónico (formación de gneis y esquistos) a lo largo del río Marañón.

En el Cenozoico este sistema de fallas tuvo un comportamiento inverso, afectando así a rocas Meso-Cenozoicas, que generó la exhumación del sector central.

Falla San Vicente - Poña

Esta falla tiene una longitud mayor a 110 km, se orienta al NNO-SSE y origina un horst con la falla Limón, en el norte, es responsable de la exhumación de la unidad intrusiva Lavador y en el sur pone en contacto a las rocas metavolcánicas de las formaciones Macno y Tres Lagunas con las calizas del Grupo Pucará.

Falla Bolívar - Longotea

Falla de rumbo N 60°O que pone en contacto rocas Paleozoicas con rocas Mesozoicas. Este sistema de fallas son paralelas entre Longotea y Pacarishca, forman un graben que espacialmente coincide con el valle de Bolívar y se orienta de NO a SE.

Falla Millpo

Se localiza en el Cerro Millpo Grande, esta falla pone en contacto a las rocas del Grupo Goyllarisquizga (Neocomiano-Aptiano) y a las rocas intrusivas del Carbonífero. Por las relaciones temporales, esta falla se ha originado después del emplazamiento de los granitos de la unidad Gollón - Callangate y las ignimbritas de la Formación Lavasen (Mamani, edición).

C. Zona norte del bloque del Marañón

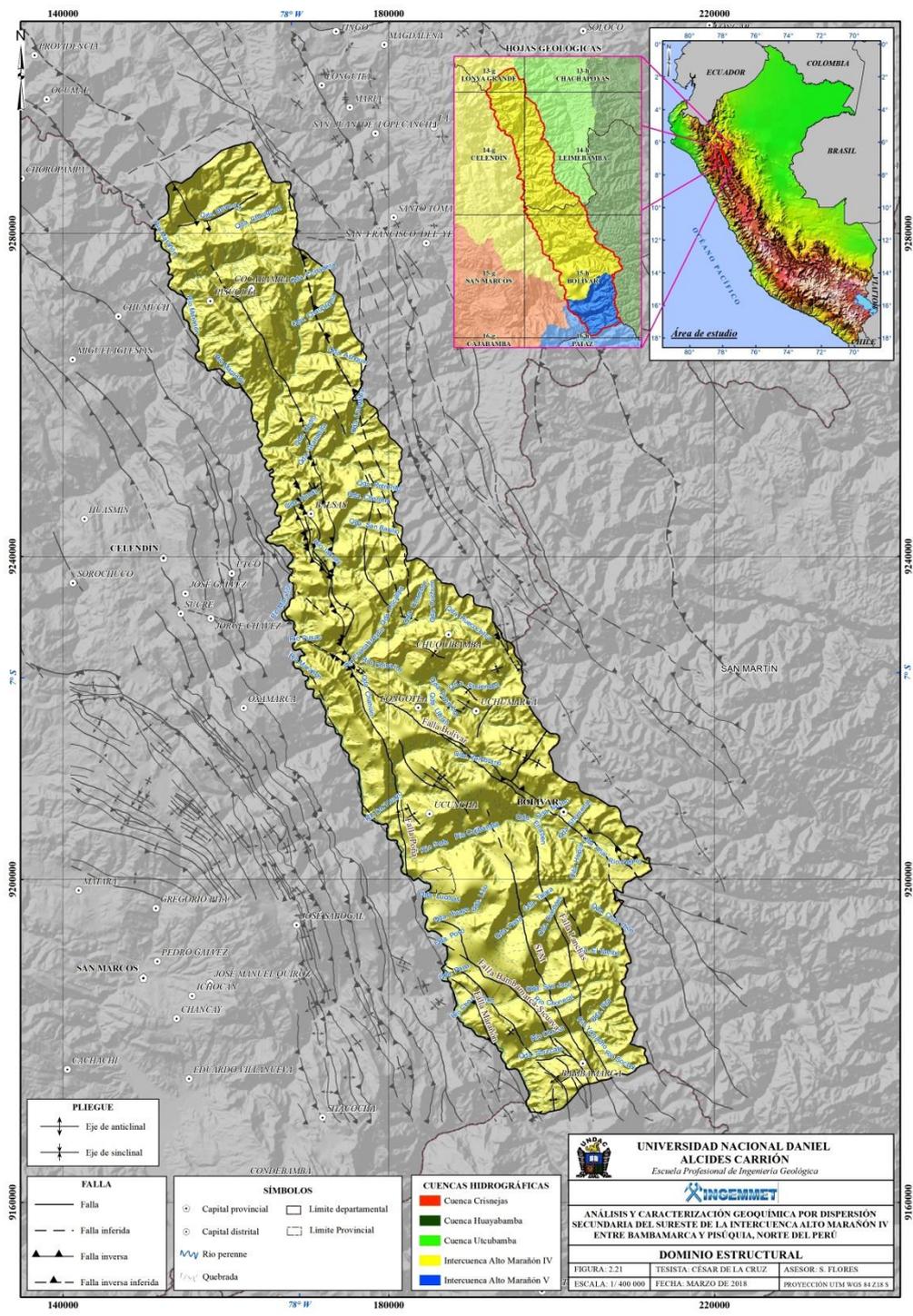
Se caracteriza principalmente por la estratificación sub horizontal de unidades volcánicas (Formación Lavasén), Grupo Mitu y el Grupo Pucará que no están afectados por fallamientos (Wilson & Reyes, 1964). Estructuras menores como fallas de reacomodo tectónico de dirección NE-SO se observan en los alrededores de Uchumarca, a continuación se describen las principales fallas.

Falla Limón

Se ubica al oeste de Balsas y tiene una longitud de 100 km, orientadas al NO, se infiere que es una falla vertical a subvertical.

Fallas Balsapampa - Jahuay - Retama

Ubicadas entre las fallas San Vicente-Poña y Barro Negro de componente inverso con sentido de inclinación al suroeste.



2.3.3 Geología Económica

Según Bellido & De Montreuil, 1972., el área de estudio se encuentra en la Provincia Andina Oriental, se caracteriza por presentar yacimientos filonianos, donde el oro se presenta como inclusiones en el cuarzo y pirita; asimismo, como solución en el sulfuro de hierro, emplazados en unidades graníticas del Carbonífero, la menor concentración de oro (Au) se asocia a rocas metamórficas del Complejo Marañón (Haeberlin et al., 2004).

La alteración hidrotermal relacionados a las estructuras filoneanas consiste de sericitización, cloritización, carbonatación y piritización, junto al intenso blanqueamiento de las rocas graníticas y una alteración débil de clorita y muscovita en las rocas metamórficas (Haeberlin et al., 2004).

En la localidad de Uchumarca afloran calizas del Grupo Pucará, los cuales evidencian mineralización de Pb y Zn, estas ocurrencias puedan ser similares a los depósitos del tipo Mississippi Valley (MVT) como, por ejemplo: Bongará (Zn-Pb-Ag) el cual se ubica al noreste del cuadrángulo de Bolívar (Basuki & Spooner, 2009).

Se considera unidad metalotecto a los “stocks” ultrabásicos, batolitos y “stocks” de composición intermedia a félsica del Paleozoico y Cenozoico; asimismo, a rocas metamórficas del Precámbrico, Paleozoico; los sedimentos del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico.

Es importante mencionar la existencia de placeres a lo largo del río Marañón.

Las franjas metalogénicas representan épocas de mineralización, que se extienden a lo largo de sistemas de fallas regionales y litologías, que han favorecido la mineralización de depósitos minerales. De esta manera, Quispe et al., 2008., definió 23 franjas metalogénicas. En el área de estudio se ubican tres de ellas (I, II y XVI) (Figura 2.22).

2.3.3.1. Franja I: Depósitos de Au en rocas meta-sedimentarias del Ordovícico y Silúrico Devónico

Esta franja ocupa la mayor parte del área de estudio, las rocas hospedantes están conformadas por pizarras y esquistos del Paleozoico inferior, las estructuras mineralizadas corresponden a vetillas y mantos lenticulares de cuarzo-oro, controladas principalmente por fallas inversas de orientación NO-SE; la mineralización probablemente está asociada a eventos magmáticos del Ordoviciano y Siluriano-Devoniano.

Entre los principales depósitos que se evidencian en el área de estudio son vetas, así como: Santo Tomas-Cocabamba (Au), Huanabamba (Au, Ag), Chanchillo (Au), Urcococha (Au, Ag, Pb, Zn, Cu), Yajamina (Au), Urcococha (Au), Longotea (Au, Ag, Pb, Zn, Cu).

2.3.3.2. Franja II: Depósitos Orogénicos de Au-Ag-Pb-Zn-Cu del Carbonífero Permiano

Esta franja abarca el sector sur del área de estudio con una orientación NO-SE, se emplaza en rocas graníticas del Batolito Gollón-Callangate, las evidencias de mineralización corresponden a vetas controladas por fallas inversas.

El control estructural de estas vetas está dado por el sistema de fallas Marañón de carácter regional, cuya dirección principal es NO-SE. Las vetas tienen distintas direcciones, algunas son paralelas y otras son perpendiculares y muestran discontinuidad debido a los desplazamientos ocasionado por el sistema de fallas Marañón.

Las ocurrencias metálicas reconocidas son: Lavador-Poña (Au, Ag, Cu) (Figura 2.23), Gollón (Au), Chalabamba (Au), Bolívar (Au, Pb), Incapirca (Au), Lanchas (Au) y oro aluvial como placeres auríferos en terrazas y conos aluviales a lo largo del río Marañón entre Balsas y Lonya Grande.

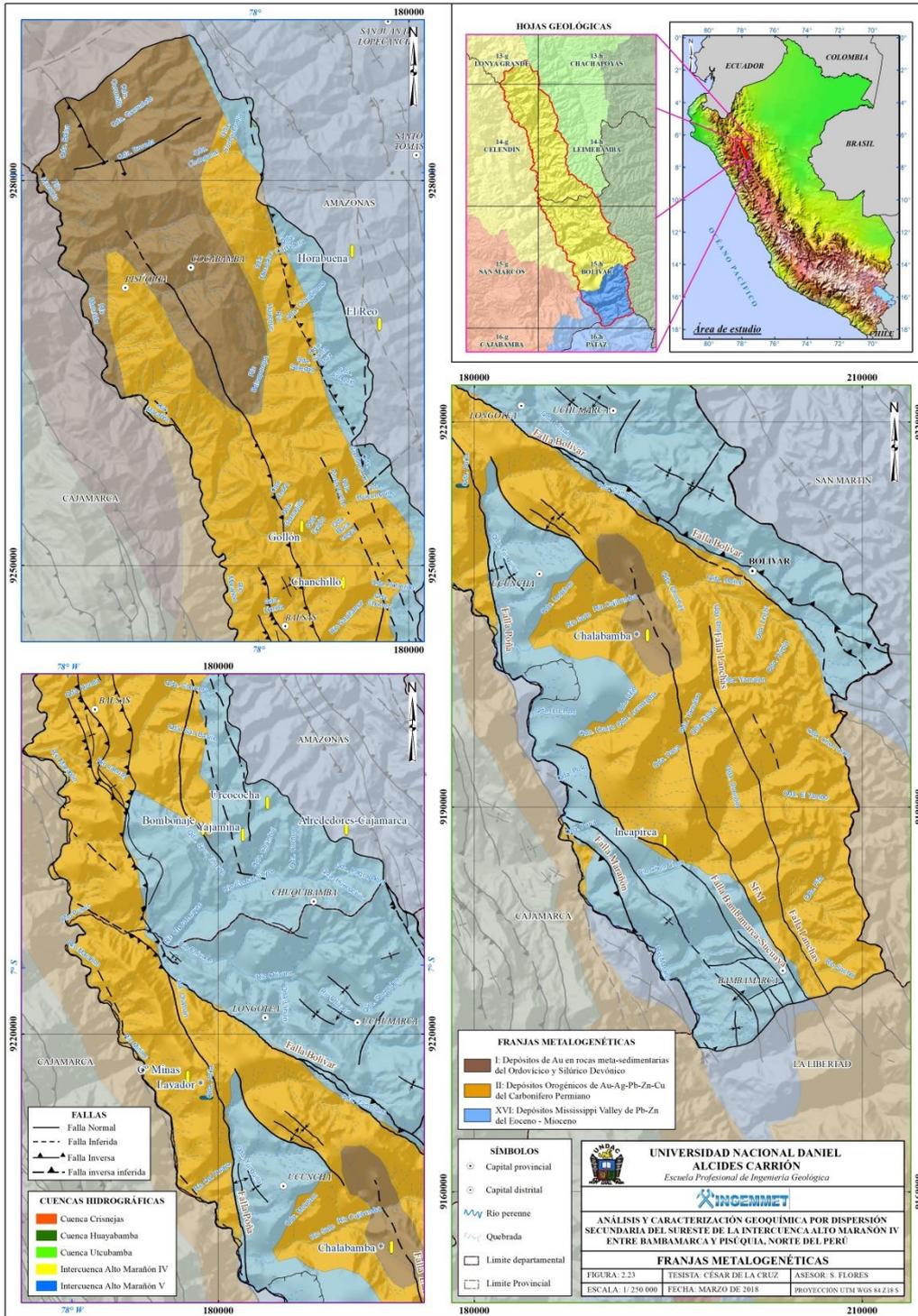


Figura 2.22. Veta de cuarzo con relleno de fractura por tensión vista en el sector suroccidental Cerro Minas, área Lavador (Sánchez, 2006).

2.3.3.3. Franja XVI: Depósitos Mississippi Valley de Pb-Zn del Eoceno - Mioceno

Esta franja se encuentra constituida por las calizas del Grupo Pucará. Las anomalías identificadas de Pb y Zn se ubican al sureste del poblado de Uchumarca y en la localidad de Jecumbuy los valores económicos se encuentran asociados a la falla Sute Bambamarca.

Las ocurrencias metálicas reconocidas son Uchumarca (Pb-Zn), Jecumbuy (Ag) y Purunllacta (Zn).



2.4. Definición de términos

Prospección geoquímica: Es la aplicación práctica de los principios geoquímicos teóricos para la exploración minera. Proporciona un reconocimiento eficaz en áreas grandes, mediante el análisis de rocas, suelos, sedimentos, aguas superficiales, aguas subterráneas, vegetación y gases.

Dispersión geoquímica: Capacidad de migrar de un elemento desde su origen hacia otro ambiente a través de diferentes procesos fisicoquímicos y mecánicos.

Movilidad geoquímica: Es la facilidad con que un elemento o sustancia puede moverse dentro de un ambiente específico. El conocimiento de cuáles son las formas químicas estables en un determinado conjunto de condiciones (pH, Eh).

Asociación geoquímica: Es el conjunto de ciertos elementos que están comúnmente asociados entre ellos. Una de las aplicaciones prácticas de este conocimiento, es el uso de elementos pathfinders o elementos guía en la exploración geoquímica.

Elemento pathfinders o elemento guía: Es aquel elemento relativamente móvil, asociado con el elemento que se está buscando y

puede ser encontrado fácilmente, forma un amplio halo de dispersión y es detectado con facilidad por los métodos analíticos.

Afinidad geoquímica: Conjunto de propiedades que determinan su distribución.

Background o valor de fondo: Se define como el intervalo normal de concentración de un elemento en una determinada área.

Threshold o umbral geoquímico: Representa el límite superior de las fluctuaciones del valor de fondo.

Anomalía geoquímica: Se define como el valor por encima del umbral geoquímico. Desviación de los patrones geoquímicos que son normales para un área o ambiente determinado; manifestada como desviación positiva o negativa de los patrones normales de concentración de uno o más elementos.

Caracterización: Determinar los atributos peculiares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás.

Unidad de aporte: En términos geoquímicos corresponde a una unidad litológica que aporta mayores sedimentos en el arroyo.

Componentes Principales: Es una técnica estadística de síntesis de la información o reducción de la dimensión (número de variables), el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible.

Coefficiente de Correlación de Pearson: Indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.

Intercuenca Hidrográfica: Es un área que recibe drenaje de otras unidades aguas arriba.

2.5. Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

El análisis y la caracterización geoquímica por dispersión secundaria del sureste de la intercuenca Alto Marañón IV entre Bambamarca y Pisúquia; define al dominio de sedimentos fluviales procedentes de las rocas intrusivas de tendencia calco-alcalina, cuya signatura de distribución es Au, Ag, Pb, Zn, Cu, As, V, Sc, Sr, Co y Ni relacionado a la abundancia de

Au-Ag; y en unidades metamórficas el oro se correlacionaría con As, (-Ga, -Sc), Sr y la plata a Pb-Zn.

2.5.2 Hipótesis específicos

- La abundancia de oro y otros elementos metálicos guardan relación a las unidades intrusivas de composición granodiorítica y tonalítica, en donde se tendría una asociación de intensidad fuerte de Au+/-Cu, Co, As, Cr, Ni.
- Existe una buena correlación de los elementos de tierras raras en unidades metamórficas del Paleozoico.
- Existe una correlación inversa entre LILE y las anomalías de oro en unidades graníticas aflorantes en el área de estudio.

2.6. Identificación de variables

2.6.1. Variables independientes

Muestras de sedimentos fluviales del sureste de la intercuenca Alto Marañón IV entre Bambamarca y Pisúquia.

2.6.2 Variables dependientes

- Abundancia geoquímica de los elementos *comodities* (valor de fondo y umbral geoquímico).

- Distribución de las unidades intrusivas aflorantes en el sureste de la intercuenca Alto Marañón IV, entre Bambamarca y Pisúquia.
- Características petromineralógicas de las unidades intrusivas aflorantes en dicha intercuenca.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

Es una investigación combinada del tipo exploratorio, descriptivo - correlacional y aplicativo (Figura 3.1).

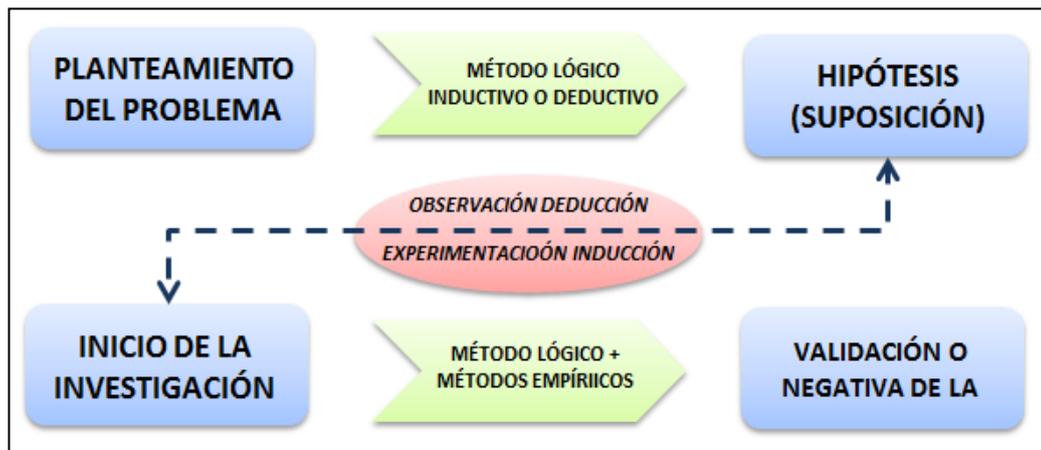


Figura 3.1. Tipo y diseño de investigación.

3.2 Método de investigación

Se trata de un método de investigación combinada donde:

- Los métodos lógicos-exploratorios (Deducción, análisis y síntesis). Se basan en el razonamiento de encontrar anomalías geoquímicas de los elementos *comodities*, y su relación con el emplazamiento de rocas ígneas y metamórficas que caracterizan importantes patrones de distribución geoquímica.
- Los métodos descriptivos-correlacionales. Es el conocimiento obtenido de las descripciones de campo en diferentes grados de precisión, exactitud y error de las unidades de aporte (litotipos finos) y fuentes de procedencia de los sedimentos; alteraciones

hidrotermales, asociaciones mineralógicas y el grado de correlación de un elemento con otro.

3.3. Diseño de la Investigación

La investigación consiste en la sistematización bibliográfica, tecnología disponible, aspectos económicos, situación política, localización y tiempo, todas estas variables influyen en la calidad de la investigación.

3.3.1. Etapa preliminar de gabinete

A. Compilación bibliográfica

Consiste en la revisión, análisis y síntesis de la información bibliográfica. Así como: publicaciones, artículos y boletines de congresos; simposios y foros de INGEMMET, Sociedad Geológica del Perú, México, España y publicaciones de la *Journal of Geochemical Exploration* y *Economic Geologic*.

B. Diseño de muestreo

Antes de la recolección de muestras de sedimentos fluviales se realiza un diseño de muestreo sistemático en la red hidrográfica, con la finalidad de obtener información geoquímica de la superficie del terreno limitada por la divisoria de aguas. Se siguió los procedimientos que usa el programa de geoquímica del INGEMMET, que a continuación se detalla.

a) El muestreo a realizar es del tipo sistemático estratificado, la ubicación de los puntos se ha determinado a partir de una detallada investigación,

considerando la información geológica-minera, geomorfológica, análisis e interpretación de imágenes satelitales y una base topográfica elaborada por el IGN a escala 1: 100 000 (Figura 3.2).

b) La malla de muestreo debe de seguir un patrón específico, que garantice la recolección de las muestras en intervalos uniformes.

c) La densidad de muestreo para la presenta investigación es de 1 muestra cada 10 Km² aproximadamente, con un margen de aceptación de +/-2 Km². Esto depende de varios factores como: accesibilidad, abundancia de sedimentos y áreas protegidas.

d) Se elabora una matriz de control de muestras, considerando las muestras de control (duplicado, estándar y blanca) en base a las cuencas hidrográficas y hojas topográficas.

e) Posterior al diseño se procede a la randomización y codificación de las muestras de sedimentos fluviales, la randomización es asignar a cada punto un determinado código teniendo en cuenta que el correlativo del código esté distribuido de manera aleatoria. Dicho código está registrado en el formato denominado "Matriz de control de muestras de sedimento".

f) Los códigos sigue una estructura de codificación, incluye la hoja de la carta nacional, el año en que se desarrolló la prospección geoquímica y

un correlativo que indica la secuencia numérica referente a la cantidad de muestras diseñadas en cada cuadrángulo (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Estructura de codificación de las muestras de sedimentos fluviales, tomado del Atlas Geoquímico del Perú.

| Año | Estructura de codificación | Código/Hoja |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|
| 2008-2012 | Código de hoja- | 18i-SGQ08-285 (Hoja Pomabamba) |
| | SGQ año correlativo | 15h-SGQ11-073 (Hoja Bolívar) |

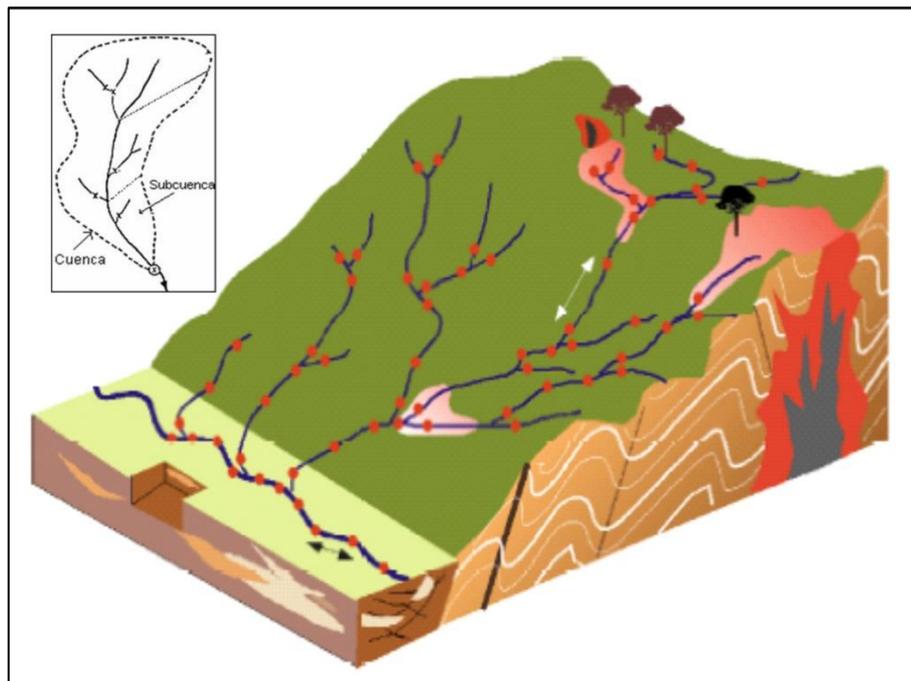


Figura 3.2. Diseño de muestreo sistemático estratificado.

3.3.2. Etapa de campo

Consiste en recolectar muestras de sedimentos fluviales y determinar los principales análisis químicos. A continuación, se describe el procedimiento

de muestreo aplicado en el campo, el cual comprende desde la identificación de la estación de muestreo hasta el acondicionamiento de las muestras para ser enviadas al laboratorio y posterior análisis.

a) Con ayuda del GPS, se identifica el punto de muestreo en el mapa de diseño, dicho punto es susceptible a sufrir una modificación según un criterio geológico.

b) Ubicar el lugar del muestreo (tomar lectura de las coordenadas indicadas por el equipo de posicionamiento global).

c) Anotar el código de la muestra, coordenadas UTM y geográficas; asimismo, datos relacionados a la ubicación según corresponda de acuerdo al formato DRME-F-130 (Ficha para el muestreo de sedimentos del Ingemmet).

d) Se deberá anotar en dicho formato:

- La información referida a la naturaleza, porcentaje, geometría, alteración y mineralización del material clástico presente en el cauce fluvial, además de definir la unidad de aporte del sedimento predominante.
- Las lecturas de los parámetros fisicoquímicos del agua superficial, tales como oxígeno disuelto (OD) en ppm, pH adimensional, conductividad eléctrica absoluta (CE), totales de sales disueltas (TDS).

e) En el reverso de la “Ficha para el muestreo de sedimentos” se reportará información referida a:

- La naturaleza de los afloramientos, alteración y mineralización de los mismos, estructuras, condiciones sanitarias, aspecto del agua superficial. También se realizan descripciones adicionales referidas al afloramiento, relieve, cobertura, óxidos, hidróxidos.
- Las fotografías tomadas en el lugar de muestreo y las muestras de roca (M. R).

f) Finalmente realizar un perfil de la estación de muestreo orientada y siempre con vista aguas arriba.

g) Graficar la ubicación de la muestra en el mapa.

h) Recolectar la muestra compuesta en el lugar predeterminado, considerando al menos tres ubicaciones (en un tramo de 100 metros) seleccionadas preferentemente en la parte central del cauce, donde no se evidencie contaminación de una u otra margen por parte del material aluvial, coluvial o eólico.

3.3.3. Etapa de manipulación y preparación de la muestra

Se inicia en la etapa de campo, desde el momento de la recolección de muestras de sedimentos fluviales hasta el envío al laboratorio químico, pasando por dos etapas en las cuales se realiza un tamizado con diferentes dimensiones de malla. En la etapa de campo se procede a tamizar la muestra en una malla N° 30 (0.59mm), posteriormente se vierte la muestra en una bolsa *micropore* para luego aislarla nuevamente en una bolsa de polietileno, a fin de evitar que la muestra se contamine al estar expuesta al medio ambiente.

Las muestras secas se vierten directamente a una bolsa de polietileno, para finalmente ser embalada y enviada a laboratorio. En el laboratorio, antes que la muestra sea analizada, esta pasa por un proceso de secado, tamizado a una malla N° 200 (0.074mm) y homogenizado de la muestra, con el propósito de que los resultados sean representativos y confiables (Cuadro 3.2) (Atlas geoquímico del Perú).

Los análisis químicos efectuados a los sedimentos fluviales son el Plasma Acoplado Inductivamente - Espectrometría de Masas (ICP-MS) con la finalidad de determinar los elementos mayores y traza.

Cuadro 3.2. Tamizado de sedimentos de corriente.

| N° de tamiz (mesh) | Dimensión de malla (mm) | Dimensión de malla micrómetros (μm) | Etapas de trabajo |
|--------------------|-------------------------|--|-------------------|
| 30 | 0.59 | 595 | Campo |
| 200 | 0.074 | 74 | Laboratorio |

3.3.4. Etapa de gabinete

En esta etapa la información recopilada en campo y de laboratorio es procesada utilizando el software SPSS 20.0 y Geosoft. Se realiza la caracterización estadística (se calculan los estadígrafos como media geométrica, mediana y moda) y geoquímica (se calculan los parámetros geoquímicos como *background* y *threshold*), asimismo, se realiza el análisis monoelemental (Coeficiente de correlación de Pearson) y multielemental (Análisis de Componentes Principales) para la determinación de asociaciones geoquímicas.

Los resultados son presentados mediante gráficos estadísticos y mapas temáticos de distribución geoquímica monoelemental y multielemental elaborados en Arcgis 10.3.

3.4. Población y Muestra

La investigación se enfatizó en la intercuenca Alto Marañón IV entre las localidades de Bambamarca y Pisúquia, abarca 3 100 km², en las que se han definido 10 dominios litoestratigráficos. Se han recolectado 261 muestras de sedimentos fluviales y se realizó la caracterización geoquímica univariar, bivariar y multivariar.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se detalla cómo obtener las muestras de sedimento.

- Antes de recolectar la muestra se debe de limpiar la capa superficial (3 cm) usando instrumentos de polietileno, para evitar contaminaciones superficiales y la recolección de sedimentos con altas concentraciones de óxidos de Fe y Mn.
- Se debe de usar guantes de goma resistente para proteger sus manos y prevenir cualquier tipo de contaminación. Además, no debe de portar objeto alguno que pueda contaminar el sedimento.
- Lavar los materiales a utilizar empleando una escobilla de goma. Para el caso de quebradas secas, limpiar el material con la arena del mismo lugar de muestreo.

- Colocar agua en la batea hasta que alcance el nivel $\frac{3}{4}$, recoger el sedimento y echarlo sobre el tamiz N° 30, el cual será ingresado a la batea de manera tal que el agua cubra $\frac{3}{4}$ partes del tamiz. Para el caso de quebradas secas, el tamizado se hará en seco.
- Tamizar el sedimento hasta obtener 5 Kg de muestra húmeda o 3 kg de muestra seca. Para acelerar el proceso de decantación de sedimentos, aplicar la solución floculante (20ml). Dejar reposar al menos 10 minutos, luego se deshecha el agua remanente.
- Colocar el código de la muestra en la bolsa correspondiente, utilizando para ello plumón indeleble.
- Introducir el sedimento en la bolsa adecuada (si es húmedo, utilizar bolsa micropore y si fuera seco, utilizar bolsa de polietileno) y luego sellar la bolsa.
- Completar el llenado de la ficha de muestreo, utilizando abreviaturas de rocas y minerales (DRME-ET-001).
- En los lugares donde se ha determinado recolectar muestras duplicadas, proceder a tomar la muestra siguiendo el mismo procedimiento considerado para la toma de muestra original, consignando el código de la muestra duplicada, en el recuadro correspondiente (“Duplicado”) de la ficha de muestreo original.
- Las muestras de control (blanco y estándar) serán insertadas en cada lote de muestras y serán empacadas y etiquetadas de la misma forma que las muestras de campo.

- Durante su traslado a la base, colocar la muestra en una batea a fin de que vaya expulsando el agua remanente.
- Una vez en la base, acondicionar las muestras en costales dentro de un lugar seguro y libre de contaminación, registrando la información en la matriz de control, hasta su traslado o envío al laboratorio químico.

3.6. Técnicas de análisis de muestras

Las muestras recolectadas requieren de un procesamiento y análisis; para ello, es importante conocer los procedimientos de la preparación de las muestras y de los análisis químicos (tipo de digestión, límites de detección y limitaciones técnicas).

3.6.1. Ataque químico

Digestión con agua regia

Consiste en el tratamiento de una muestra de sedimento fluvial con una mezcla de ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO₂) (agua regia) en una proporción de 3:1, con el objetivo de romper todos los enlaces que existe entre los átomos de la muestra, es decir diluirla (Chang & College, 2002).

El ácido hidroc্লórico es el único ácido que disuelve silicatos formando complejos de silicio en solución ácida. El ácido nítrico destruye la energía orgánica y las sustancias con óxidos de sulfuros; es favorable para el

método de ICP-MS, los elementos que los constituye (H, N, O) están presentes en el aire que entra en el plasma.

3.6.2. Métodos analíticos

a) Plasma Acoplado Inductivamente – Espectrometría de Masas (ICP-MS)

Es una variante de las técnicas de análisis por espectrometría de masa. Las ventajas principales de esta técnica es la alta precisión, bajos límites de detección y bajo costo; analiza la mayoría de los elementos e isótopos presentes en la tabla periódica de manera simultánea en poco tiempo.

La técnica de ICP-MS combina dos propiedades analíticas que la convierten en un potente instrumento en el campo del análisis de elementos trazas multielemental (ppb-ppm). Por una parte, obtiene una matriz libre de interferencias debido a la eficiencia de ionización del plasma de argón y por otra parte presenta una alta relación señal-ruido, característica en las técnicas de espectrometría de masas.

El plasma de acoplamiento inductivo de argón es usado como una fuente muy eficaz de iones en su estado M^+ . El espectro de masas de esta fuente de iones, es medido por medio de un espectrómetro de masas cuadrupolar, esto es posible mediante una zona de interface capaz de introducir los iones del plasma, a través de un orificio (cono) por medio de

una unidad de vacío diferencial y posteriormente dentro del filtro cuadrupolar de masa.

b) Ensayo al fuego (FA)

Es el proceso estándar para obtener concentraciones de elementos del grupo del platino y oro (PGE) a partir de menas de grado alto. El ensayo al fuego con captura de plomo constituye el método definitivo para el análisis de oro. El platino y el paladio también pueden determinarse mediante este método, aunque el conjunto completo de seis elementos del grupo del platino se determina mejor mediante el ensayo al fuego con captura de sulfuro de níquel (Atlas geoquímico del Perú, 2017).

En esta investigación se usó una masa de 50g de sedimento por cada muestra. El sedimento fue secado y tamizado a malla N° 200, se pesa y se combina con el fundente, luego se añade el plomo como colector.

Posteriormente, la muestra se calienta en un horno a 1000°C, después de 20 minutos, la muestra se ha fundido y el oro con el plomo se han separado de la escoria de silicato, para formar un “botón” en el fondo del crisol (Atlas geoquímico del Perú, 2017). Posteriormente el oro se extrae mediante un proceso conocido como copelación, la cual consiste en la sublimación selectiva del plomo.

3.6.3. Límites de detección

Se define habitualmente como la cantidad o concentración mínima de sustancia que puede ser detectada con fiabilidad por un método analítico determinado (Boqué, 2000). En el Cuadro 4.3 se muestra los rangos de límites de detección para los 52 elementos analizados.

Cuadro 3.3. Límites de detección de los elementos químicos.

| Elemento | L.D | Elemento | L.D |
|----------|------------------|----------|-----------------|
| Ag* | 0.01 - 10 ppm | Mo* | 0.05 ppm - 1% |
| Al | 0.01 - 15% | Na | 0.01 - 15% |
| As* | 1 ppm - 1% | Ni* | 0.5 ppm - 1% |
| B | 10 ppm - 1% | Nb | 0.05 ppm - 0.1% |
| Ba | 5 ppm - 1% | P | 50 ppm - 1% |
| Be | 0.1 ppm - 0.01% | Pb* | 0.2 ppm - 1% |
| Bi | 0.02 ppm - 1% | Rb | 0.2 ppm - 1% |
| Ca | 0.01 - 15% | S | 0.01 - 5% |
| Cd* | 0.01 ppm - 1% | Sb* | 0.05 ppm - 1% |
| Ce* | 0.05 ppm - 0.1% | Sc* | 0.1 ppm - 1% |
| Cs | 0.05 ppm - 1% | Se | 1 ppm - 0.1% |
| Cr* | 1 ppm - 1% | Sn | 0.3 ppm - 0.1% |
| Co* | 0.1 ppm - 1% | Sr | 0.5 ppm - 1% |
| Cu* | 0.5 ppm - 1% | Ta | 0.5 ppm - 1% |
| Fe | 0.01 - 15% | Tb* | 0.05 ppm - 1% |
| Ga* | 0.1 ppm - 1% | Te | 0.02 ppm - 1% |
| Ge | 0.1 ppm - 1% | Th* | 0.05 ppm - 0.1% |
| Hg | 0.01 ppm - 1% | Ti | 0.01 - 15% |
| Hf | 0.05 ppm - 0.05% | Tl | 0.02 ppm - 1% |
| In | 0.02 ppm - 0.05% | U* | 0.05 ppm - 1% |
| K | 0.01 - 15% | V* | 1 ppm - 1% |
| La* | 0.1 ppm - 1% | W | 0.1 ppm - 1% |
| Li | 1 ppm - 5% | Y* | 0.05 ppm - 0.1% |
| Lu* | 0.01 ppm - 0.1% | Yb* | 0.1 ppm - 0.01% |
| Mg | 0.01 - 15% | Zn* | 1 ppm - 1% |
| Mn | 5 ppm - 1% | Zr | 0.5 ppm - 1% |

* Elementos considerados

3.7. Procesamiento de datos

Los datos de laboratorio fueron validados antes de realizar el procesamiento estadístico y geoquímico, para su caracterización se empleó los *softwares* SPSS 20.0, Geosoft, Excel 2016; la representación de esta información se hizo a través de gráficos de dispersión y de frecuencias, mapas geoquímicos de puntos o mapas isovalóricos a escala de trabajo con ayuda del software Arcgis 10.3.

El análisis e interpretación de las anomalías geoquímicas se describieron en un contexto geológico en relación a áreas de enriquecimiento mineral, fuentes de contaminación, topografía, drenaje, relieve y la distribución monoelemental y multielemental de las áreas anómalas. Asimismo, se destaca el contraste geoquímico con los valores de fondo y su relación con otras anomalías.

Los parámetros estadísticos mencionados son: el número de datos, valor mínimo, valor máximo, los rangos de abundancia, desviación estándar, umbral geoquímico (media geométrica + dos veces la desviación estándar) y valor de fondo; además la configuración metalogenética y estructural cuando sea relevante para la interpretación.

En algunos dominios litoestratigráficos, se realizó una caracterización no paramétrica, para lo cual se empleó las frecuencias acumuladas de 95% para calcular el umbral geoquímico.

3.7.1 Parámetros Fisicoquímicos

En esta sección se describe e interpreta las lecturas tomadas in situ de los parámetros como pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (TDS) del agua de escorrentía, empleando para ello el equipo multiparámetro portátil de marca HANNA y modelo HI-9828.

Se recomienda describir las variaciones de estos parámetros por sub cuencas hidrográficas relacionando principalmente la configuración geológica, ocurrencias de minerales, componentes antrópicos, geomorfológicos, fisiográficos y de ubicación espacial; los cuales influyen en el aporte del contenido metálico ya sea en suspensión y/o solución.

3.7.2 Control y calidad de datos

La calidad de los datos se expresa en términos de precisión y exactitud; para asegurar y controlar la calidad de muestreo y el análisis químico de los sedimentos fluviales, se insertan muestras de control, las cuales permiten evaluar parámetros de precisión, exactitud y contaminación, tal como se menciona a continuación (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.4. Muestras de control.

| Muestras de control | Parámetro | Etapas de trabajo |
|---------------------|---------------|-------------------|
| Duplicadas | Precisión | Campo |
| Estándares | Exactitud | Laboratorio |
| Blancas | Contaminación | |

Precisión

Es la habilidad que posee un método analítico para obtener valores idénticos o repetidos a partir de una muestra “original”, para controlar la precisión de los análisis se recolectaron en campo muestras duplicadas.

La precisión mide la dispersión de una medición y puede expresarse bajo la forma de una desviación estándar (o de una varianza). Una baja

precisión implica incertidumbre y reduce la confianza que uno tiene en una medición.

Es necesario considerar que la desviación estándar relativa sea menor al 20%; asimismo, se calcula el promedio entre el valor de la muestra y la muestra duplicada, para luego sumar y/o restar su 20%, de esta forma se obtiene los máximos y mínimos permisibles, dentro de los cuales debe estar el valor promedio calculado, verificando la repetitividad y validez de los resultados (Figura 3.3).

En la práctica se evalúa el grado de imprecisión a través de la desviación estándar o coeficiente de variación, que describen la dispersión entre las mediciones.

$$C.V = \frac{s}{\bar{x}} \quad \text{ó} \quad C.V = \frac{s}{\bar{x}} * 100$$

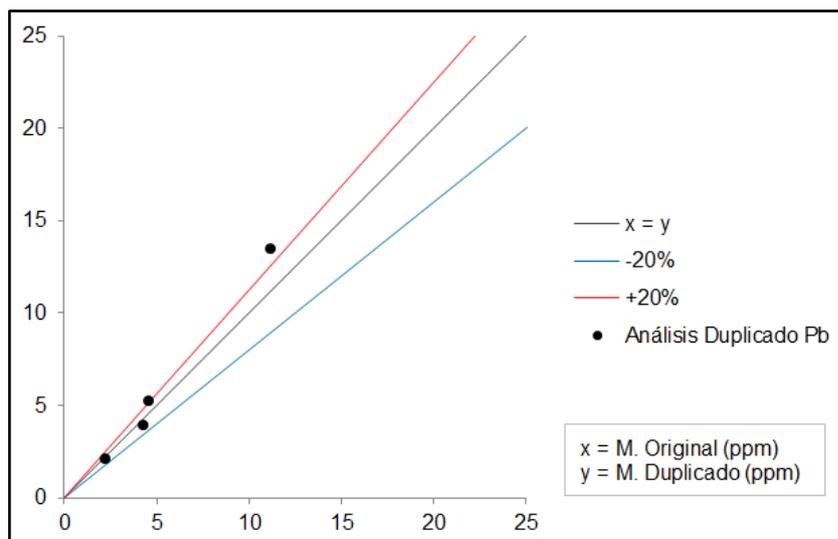


Figura 3.3. Análisis de control de Pb en muestras duplicadas.

Exactitud

La exactitud mide la desviación de la medición con respecto al resultado correcto. Mediciones inexactas implican la existencia de sesgos (errores sistemáticos), debidos a errores instrumentales, muestreos no representativos y equivocaciones. En muestras geológicas nunca es conocida la verdadera concentración solo un valor aceptable más unos límites de error que acompañan nuestra estimación.

La exactitud de nuestros métodos analíticos, es monitoreada por la inserción de estándares o patrones, los cuales fueron colocados en los lotes de muestras a ser analizadas. Estos estándares son adquiridos de laboratorios calificados, el cual monitorea la aceptabilidad para este parámetro (Figura 3.4).

Para calcular los límites máximos y mínimos permisibles, es necesario sumarle y restarle dos veces la desviación estándar al valor promedio (valores calculados en laboratorio según muestra patrón), a partir de estos límites podemos aceptar nuestros resultados analíticos.

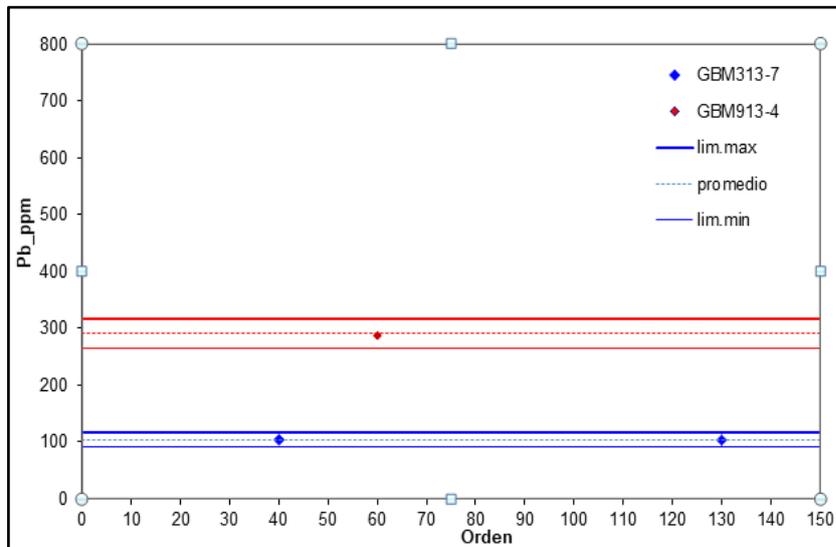


Figura 3.4. Análisis de control de Pb en muestras estándares.

Contaminación

La contaminación es la alteración de la pureza o grado de limpieza de una determinada muestra por contacto o por mezcla. La forma de monitorear es mediante el uso de blancos (materiales totalmente estériles que permitan ver la limpieza del proceso), los que permiten controlar la presencia de contaminación durante la etapa de muestreo, manipulación y análisis químico de las muestras (Figura 3.5).

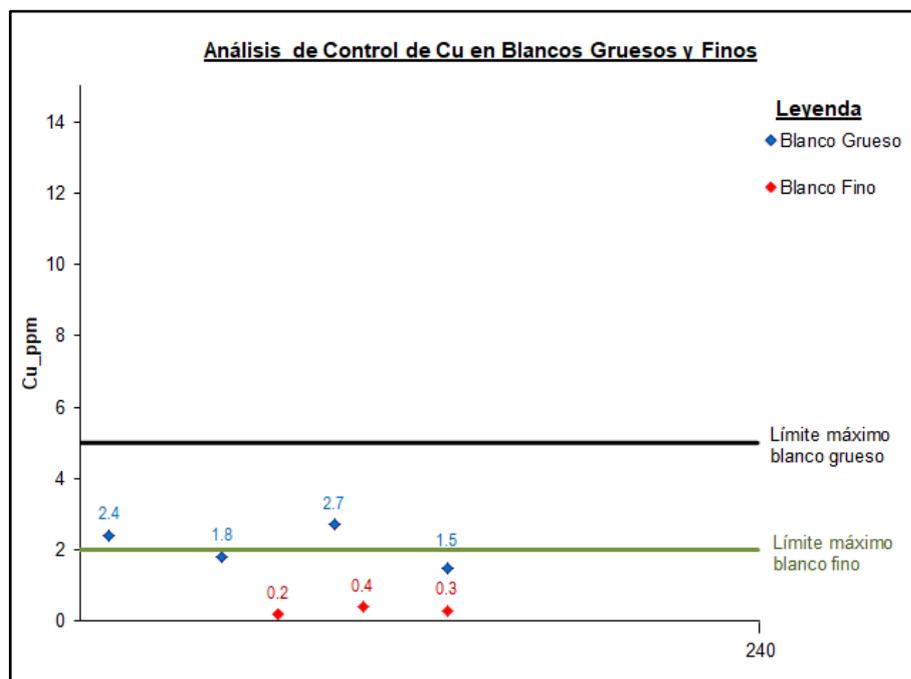


Figura 3.5. Análisis de control de Cu en blancos gruesos y finos.

3.8. Análisis de datos

La información obtenida de las muestras de sedimentos fluviales recolectados durante las campañas de campo, permitió obtener una data robusta. Después del análisis exploratorio de los diferentes dominios litoestratigráficos, determinados según la abundancia de la fracción granulométrica fina (malla N° 30 o 0.75 μm), ha permitido caracterizar estadísticamente las variables geoquímicas de interés. Estas variables son Au, Ag, Pb, Zn y Cu y principales tierras raras.

Las variables estudiadas corresponden a las abundancias geoquímicas de elementos traza presentes en los sedimentos fluviales, dichas variables tienen una relación directa con la fuente de aporte de los sedimentos. Es así que su comportamiento estadístico está en función de

su distribución espacial de los afloramientos rocosos, sin dejar de mencionar el carácter geoquímico de cada elemento y sus patrones de dispersión geoquímica.

Para que el análisis sea relevante es necesario tener datos homogéneos, para tal efecto la data se ha separado en poblaciones estadísticas.

3.8.1 Separación en poblaciones estadísticas

El área de estudio está conformada por una amplia secuencia de unidades geológicas que varían en edad, dichas unidades son agrupadas en dominios geológicos regionales, los cuales tienen en común el carácter litológico y temporal, cada ambiente es considerado como población estadística para efectos del procesamiento estadístico.

En cada estación de muestreo se determinó la unidad de aporte o fuente de procedencia de los sedimentos fluviales, en el caso de que el sedimento provenga de una o más unidades litológicas, se le asignó la litología de los sedimentos fluviales de mayor abundancia en el lugar de muestreo (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Dominios litoestratigráficos de la intercuenca Alto Marañón IV entre Bambamarca y Pisúquia.

| N° | DOMINIOS LITOESTRATIGRÁFICOS | ABREV | N° muestras |
|-------|---|-------|-------------|
| 1 | Depósitos cuaternarios | DQ | 0 |
| 2 | Sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo superior - Paleógeno | SSKsP | 4 |
| 3 | Sedimentarios carbonatados del Cretáceo | SCK | 1 |
| 4 | Sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo | SSK | 30 |
| 5 | Sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico | SCTJ | 26 |
| 6 | Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior | SSPs | 45 |
| 7 | Volcánicos del Paleozoico superior | VPS | 23 |
| 8 | Sedimentarios y metasedimentarios silicoclásticos del Paleozoico inferior | SMSPi | 2 |
| 9 | Metamórficos del Proterozoico | MP | 52 |
| 10 | Intrusivos del Paleozoico | IP | 78 |
| TOTAL | | | 261 |

3.9. Tratamiento estadístico de datos

El tratamiento estadístico se realizó con los datos de cada dominio litoestratigráfico conformada por las muestras que fueron definidas según la unidad de aporte (Cuadro 3.5). La población está conformada de 10 dominios litoestratigráficos, según la predominancia litológica de la fracción granulométrica retenida en la malla 30 (0.75 μ m).

Con los histogramas de frecuencias absolutas y los gráficos tipo boxplot se evaluó el carácter de las distribuciones de los diferentes elementos, sin dejar de examinar los valores por debajo del límite de detección, valores

atípicos y/o atípicos extremos, los cuales son retirados del tratamiento estadístico.

Después de comprobar la normalidad, se calcula los parámetros geoquímicos (*background* y *threshold*); en la presente investigación, de acuerdo a la cantidad de datos por dominio litoestratigráfico y al nivel de confianza, dichos parámetros fueron determinados de tres maneras diferentes, descritas en el Capítulo II (Cuadro 3.6).

Para evaluar las relaciones estadísticas entre variables, se calcularon los coeficientes de correlación a escala logarítmica. Se ha considerado como correlación muy fuerte a los valores superiores a 0.85, fuerte a valores entre 0.84-0.71, moderado 0.70-0.55, débil 0.54-0.40, muy débil 0.39-0.20 y nulos menores a 0.20.

Se determinó asociaciones geoquímicas aplicando la técnica analítica multielemental Análisis de Componentes Principales (ACP). Es importante mencionar que se realizó dicho análisis a una escala logarítmica, puesto que la mayoría de las variables estudiadas presentan un comportamiento Lognormal.

Cuadro 3.6. Valores umbrales y background de los elementos trazas y tierras raras.

| N° | Población Estadística | Unidades Geológicas | N° de muestras | Tratamiento | N° Anomalías | Au | | Ag | | Cu | | Pb | | Zn | | Mo | | As | | Sb | | Co | | Ni | | Cr | | Mn | | Ba | | P | | Sr | | | | | |
|----|--|---|----------------|------------------------------|--------------|-------|--|-----------|------|----------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|---|---|---|---|
| | | | | | | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B |
| | | | | | | 2 | Sedimentarios silicoclástico del Cretáceo superior Paleógeno (SSKsP) | Fm. Chota | 4 | No paramétrico | 0 | 12.9 | - | 0.071 | - | 18.8 | - | 24.82 | - | 125 | - | 2.18 | - | 8.44 | - | - | - | 12.22 | - | 22.3 | - | 27 | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | Sedimentarios carbonatados del Cretáceo (SCK) | Fm. Chólec | 1 | No paramétrico | 1 | 17.1 | - | 0.117 | - | 26.8 | - | 21.65 | - | 105 | - | 2.22 | - | 17.84 | - | - | - | 16.64 | - | 22.5 | - | 21 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4 | Sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (SSK) | Grupo Goyllarisquizga | 30 | No paramétrico | 18 | 65.30 | 7.81 | 0.10 | 0.04 | 31.32 | 19.10 | 39.32 | 20.07 | 186.50 | 72.50 | 3.59 | 1.27 | 42.20 | 16.12 | 2.99 | 0.99 | 15.66 | 8.80 | 27.33 | 18.58 | 39.55 | 17.29 | 959.65 | 194.48 | 452.90 | 217.89 | 1895.80 | 737.84 | 239.64 | 51.69 | | | | |
| 5 | Sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (SCTJ) | Fm. Aramachay, Fm. Chamberá | 26 | No paramétrico | 15 | 24.95 | 4.67 | 0.07 | 0.03 | 24.37 | 15.11 | 68.03 | 19.20 | 619.45 | 209.72 | 31.76 | 3.72 | 28.90 | 13.84 | 7.03 | 2.15 | 9.39 | 5.92 | 70.86 | 32.99 | 36.85 | 20.75 | 1628.25 | 543.63 | 1013.10 | 246.76 | 5909.35 | 2290.78 | 407.79 | 149.79 | | | | |
| 6 | Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (SSPs) | Grupo Mtu | 45 | Paramétrico y no paramétrico | 27 | 26.34 | 3.50 | 0.17 | 0.04 | 73.50 | 18.21 | 40.24 | 16.12 | 148.00 | 63.63 | 3.73 | 1.02 | 35.58 | 13.47 | 6.08 | 1.27 | 20.77 | 9.53 | 41.80 | 18.10 | 64.00 | 21.54 | 1296.47 | 656.77 | 935.77 | 276.30 | 1283.70 | 728.44 | 174.57 | 24.81 | | | | |
| 7 | Volcánicos del Paleozoico superior (VPs) | Fm. Lavasén | 23 | No paramétrico | 19 | 76.30 | 8.88 | 0.18 | 0.05 | 154.74 | 28.37 | 59.19 | 25.02 | 156.90 | 81.16 | 3.09 | 1.23 | 43.70 | 15.77 | 1.77 | 0.81 | 27.03 | 11.00 | 45.77 | 15.57 | 69.00 | 21.25 | 1839.40 | 975.33 | 688.10 | 288.65 | 1184.30 | 779.24 | 42.36 | 18.11 | | | | |
| 8 | Sedimentarios y metamórficos del Paleozoico inferior (SMPi) | Fm. Contaya | 2 | No paramétrico | 2 | 26.34 | 3.50 | 0.17 | 0.04 | 73.50 | 18.21 | 40.24 | 16.12 | 148.00 | 63.63 | 3.73 | 1.02 | 35.58 | 13.47 | 6.08 | 1.27 | 20.77 | 9.53 | 41.80 | 18.10 | 64.00 | 21.54 | 1296.47 | 656.77 | 935.77 | 276.30 | 1283.70 | 728.44 | 174.57 | 24.81 | | | | |
| 9 | Metamórficos del Proterozoico (MP) | Complejo Maraón | 52 | Paramétrico | 24 | 50.27 | 7.11 | 0.15 | 0.06 | 111.90 | 43.71 | 103.75 | 22.81 | 350.95 | 109.68 | 5.12 | 1.19 | 81.23 | 11.96 | 4.88 | 1.12 | 30.06 | 16.08 | 69.00 | 30.08 | 146.45 | 34.09 | 1449.58 | 715.42 | 556.15 | 221.95 | 2033.15 | 1031.63 | 121.96 | 23.78 | | | | |
| 10 | Intrusivos del Paleozoico (IP) | Granito y granodiorita del Pérmico, tonalita, granodiorita y monzogranito del Carbonífero | 78 | Paramétrico y no paramétrico | 42 | 69.52 | 13.69 | 0.18 | 0.03 | 61.95 | 21.34 | 77.16 | 19.52 | 167.43 | 70.76 | 3.51 | 1.13 | 65.11 | 14.07 | 3.81 | 0.70 | 25.30 | 9.43 | 35.49 | 15.19 | 99.76 | 23.23 | 1434.81 | 735.49 | 964.56 | 263.98 | 2562.71 | 1030.71 | 73.97 | 26.09 | | | | |

| N° | Población Estadística | Unidades Geológicas | N° de muestras | Tratamiento | N° Anomalías | V | | La | | Ce | | Tb | | Sc | | Y | | Nb | | Ga | | Th | | U | | Cs | | Rb | | Lu | | Yb | | | | | |
|----|--|---|----------------|------------------------------|--------------|--------|--|-----------|-------|----------------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|---|---|---|---|
| | | | | | | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B | T | B |
| | | | | | | 2 | Sedimentarios silicoclástico del Cretáceo superior Paleógeno (SSKsP) | Fm. Chota | 4 | No paramétrico | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | Sedimentarios carbonatados del Cretáceo (SCK) | Fm. Chólec | 1 | No paramétrico | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4 | Sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (SSK) | Grupo Goyllarisquizga | 30 | No paramétrico | 18 | 69.10 | 35.39 | 21.27 | 11.11 | 48.73 | 26.42 | 0.67 | 0.39 | 5.92 | 3.36 | 18.40 | 10.29 | 0.86 | 0.28 | 5.06 | 2.67 | 9.23 | 5.37 | 2.23 | 1.02 | 6.34 | 2.43 | 19.56 | 9.50 | 0.17 | 0.10 | 1.20 | 0.72 | | | | |
| 5 | Sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (SCTJ) | Fm. Aramachay, Fm. Chamberá | 26 | No paramétrico | 15 | 158.90 | 64.24 | 19.68 | 11.48 | 45.53 | 21.07 | 0.61 | 0.44 | 5.58 | 3.45 | 34.98 | 19.44 | 0.63 | 0.14 | 5.33 | 2.17 | 8.22 | 3.09 | 4.67 | 2.49 | 4.05 | 1.59 | 11.65 | 7.15 | 0.29 | 0.17 | 2.10 | 1.26 | | | | |
| 6 | Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (SSPs) | Grupo Mtu | 45 | Paramétrico y no paramétrico | 27 | 108.22 | 44.63 | 33.52 | 15.32 | 77.19 | 36.42 | 0.76 | 0.45 | 8.20 | 3.67 | 18.28 | 10.82 | 1.01 | 0.32 | 9.09 | 3.33 | 10.39 | 4.08 | 2.04 | 0.92 | 4.39 | 2.08 | 18.36 | 10.19 | 0.17 | 0.10 | 1.26 | 0.75 | | | | |
| 7 | Volcánicos del Paleozoico superior (VPs) | Fm. Lavasén | 23 | No paramétrico | 19 | 169.60 | 56.89 | 36.06 | 18.95 | 92.33 | 46.25 | 1.02 | 0.58 | 9.74 | 4.77 | 22.48 | 14.62 | 1.26 | 0.49 | 9.80 | 6.07 | 8.93 | 4.14 | 3.74 | 1.31 | 5.58 | 2.23 | 16.90 | 11.78 | 0.17 | 0.12 | 1.39 | 0.94 | | | | |
| 8 | Sedimentarios y metamórficos del Paleozoico inferior (SMPi) | Fm. Contaya | 2 | No paramétrico | 2 | 108.22 | 44.63 | 33.52 | 15.32 | 77.19 | 36.42 | 0.76 | 0.45 | 8.20 | 3.67 | 18.28 | 10.82 | 1.01 | 0.32 | 9.09 | 3.33 | 10.39 | 4.08 | 2.04 | 0.92 | 4.39 | 2.08 | 18.36 | 10.19 | 0.17 | 0.10 | 1.26 | 0.75 | | | | |
| 9 | Metamórficos del Proterozoico (MP) | Complejo Maraón | 52 | Paramétrico | 24 | 105.36 | 60.89 | 60.90 | 21.33 | 138.22 | 49.68 | 1.42 | 0.64 | 14.97 | 5.95 | 31.08 | 14.99 | 2.42 | 0.58 | 10.44 | 5.64 | 21.78 | 9.01 | 3.76 | 1.60 | 6.30 | 2.51 | 58.10 | 18.19 | 0.38 | 0.17 | 2.73 | 1.23 | | | | |
| 10 | Intrusivos del Paleozoico (IP) | Granito y granodiorita del Pérmico, tonalita, granodiorita y monzogranito del Carbonífero | 78 | Paramétrico y no paramétrico | 42 | 112.74 | 56.09 | 43.45 | 23.62 | 100.31 | 60.28 | 1.23 | 0.66 | 9.30 | 5.01 | 35.08 | 18.19 | 3.53 | 0.67 | 12.49 | 5.30 | 30.27 | 10.70 | 10.14 | 2.09 | 4.17 | 2.16 | 25.05 | 11.76 | 0.47 | 0.19 | 3.36 | 1.40 | | | | |

- 1) Comparación de datos a partir de una bibliografía y/o con los resultados de una exploración de orientación.
- 2) Cálculo del umbral a partir de la media más dos o tres veces la desviaciones estándar.
- 3) Cálculo gráfico (frecuencia acumulativa sobre papel logarítmico, método de Lepeltier).

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de Resultados

4.1.1. Parámetros fisicoquímicos

Los principales parámetros fisicoquímicos del agua de escorrentía (pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (TDS) y temperatura) fueron tomados in situ en cada estación de muestro, para esto se emplearon equipos multiparámetro portátiles (HANNA, modelo HI-9828).

El potencial de hidrógeno (pH) determina la acidez o alcalinidad del agua de escorrentía, por lo que su variación puede relacionarse a la configuración geológica y/o la presencia de minerales que pueden incrementar el contenido metálico transportado en el agua (bajo solución y/o suspensión), generando variaciones fisicoquímicas en el agua.

En determinadas zonas donde existe mineralización, el pH del agua de escorrentía muestra sus valores más bajos, mientras que en los dominios de rocas carbonatadas y silicoclásticas, el pH denota un comportamiento alcalino.

Con el propósito de explicar de manera detallada la variación de los parámetros fisicoquímicos, es conveniente discutir los resultados por

unidad hidrográfica definida en el acápite de hidrografía del área de estudio.

a) pH y conductividad eléctrica (CE) en la microcuenca de la quebrada Gramalote

La subcuenca Quebrada Gramalote, está constituido por el río Pisúquia y por el río Quebrada Gramalote, en ambas microcuencas el potencial de hidrógeno (pH) de las aguas de escorrentía denota un carácter alcalino, con lecturas que van de 7.7 a 9.85.

En todas las estaciones los valores de conductividad eléctrica (CE) son menores a 500 $\mu\text{S/cm}$; excepto en la estación 14g-184 ubicada en la quebrada Corralhuayco, cuyo valor registrado es de 530 $\mu\text{S/cm}$. Asimismo, en el río Marañón en la localidad de Mendan (14g-189), la conductividad eléctrica es de 774 $\mu\text{S/cm}$.

b) pH y conductividad eléctrica (CE) en la microcuenca del río Púsac

La subcuenca del río Púsac, está conformado por las microcuencas de los ríos Púsac, Jahuay, Illabamba y Balsapampa. En esta subcuenca se tiene 105 registros de los parámetros fisicoquímicos, de los cuales cinco estaciones denotan un comportamiento ácido de sus aguas superficiales.

Los valores bajos de pH, se registraron en la quebrada Saumate en las estaciones 14h-024 y 14h-029a, donde los potenciales de hidrógeno son: 4.45 y 5.42 respectivamente, estos valores definen un contexto ácido, asociados a valores altos de conductividad eléctrica (2061 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1539 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente). Estos valores se encuentran asociados a la dispersión geoquímica de sedimentos fluviales provenientes de unidades intrusivas (Figura 4.1) y sedimentos silicoclásticos provenientes del Grupo Goyllarisquizga.

Otro valor que define un ambiente ácido se registró en el río Marañón, en la estación 14g-136, el potencial de hidrógeno es de 6.05 y su conductividad eléctrica es de 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Figura 4.1. Dispersión geoquímica de sedimentos fluviales provenientes de unidades intrusivas del Paleozoico en un ambiente ácido ($\text{pH}=4.45$) y $\text{CE}=2061$, quebrada Saumate.

En la microcuenca del río Balsapampa en la estación 14h-049 ubicada en la quebrada Balsapampa el potencial de hidrógeno es de 6.97, el cual define un ambiente ligeramente ácido y el valor de la conductividad eléctrica asciende a 215 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en esta estación se dispersan sedimentos fluviales provenientes de gnises del Complejo Marañón.

En la quebrada Achupa de la microcuenca Illabamba (14h-033), el potencial de hidrógeno define un ambiente ácido ($\text{pH}=6.61$), en esta estación se dispersan sedimentos fluviales procedentes de las lavas andesíticas moderadamente oxidadas de la formación Lavasen, asociados a una conductividad eléctrica de 112 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4.2).

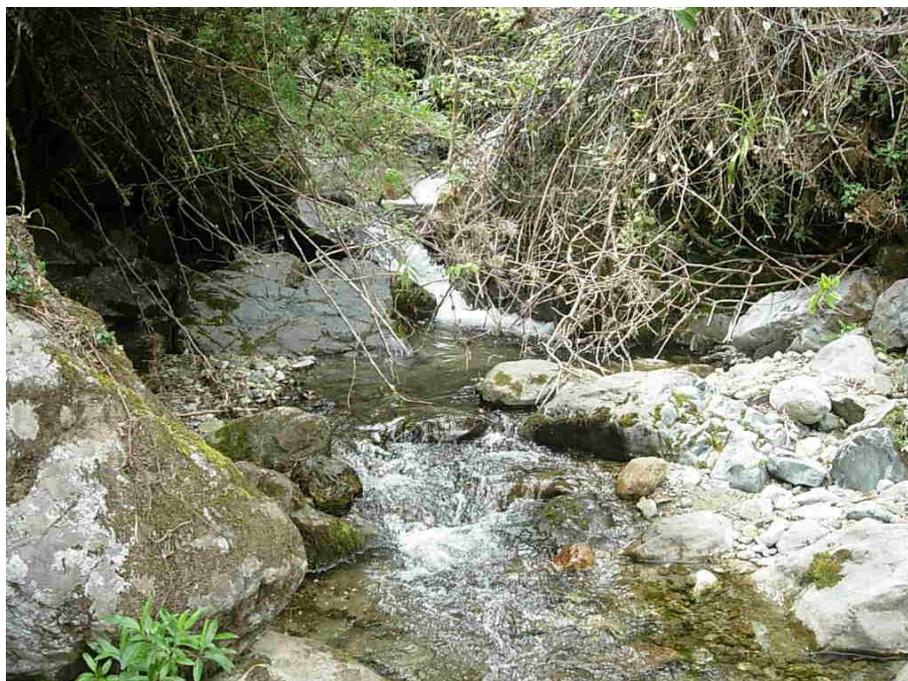


Figura 4.2. Dispersión geoquímica de sedimentos fluviales procedentes de lavas andesíticas de la formación Lavasen en un ambiente ligeramente oxidado ($\text{pH}=6.61$ y $\text{CE}=112 \mu\text{S}/\text{cm}$), vista al NO en la quebrada Achupa.

Por otro lado, se registraron 07 estaciones donde los valores de pH son mayores a 9 y la conductividad eléctrica es menor de 342 $\mu\text{S}/\text{cm}$, estas estaciones se ubican en las microcuencas de los ríos Púsac y Quebrada Honda.

Las aguas superficiales de la microcuenca del río Púsac se caracteriza por tener un comportamiento alcalino. Registrándose 06 valores cuyo potencial de hidrogeno es mayor de 9. Como se definió en las quebradas Cochabamba, Chacahuayco, Chambul y en los ríos Chivane y Púsac.

En la quebrada Cochabamba (14h-002) el pH es igual a 9.06, en esta estación se dispersan sedimentos fluviales procedentes de lavas andesíticas de la Formación Lavasen. Es importante mencionar que a 2km al noroeste se ubica el prospecto Urcochocha (Au).

En las estaciones 14h-008a y 14h-006 ubicadas en la quebrada Chambul el potencial de hidrógeno es de 9.35 y 9.56 respectivamente, en estas estaciones se dispersan sedimentos silicoclásticos del Paleozoico superior.

En los ríos Chivane (14h-017), Chacahuayco (14h-002a) y Púsac (14h-018) también se tienen valores altos de pH (9.47, 9.17 y 9.72

respectivamente), asociados a la dispersión de sedimentos fluviales procedentes de areniscas del Grupo Goyllarisquizga.

En la quebrada Mendalón (14h-056a) la conductividad eléctrica es de 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, asociado a un ambiente alcalino; en esta estación se dispersan sedimentos fluviales procedentes de unidades intrusivas (monzogranito) del Paleozoico.

c) pH y conductividad eléctrica (CE) en la microcuenca del río Chon Chon

Según la caracterización hidrográfica esta subcuenca está conformada por los ríos Chocta, Chon Chon, Pana, Sute y Del Huayo. Los registros de pH que denotan un comportamiento ácido se tiene en las quebradas Lirio, Del Huayo y San José.

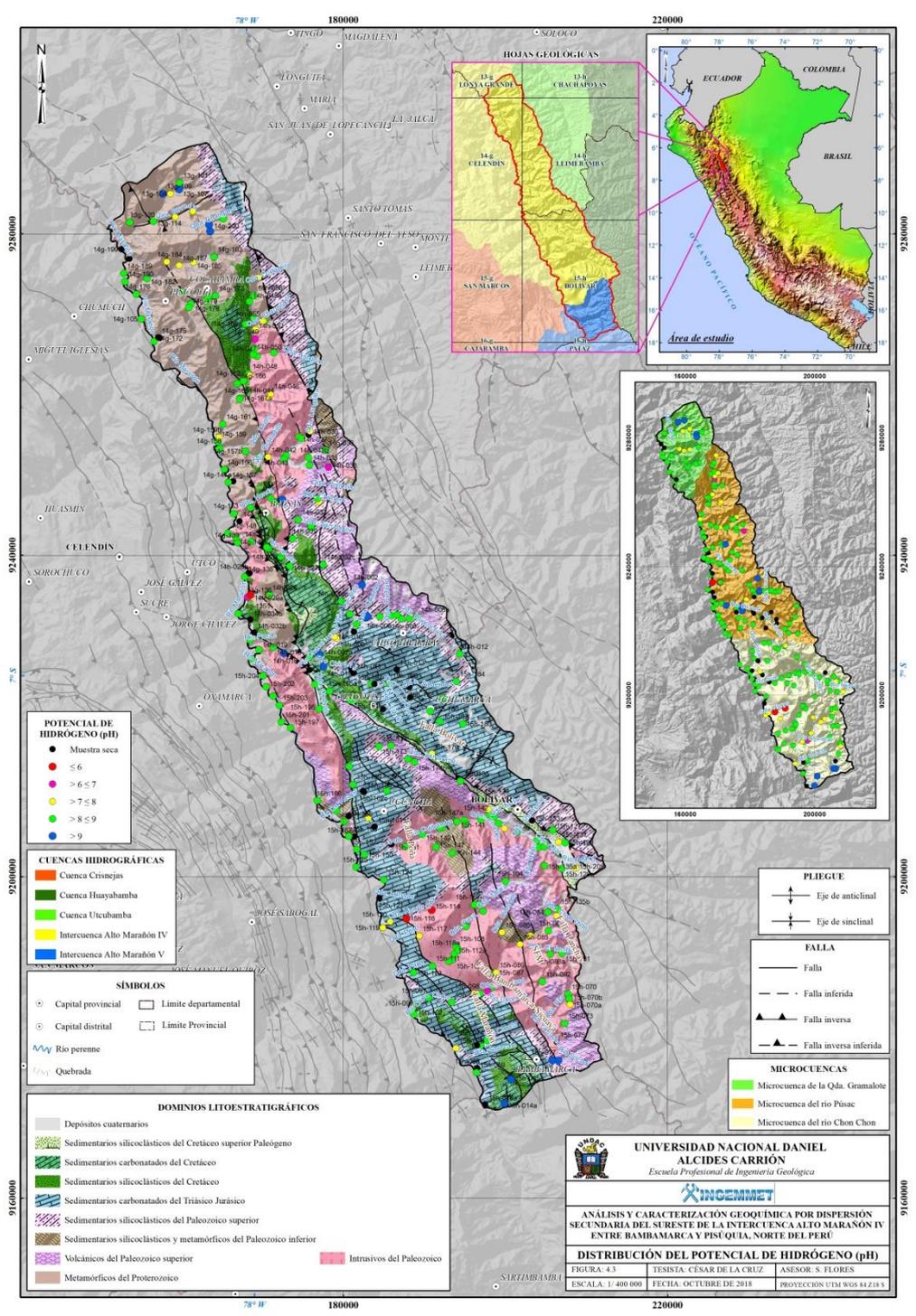
En la quebrada Del Huayo (15h-096) el valor del pH es igual a 6.9, este valor denota un comportamiento ácido de las aguas superficiales, en esta estación se dispersan sedimentos provenientes de rocas monzograníticas del Paleozoico, el valor de la conductividad eléctrica es de 202 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Por otro lado, en la quebrada Del Huayo en las estaciones 15h-114 y 15h-116 los valores de pH son 5.58 y 5.48, en estas se dispersan sedimentos fluviales procedentes de areniscas del Grupo Mitu y monzogranitos del Paleozoico, respectivamente.

Los valores altos de pH se ubican en la microcuenca del río Chocta en las estaciones 15h-072 y 15h-077 ubicadas al oeste de la localidad de Bambamarca, en estas estaciones los pH son de 9.76 y 9.59 respectivamente, en ambas estaciones se dispersan sedimentos provenientes de lavas andesíticas de la Formación Lavasen.

En las estaciones 15h-065 y 15h-014a el potencial de hidrogeno son 10.21 y 9.92, los cuales denota un ambiente alcalino, asociado a la dispersión de sedimentos carbonatados de la Formación Chúlec Pariatambo.

En la quebrada Chulpe (15h-163a) ubicada en la localidad La Esondida, el valor de la conductividad eléctrica es de 2464 $\mu\text{S}/\text{cm}$, asociado a un ambiente alcalino, donde se dispersan sedimentos fluviales provenientes de calizas de la Formación Aramachay.



4.1.2. Distribución y anomalías geoquímicas en la intercuenca Alto Marañón IV

Se muestra la distribución de los elementos en las nueve poblaciones estadísticas, los sedimentos provenientes de los intrusivos del Paleozoico (IP) tienen la mayor proporción de anomalías, superando en algunos casos hasta en dos órdenes el umbral geoquímico; dicha población es la más robusta estadísticamente con 78 muestras procesadas.

4.1.2.1. Distribución y anomalías geoquímicas de oro (Au)

Una apreciable cantidad de muestras tienen valores de oro inferiores al límite de detección (5ppb), aunque es evidente que los rangos de los valores más altos ocurren en las poblaciones 6_SSPs, 9_MP y 10_IP; donde destacan valores erráticos en las poblaciones 6_SSPs y 9_MP (1183 ppb y 5000 ppb) (Figura 4.4).

El mayor nivel de fondo se define en las unidades intrusivas del Paleozoico (10_IP) con 13.7 ppb y el máximo umbral corresponde a unidades volcánicas del Paleozoico superior (7_VPs) con 76.3 ppb (Figura 4.5).

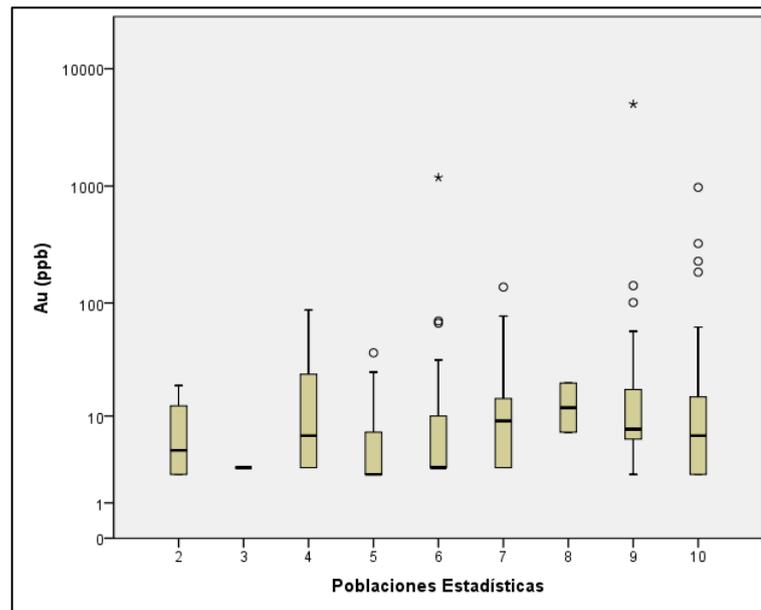
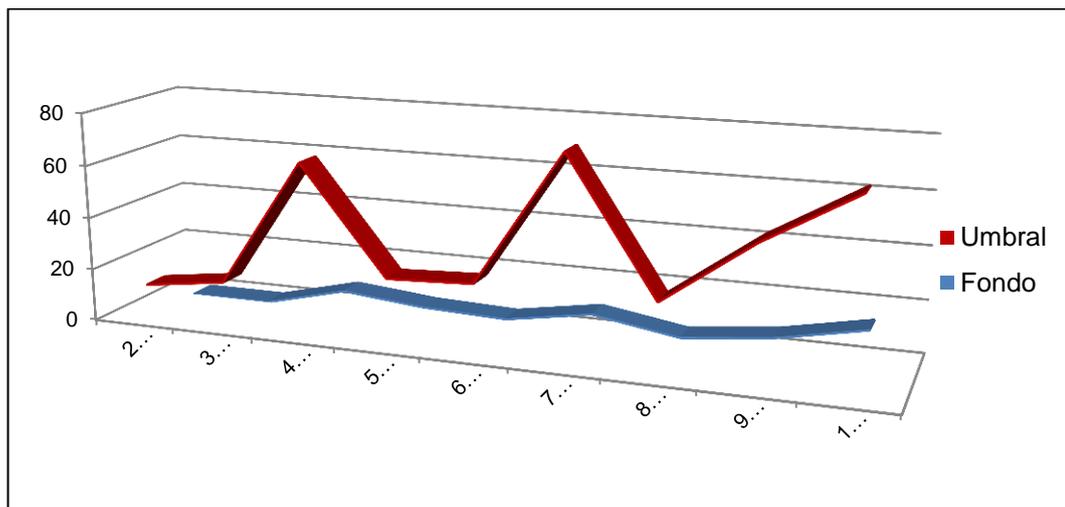


Figura 4.4. Box plots de oro en las nueve poblaciones.



| Au_ppb | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPS | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Fondo | - | - | 7.81 | 4.67 | 3.50 | 8.88 | 3.50 | 7.11 | 13.69 |
| Umbral | 12.9 | 17.1 | 65.30 | 24.95 | 26.34 | 76.30 | 26.34 | 50.27 | 69.52 |

Figura 4.5. Niveles de fondo y umbrales del oro en la intercuenca Alto Maraón IV.

Según los umbrales geoquímicos (Cuadro 3.6) se han definido 21 anomalías de oro (Mapa-01-18), de los cuales cinco están asociados al dominio intrusivo del Paleozoico, donde se dispersan sedimentos fluviales de tonalita y granodiorita e interactúan con aguas superficiales de pH en

el rango de 8 a 9. Asimismo, cinco anomalías se definieron en sedimentos provenientes de esquistos y metaandesitas del dominio metamórfico del Proterozoico y seis anomalías en sedimentos silicoclásticos del Paleozoico superior.

La máxima concentración de oro (5000 ppb) se registró en el río Marañón en la localidad de Mendan, el cual evidencia depósitos de placeres aluviales.

Otra importante anomalía de oro, se definió en la quebrada Achupa (184 ppb) en la localidad de Plazapampa, en este paraje se dispersan sedimentos fluviales provenientes de las granodioritas y andesitas en aguas superficiales con potencial de hidrógeno de 6.61. Esta anomalía forma un halo de dispersión de 5.5 km de longitud, hasta la estación 14h-038, debido a que el oro tiene una movilidad relativa baja en estos contextos.

4.1.2.2. Distribución y anomalías geoquímicas de la plata (Ag)

Se apreció una cantidad considerable de muestras por debajo del límite de detección, sin embargo, este elemento tiene una distribución asimétrica en todos los casos estudiados. Al igual que en el oro, los valores erráticos se observaron en las poblaciones 6_SSPs, 9_MP y 10_IP (Figura 4.6).

Los valores de fondo no varían sustantivamente en todas las poblaciones estudiadas, encontrándose en un rango de 0.03 ppm y 0.06 ppm. Los umbrales presentan el mismo comportamiento del fondo geoquímico, el máximo valor se obtuvo en la población de unidades intrusivas del Paleozoico (IP) y volcánicos del Paleozoico superior (7_VPs), con 0.18 ppm (Figura 4.7).

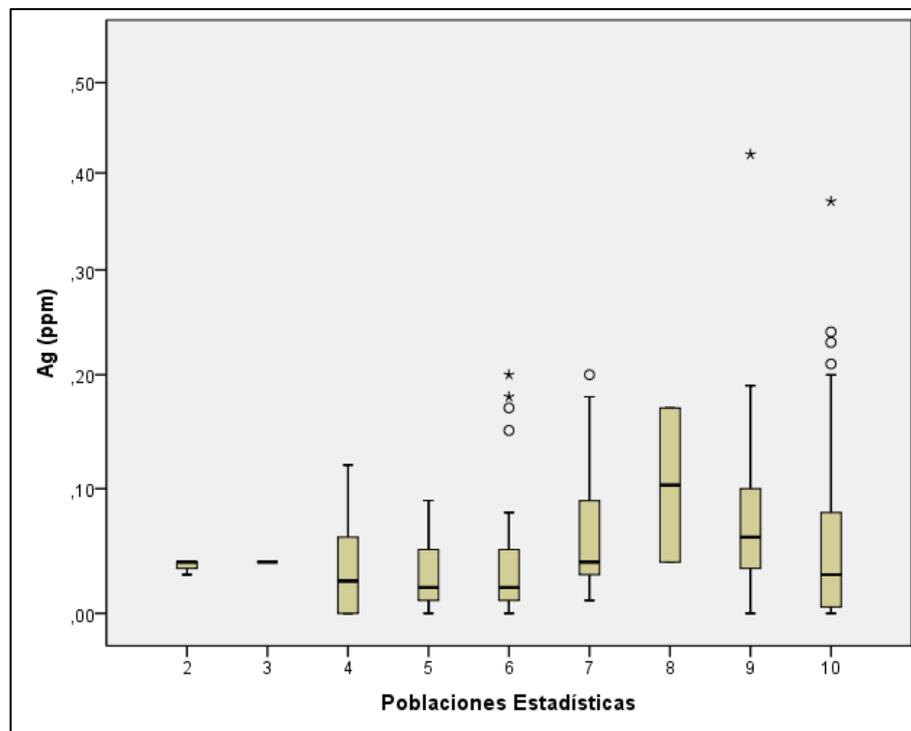
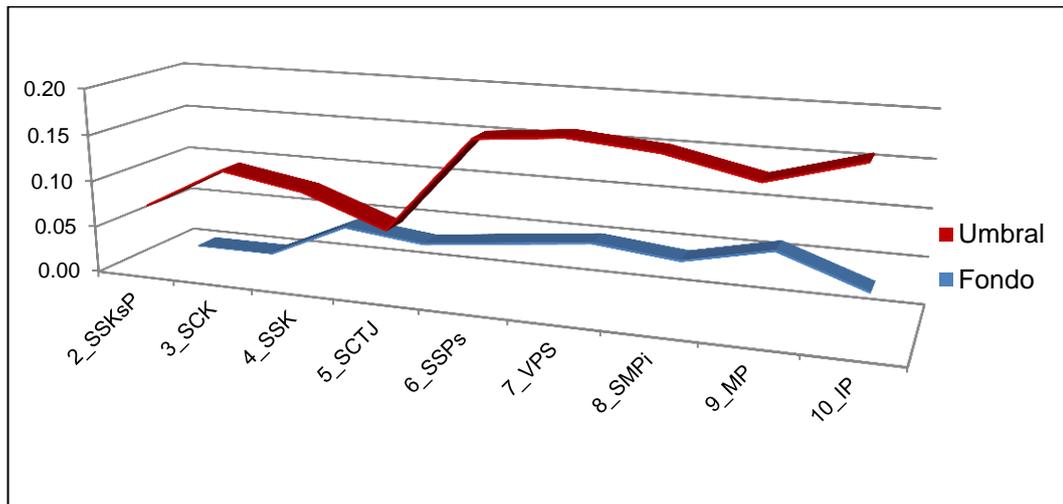


Figura 4.6. Box plots de plata en las nueve poblaciones.



| Ag ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPS | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|
| Fondo | - | - | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.06 | 0.03 |
| Umbral | 0.07 | 0.12 | 0.10 | 0.07 | 0.17 | 0.18 | 0.17 | 0.15 | 0.18 |

Figura 4.7 Niveles de fondo y umbrales de la plata en la intercuenca Alto Marañón IV.

Se determinaron 15 anomalías de lata distribuidas en los dominios intrusivos del paleozoico, metamórficos del proterozoico, sedimentarios silicoclásticos del Cretácico y del Paleozoico superior (MAPA-02-18).

En el dominio intrusivo del Paleozoico las anomalías se relacionan a sedimentos provenientes de granito y monzogranito, en condiciones alcalinas. En el dominio metamórfico a sedimentos provenientes de esquistos los cuales se dispersan en aguas de escorrentía con pH de 8 a 9. En la localidad de Shumbuy, quebrada Soledad se denota la persistencia de dos anomalías de plata, el cual forman un halo de dispersión de 4.5 km de longitud. Cabe mencionar, que en esta estación se define una asociación calcófila.

En el dominio volcánico las dos anomalías de plata, es producto de la dispersión de sedimentos fluviales andesíticos de la Formación lavasen.

4.1.2.3. Distribución y anomalías geoquímicas de cobre (Cu)

Este elemento presenta una distribución Log-normal. Los valores de fondo varían entre 15.11 ppm y 43.71 ppm, correspondiendo el valor más bajo a la población constituida de unidades carbonatadas del Triásico Jurásico y el más alto a la población de rocas metamórficas del Proterozoico (Figura 4.8).

Los valores de *threshold* se encuentran entre 18.80 ppm a 154.74 ppm, pertenecientes a las poblaciones 2_SSKsP y 7_VPs respectivamente (Figura 4.9).

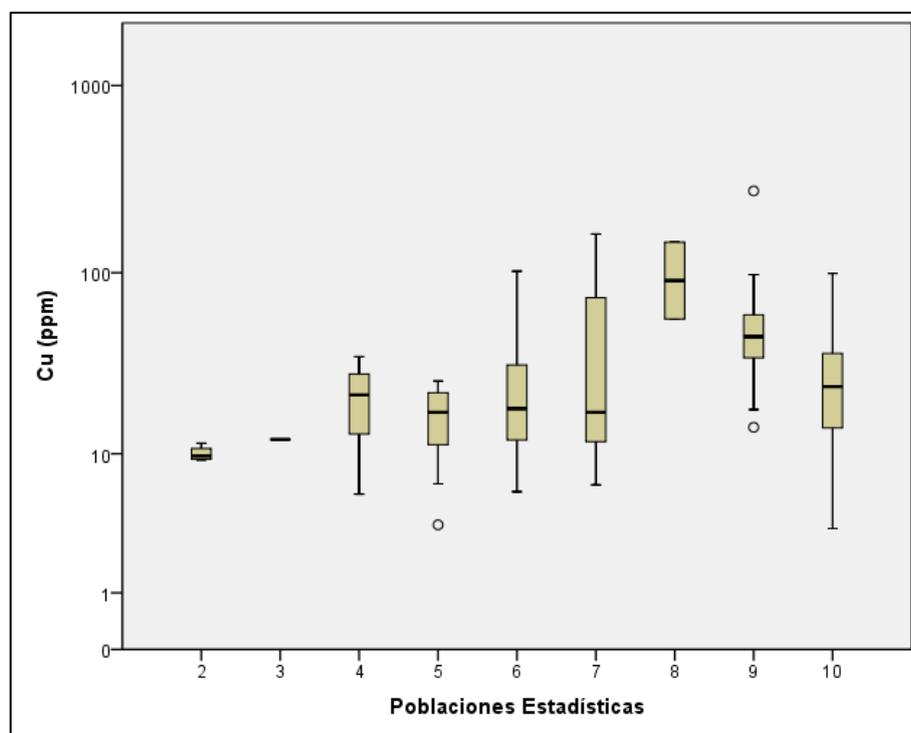
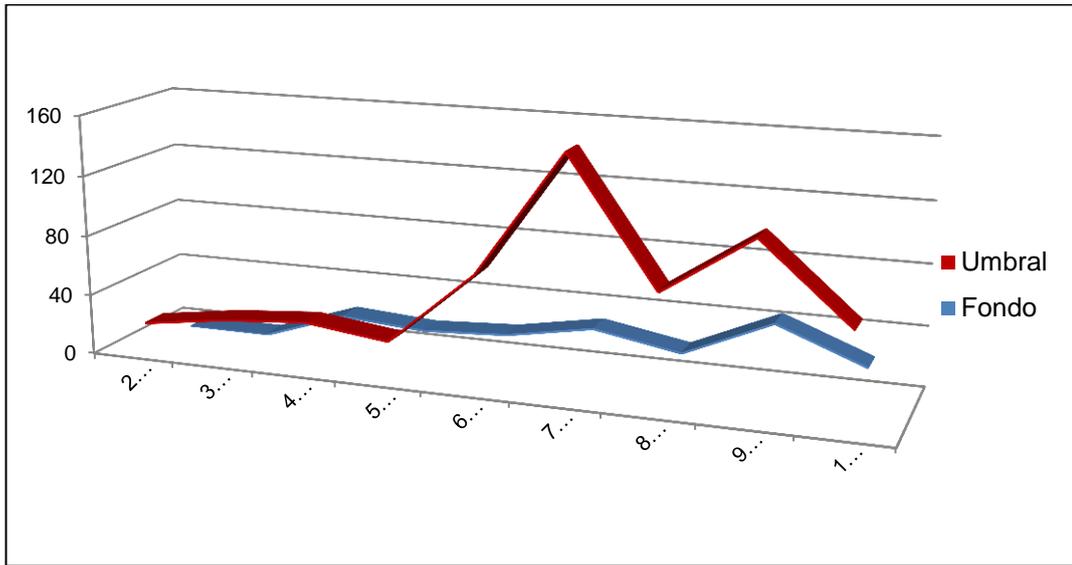


Figura 4.8. Box plots de cobre en las nueve poblaciones.



| Cu ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPS | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Fondo | - | - | 19.10 | 15.11 | 18.21 | 28.37 | 18.21 | 43.71 | 21.34 |
| Umbral | 18.8 | 26.8 | 31.32 | 24.37 | 73.50 | 154.74 | 73.50 | 111.90 | 61.95 |

Figura 4.9. Niveles de fondo y umbrales de cobre en la intercuenca Alto Marañón IV.

Se han determinado 12 anomalías de cobre (MAPA-03-18), según los valores umbrales geoquímicos (Cuadro 3.6), cuatro anomalías son referentes en el dominio intrusivo del Paleozoico, en la quebrada Pana este metal forma un tren de dispersión de hasta 5 km de longitud, bajo condiciones alcalinas, donde el cobre tiene una movilidad relativa baja.

En la quebrada Boca Negra y Longate se define una anomalía de cobre de interés prospectivo debido a su afinidad calcófila con Zn - Mo. En estas estaciones se dispersan sedimentos predominantemente de pizarras de la Formación Contaya, los mismos que interactúan con aguas superficiales de pH 8.75 y 8.25, en estas condiciones el Mo presenta movilidades relativas muy altas.

4.1.2.4. Distribución y anomalías geoquímicas de plomo (Pb)

La tendencia de distribución en la mayoría de las poblaciones es asimétrica excepto en la población 6_SSPs donde muestra una tendencia de distribución logarítmica (Figura 4.10).

Los valores de fondo varían de 16.12 ppm a 25.02 ppm. El valor mayor corresponde a la población 7_VPs y el menor valor a la población 5_SCTJ. El cálculo del umbral geoquímico denota una mayor dispersión en la población 9_MP, en esta población se obtuvo el mayor valor (103.75 ppm), mientras que el menor valor corresponde a la población 4_SSK (39.32 ppm) (Figura 4.11).

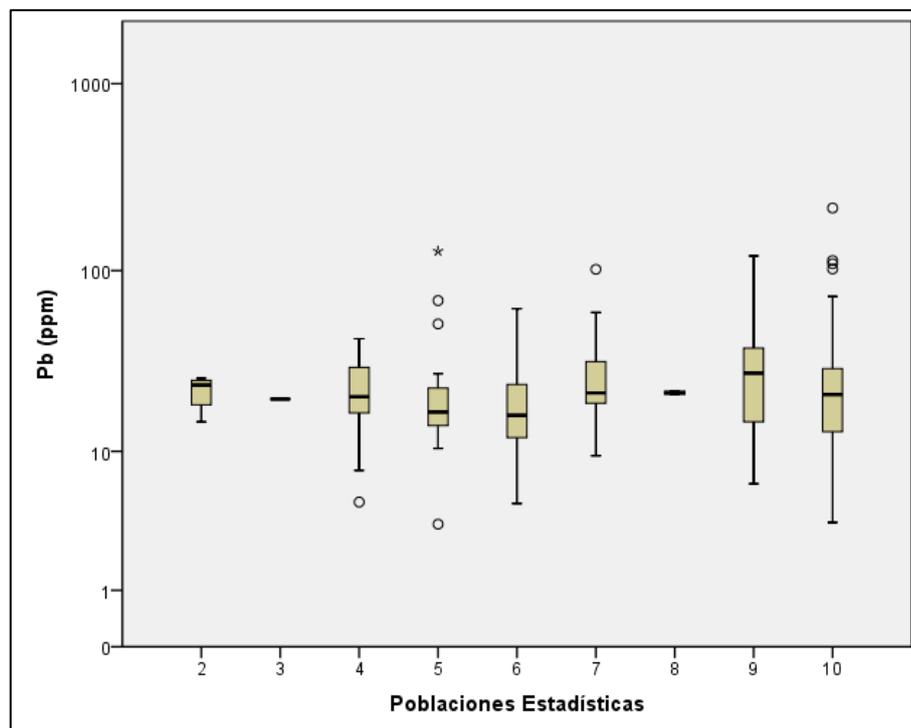
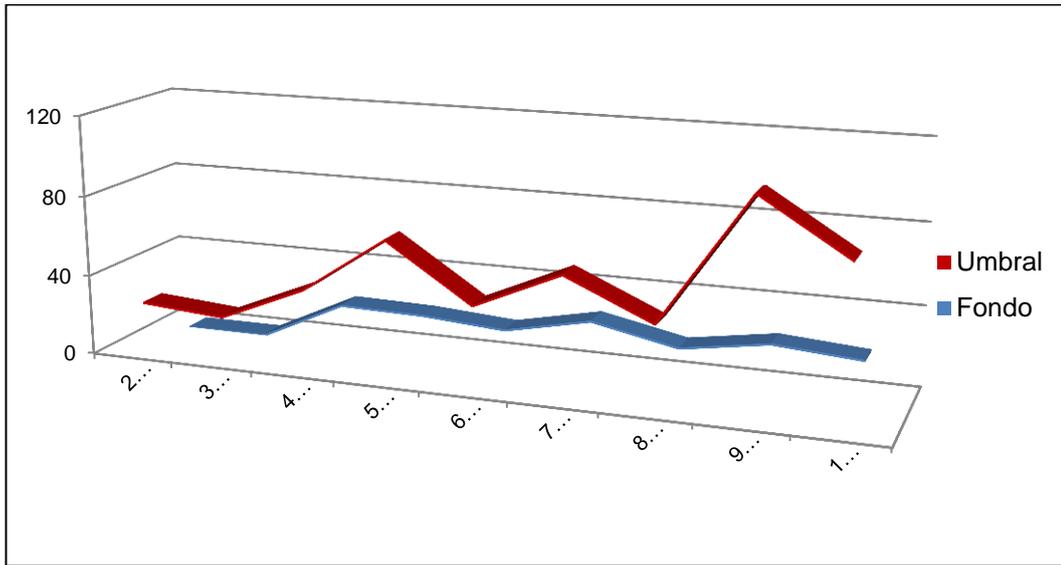


Figura 4.10. Box plots de plomo en las nueve poblaciones.



| Pb_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPS | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|---------------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| Fondo | - | - | 20.07 | 19.20 | 16.12 | 25.02 | 16.12 | 22.81 | 19.52 |
| Umbral | 24.82 | 21.65 | 39.32 | 68.03 | 40.24 | 59.19 | 40.24 | 103.75 | 77.16 |

Figura 4.11. Niveles de fondo y umbrales de plomo en la intercuenca Alto Marañón IV.

Se han definido 14 anomalías de plomo (MAPA-04-18), según los umbrales geoquímicos (Cuadro 3.6), cuatro anomalías son producto de la dispersión de sedimentos procedentes de los intrusivos del Paleozoico y además la mayor concentración (216.7 ppm) ocurre en este dominio, en la quebrada Mendalon de la localidad de Hualpus.

Se determinó tres anomalías de plomo en el dominio metamórfico del Proterozoico asociados a Ag, Zn, Sb y Mn, dos anomalías en el dominio sedimentario carbonatado del Triásico Jurásico y dos anomalías en el dominio silicoclástico del Cretáceo.

4.1.2.5. Distribución y anomalías geoquímicas de zinc (Zn)

La mayoría de las poblaciones estudiadas muestra una distribución lognormal a excepción de las poblaciones 4_SSK y 5_SCTJ que presenta asimetría en su distribución. Valores altos erráticos se observó en la población de unidades sedimentarias silicoclásticas del Paleozoico superior (6_SSPs) (Figura 4.12).

Los mayores valores de fondo se tienen en las poblaciones sedimentarias carbonatadas del Triásico Jurásico (5_SCTJ) y en metamórficos del Proterozoico (9_MP), asimismo los mayores valores del umbral geoquímico calculado corresponden a estas poblaciones (5_SCTJ y 9_MP) con 619.45 ppm y 350.95 ppm respectivamente (Figura 4.13).

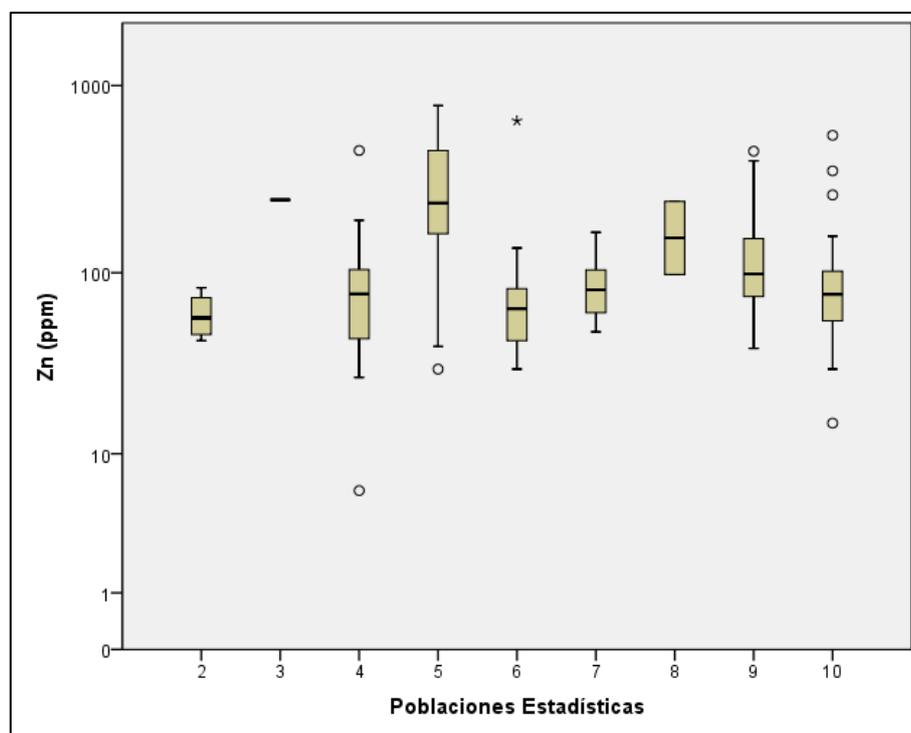
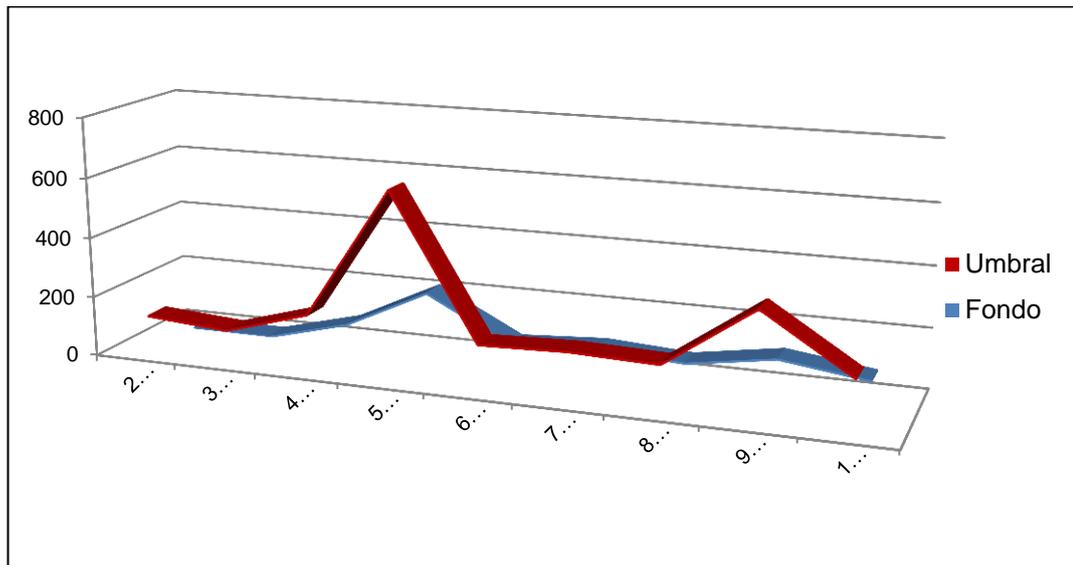


Figura 4.12. Box plots de zinc en las nueve poblaciones.



| Zn_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fondo | - | - | 72.50 | 209.72 | 63.63 | 81.16 | 63.63 | 109.68 | 70.76 |
| Umbral | 125 | 105 | 186.50 | 619.45 | 148.00 | 156.90 | 148.00 | 350.95 | 167.43 |

Figura 4.13. Niveles de fondo y umbrales de plomo en la intercuenca Alto Marañón IV.

Se tiene 13 anomalías de zinc distribuidas en los siguientes dominios litoestratigráficos: intrusivos del Paleozoico (3), Metamórficos del Proterozoico (3), volcánicos del paleozoico superior (2), sedimentarios del Paleozoico superior (1), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2), sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (1) y sedimentarios carbonatados del Cretáceo (1) (MAPA-05-18).

Las mayores concentraciones se relacionada al dominio sedimentario carbonatado del Triásico Jurásico, donde se dispersan sedimentos carbonatados procedentes de la Formación Aramachay, en un contexto fisicoquímico alcalino (pH=8.96).

Es importante mencionar que en todas las anomalías de zinc, las aguas superficiales tienen un comportamiento alcalino, bajo este contexto la movilidad relativa del zinc es baja.

4.1.2.6. Distribución y anomalías geoquímicas de molibdeno (Mo)

El molibdeno se distribuye con tendencia lognormal, excepto en la población 5_SCTJ se observa una distribución asimétrica, es así que en las poblaciones sedimentarias silicoclásticas del Cretáceo (4_SSK), volcánicos del Paleozoico superior (7_VPs) e intrusivos del Paleozoico (10_IP) se tienen valores altos erráticos (Figura 4.14).

Hay una notable diferencia en los valores de fondo que varían de 1.02 ppm a 3.72 ppm y corresponden a los ambientes sedimentarios y metamórficos del Paleozoico inferior (8_SMPi) y sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (5_SCTJ). El máximo umbral corresponde al ambiente 5_SCTJ con 31.76 ppm (Figura 4.15).

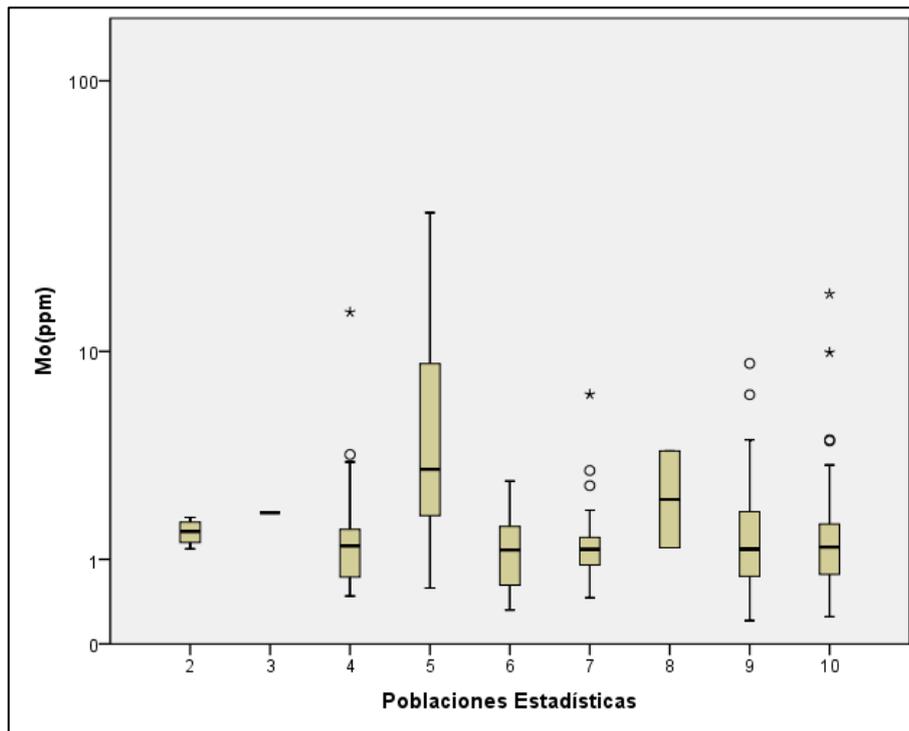
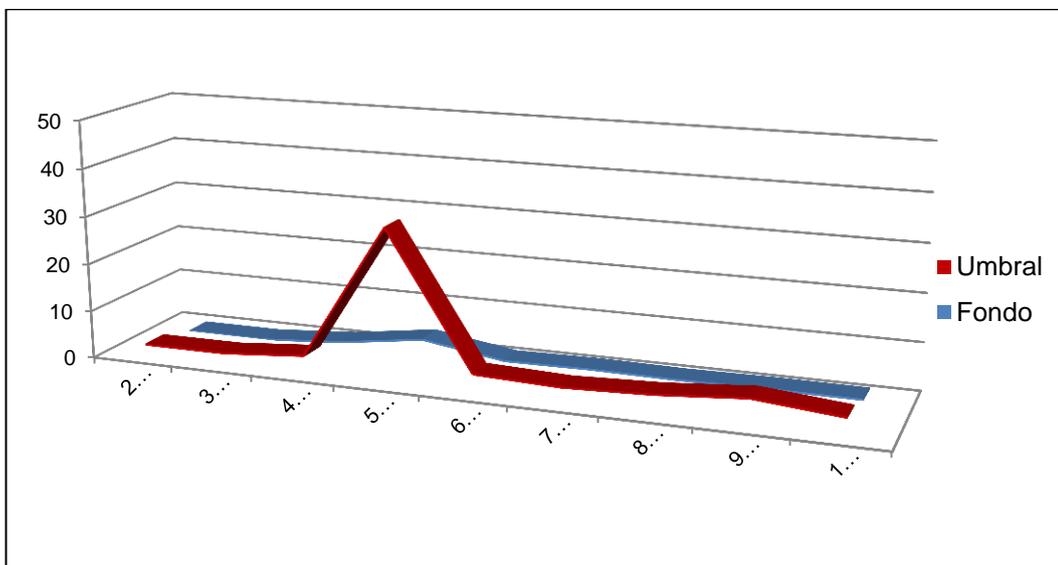


Figura 4.14. Box plots de molibdeno en las nueve poblaciones.



| Mo_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|
| Fondo | - | - | 1.27 | 3.72 | 1.02 | 1.23 | 1.02 | 1.19 | 1.13 |
| Umbral | 2.18 | 2.22 | 3.59 | 31.76 | 3.73 | 3.09 | 3.73 | 5.12 | 3.51 |

Figura 4.15. Niveles de fondo y umbrales de molibdeno en la intercuenca Alto Marañón IV.

Se ha definido 14 anomalías geoquímicas de molibdeno en los dominios intrusivos del Paleozoico (4) asociados a U, metamórficos del Proterozoico (2), sedimentarios y metamórficos del Paleozoico inferior (2), volcánicos del Paleozoico superior (2) asociados a Th, sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-06-18).

Es importante mencionar que la mayor concentración de molibdeno, ocurre en el dominio sedimentario carbonatado del Triásico Jurásico, el cual se encuentra asociado a Zn, Ni y Sb. La dispersión de sedimentos fluviales corresponde a la de la Formación Aramachay.

4.1.2.7. Distribución y anomalías geoquímicas de arsénico (As)

En la figura 9.13 se observa una distribución lognormal del arsénico en la mayoría de poblaciones estudiadas. Los valores de fondo varían de 11.96 ppm a 16.12 ppm, los cuales corresponden a los ambientes de rocas metamórficas del Proterozoico (9_MP) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (4_SSK) (Figura 4.16).

El Complejo del Marañón (9_MP) presenta el máximo valor del umbral geoquímico (81.23 ppm), en el caso del batolito de Pataz (10_IP) el umbral asciende a 65.11 ppm y el umbral de los volcánicos del Paleozoico (7_VPs) es de 43.70 ppm, son los ambientes con mayores valores del umbral geoquímico calculado (Figura 4.17).

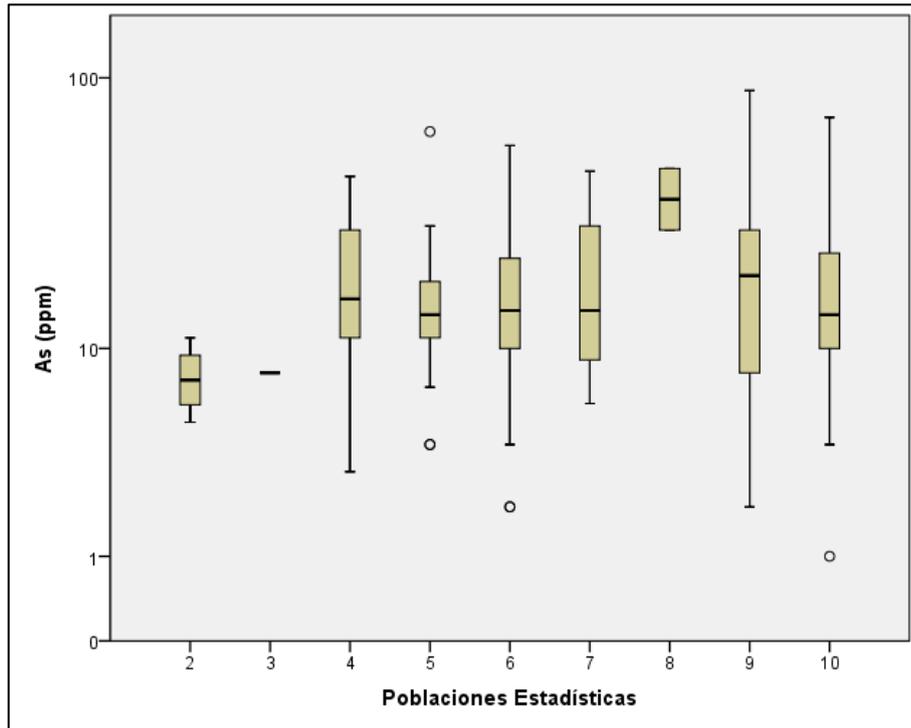
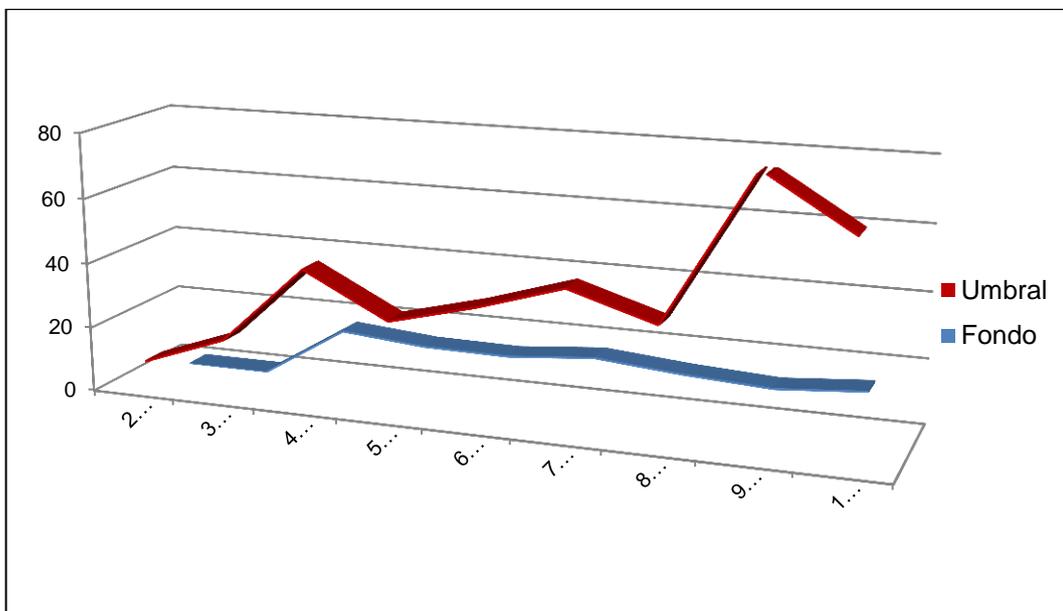


Figura 4.16 Box plots de arsénico en las nueve poblaciones.



| As_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Fondo | - | - | 16.12 | 13.84 | 13.47 | 15.77 | 13.47 | 11.96 | 14.07 |
| Umbral | 8.44 | 17.84 | 42.20 | 28.90 | 35.58 | 43.70 | 35.58 | 81.23 | 65.11 |

Figura 4.17 Niveles de fondo y umbrales de arsénico en la intercuenca Alto Maraón IV.

Según, los valores umbrales geoquímicos se ha determinado 15 anomalías de arsénico; las mayores concentraciones se denotaron en los dominios Metamórficos del Proterozoico (2) e Intrusivos del Paleozoico (2) (MAPA-07-18).

En el dominio sedimentario silicoclástico del Paleozoico superior se ha definido tres anomalías de As, relacionado a anomalías de Au, Ag, Zn, Pb y Cu. En este dominio el As se comporta como un elemento *pathfinder* para la mineralización de oro. Cabe resaltar, que, en el dominio sedimentario carbonatado del Triásico Jurásico, la concentración de este elemento, superó en más de dos veces el umbral geoquímico y se asocia a anomalías de Au y tierras raras ligeras (La, Ce).

4.1.2.8. Distribución y anomalías geoquímicas de antimonio (Sb)

El antimonio presenta distribuciones asimétricas positivas, excepto la población de los sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo superior Paleógeno donde la distribución es logarítmica. Destacan los altos erráticos de las poblaciones 4_SSK, 7_VPs y 10_IP (Figura 4.18).

Los valores de fondo destacan un mínimo de 0.70 ppm en unidades intrusivas del paleozoico (10_IP) y un máximo de 2.15 ppm en unidades sedimentarias carbonatadas del Triásico Jurásico (5_SCTJ), esta última población también reporta el valor alto de umbral calculado con 7.03 ppm,

seguido del ambiente sedimentario y metamórfico del Paleozoico inferior (6_SMPi) con 6.08 ppm (Figura 4.19).

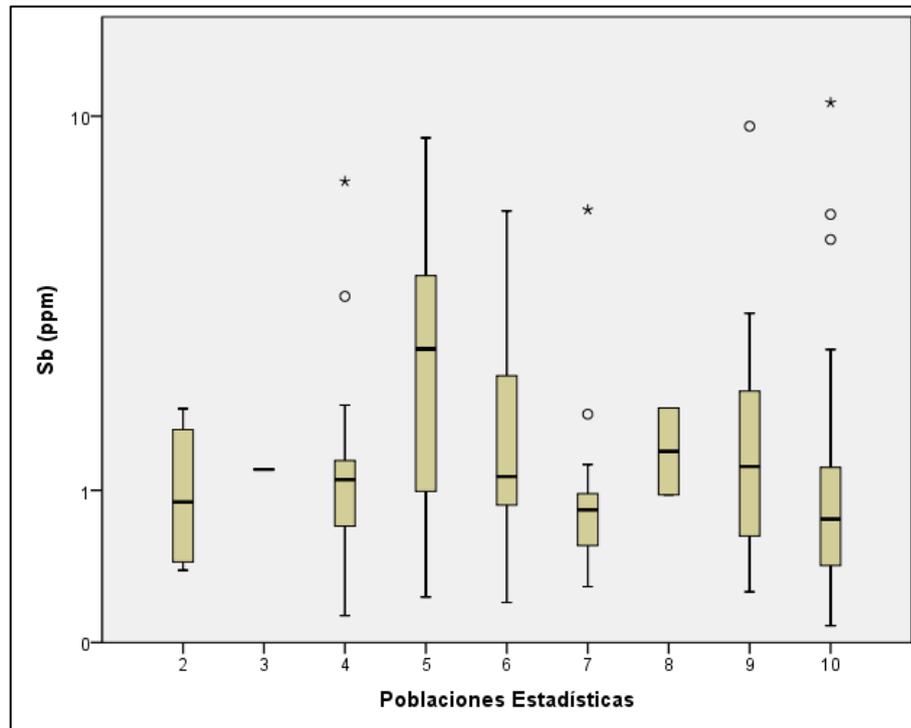
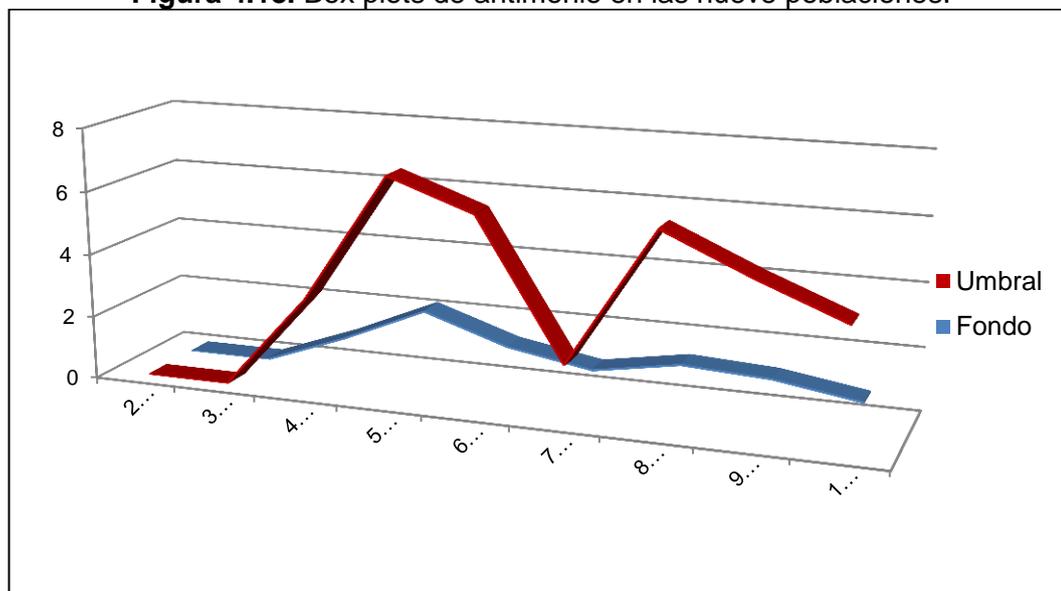


Figura 4.18. Box plots de antimonio en las nueve poblaciones.



| Sb_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|
| Fondo | - | - | 0.99 | 2.15 | 1.27 | 0.81 | 1.27 | 1.12 | 0.70 |
| Umbral | - | - | 2.99 | 7.03 | 6.08 | 1.77 | 6.08 | 4.88 | 3.81 |

Figura 4.19. Niveles de fondo y umbrales de antimonio en la intercuenca Alto Maraón IV.

Se determinó 11 anomalías de antimonio, distribuidos en los siguientes dominios: intrusivos del Paleozoico (3), metamórficos del Proterozoico (1), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (1), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-08-18).

Las dos altas concentraciones de Sb, ocurre en los dominios intrusivos del Paleozoico y Metamórficos del Proterozoico, relacionados a la geogenia del batolito y a alguna mineralización por su asociación calcófila, respectivamente.

Es importante mencionar que en la quebrada Lligua, la concentración de Sb superó en más de dos veces el umbral geoquímico, donde se dispersan sedimentos fluviales procedentes del Grupo Goyllarisquizga. Por otro lado, en la quebrada Tunaspampa, la concentración de Sb es mayor a dos veces el *threshold*, en este paraje se dispersan sedimentos fluviales provenientes de rocas monzograníticas, bajo un contexto de pH igual a 7.6.

4.1.2.9. Distribución y anomalías geoquímicas de cobalto (Co)

La distribución del cobalto es asimétrica en la mayoría de las poblaciones (Figura 9.17), los valores de fondo varían de 5.92 ppm a 16.08 ppm en las

poblaciones de rocas sedimentarias carbonatadas del Triásico Jurásico (5_SCTJ) y en metamórficos del Proterozoico (9_MP) (Figura 4.20).

Se observó una tendencia positiva de los umbrales en unidades más antiguas, reportando el valor alto en rocas del Complejo Marañón (9_MP) con 30.06 ppm, en tanto el valor bajo corresponde a rocas sedimentarias carbonatadas del Triásico Jurásico (5_SCTJ) (Figura 4.21).

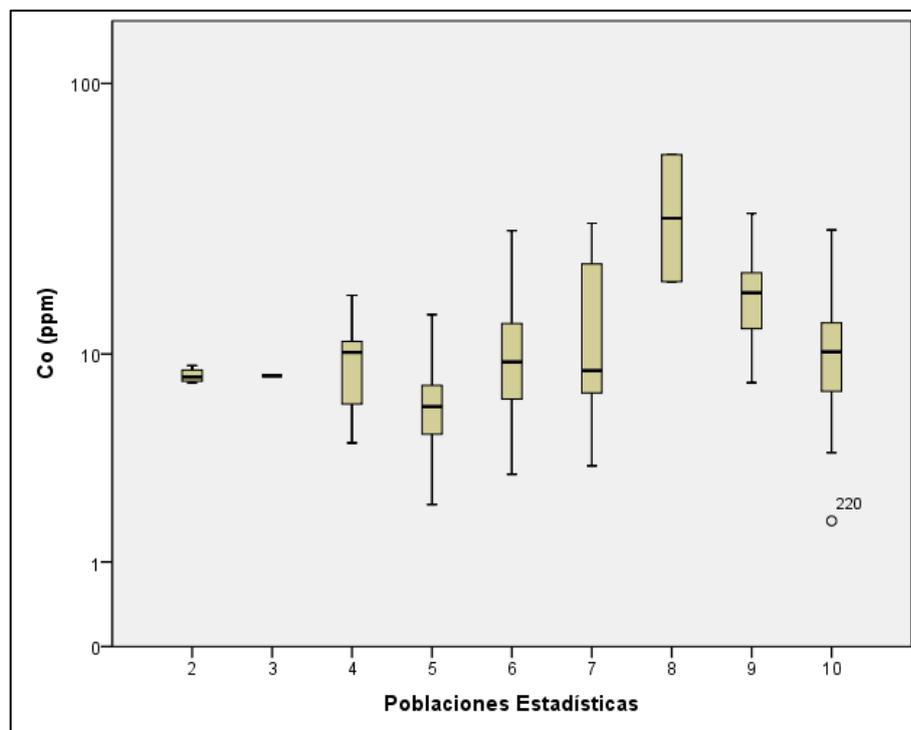
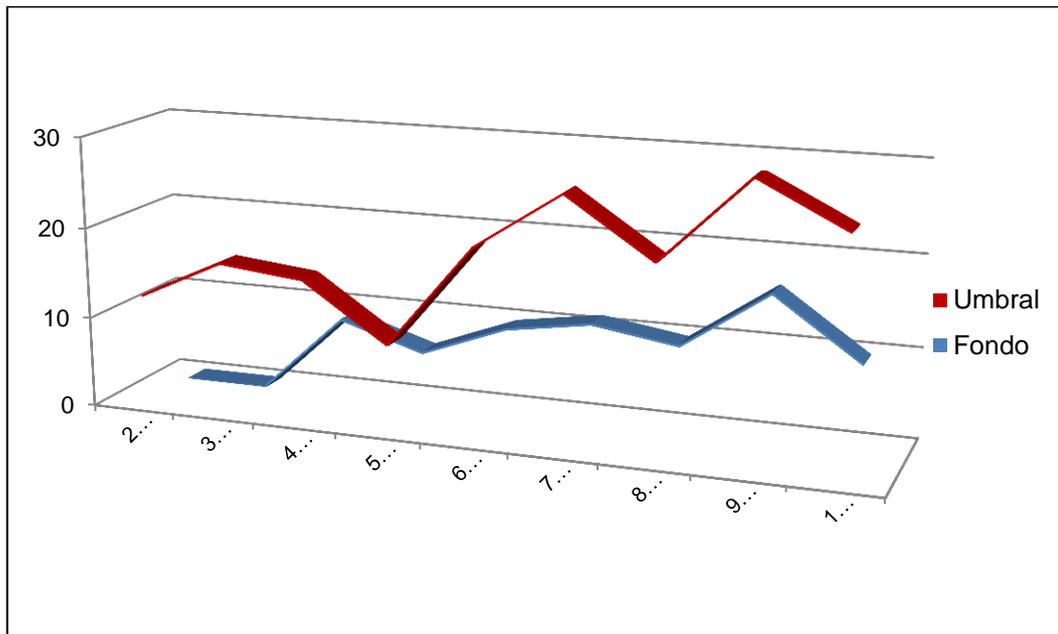


Figura 4.20. Box plots de cobalto en las nueve poblaciones.



| Co_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Fondo | - | - | 8.80 | 5.92 | 9.53 | 11.00 | 9.53 | 16.08 | 9.43 |
| Umbral | 12.22 | 16.64 | 15.66 | 9.39 | 20.77 | 27.03 | 20.77 | 30.06 | 25.30 |

Figura 4.21. Niveles de fondo y umbrales de cobalto en la intercuenca Alto Maraón IV.

En este dominio se determinó 11 anomalías de cobalto distribuidos en los siguientes dominios litoestratigráficos: intrusivos del Paleozoico (2), volcánicos del Paleozoico (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (3), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-09-18).

La mayor concentración de cobalto se definió en el dominio sedimentario y metamórfico del Paleozoico inferior (55 ppm); según, el umbral geoquímico (20.77ppm), dicha concentración tiene una intensidad superior a dos veces el *threshold* y se ubica en la quebrada Logante en la localidad de Gollón.

4.1.2.10. Distribución y anomalías geoquímicas de níquel (Ni)

La distribución del níquel es de carácter asimétrico en todas las poblaciones, en las poblaciones 4_SSK, 5_SCTJ y 6_SSPs se observan valores atípicos negativos (Figura 4.22). Los valores de fondo se encuentran en el rango de 15.19 ppm a 32.99 ppm, el mayor valor ocurre en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ). En cuanto a los umbrales los mayores valores ocurren en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) y en los metamórficos del Proterozoico (9_MP); los menores tenores corresponden a las poblaciones (2_SSKsP) y (3_SCK) (Figura 4.23).

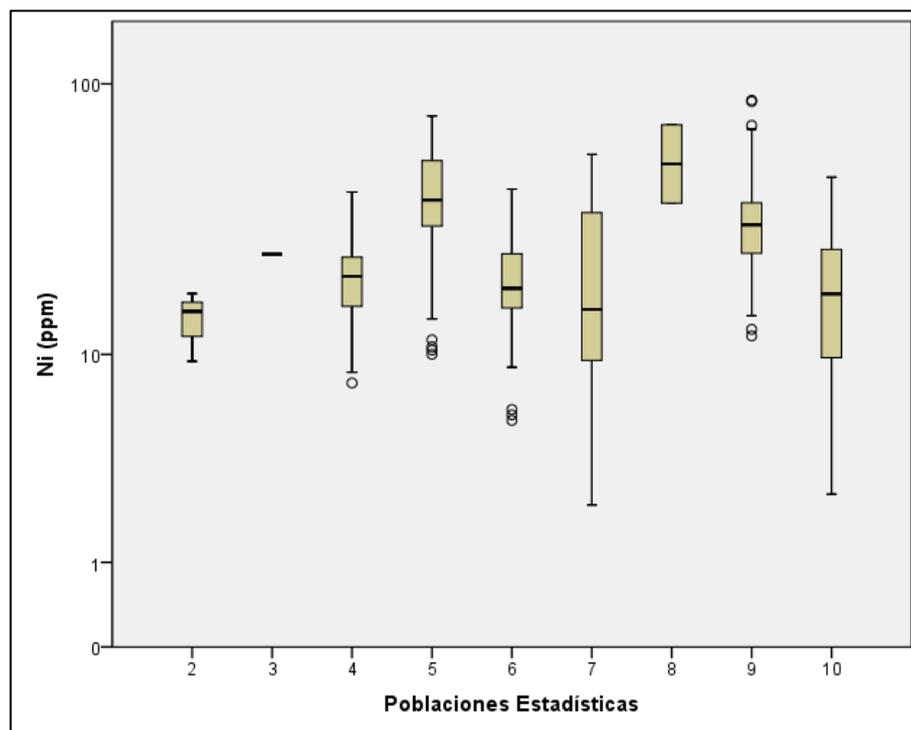
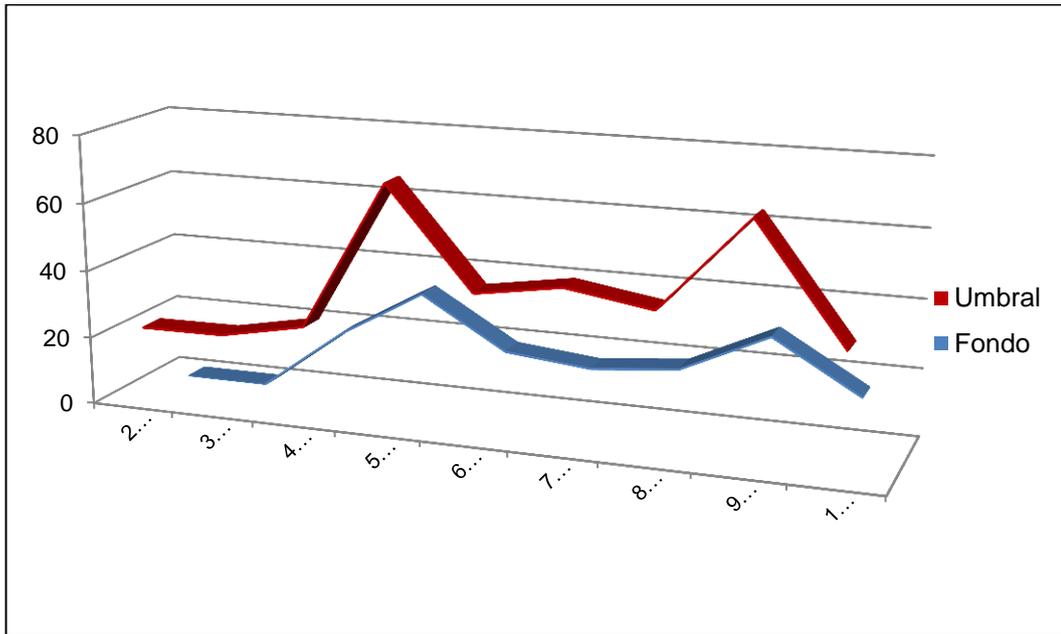


Figura 4.22. Box plots de níquel en las nueve poblaciones.



| Ni_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Fondo | - | - | 18.58 | 32.99 | 18.10 | 15.57 | 18.10 | 30.08 | 15.19 |
| Umbral | 22.3 | 22.5 | 27.33 | 70.86 | 41.80 | 45.77 | 41.80 | 69.00 | 35.49 |

Figura 4.23. Niveles de fondo y umbrales de níquel en la intercuenca Alto Maraón IV.

Se definió 13 anomalías de níquel distribuidos en los dominios intrusivos del Paleozoico (5), metamórficos del Proterozoico (3), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (1) (MAPA-10-18).

Las anomalías relacionadas al dominio intrusivo del Paleozoico, se deben, a la dispersión de sedimentos monzograníticos con débil mineralización de pirita en un ambiente alcalino de pH igual a 8.09.

4.1.2.11. Distribución y anomalías geoquímicas de cromo (Cr)

El cromo presenta una distribución asimétrica, excepto en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) donde muestra una tendencia logarítmica (Figura 4.24).

Los valores de fondo fluctúan de 17.29 ppm a 34.09 ppm, el valor alto corresponde al ambiente del Complejo Maraón (9_MP), en tanto el menor valor al ambiente silicoclástico del Cretáceo (4_SSK). Los umbrales varían de 21 ppm a 146.45 ppm, el menor valor ocurre en sedimentarios carbonatados del Cretáceo (3_SCK) y el mayor valor en ambientes metamórficos del Proterozoico (9_MP) denotando una fuerte dispersión de este elemento en dicho ambiente (Figura 4.25).

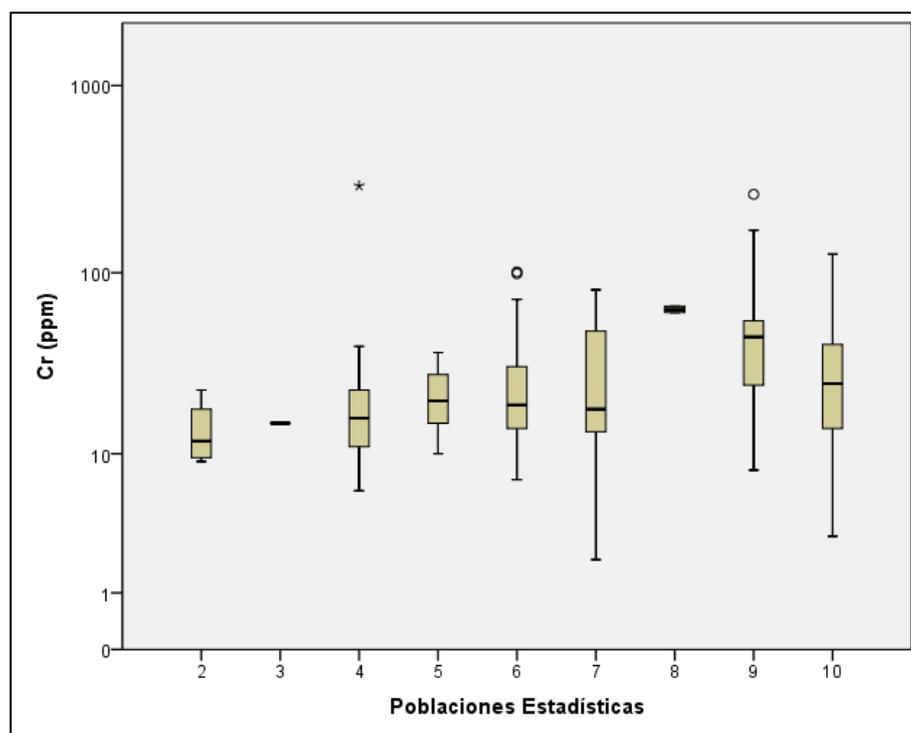
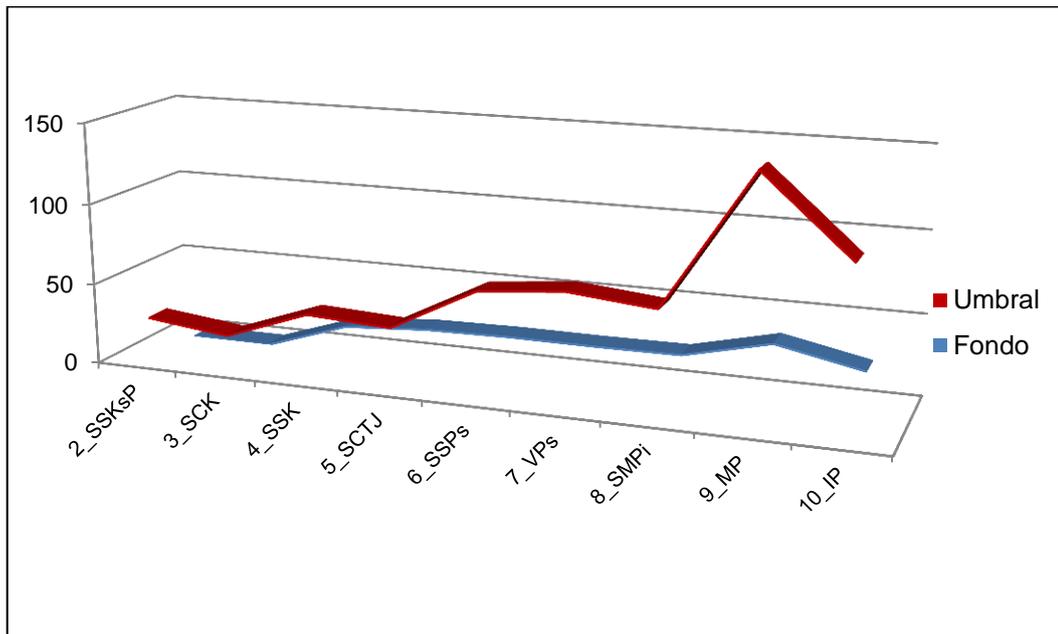


Figura 4.24. Box plots de cromo en las nueve poblaciones.



| Cr_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| Fondo | - | - | 17.29 | 20.75 | 21.54 | 21.25 | 21.54 | 34.09 | 23.23 |
| Umbral | 27 | 21 | 39.55 | 36.85 | 64 | 69 | 64 | 146.45 | 99.76 |

Figura 4.25 Niveles de fondo y umbrales de cromo en la intercuenca Alto Marañón IV.

Se definieron 18 anomalías geoquímicas distribuidos en los siguientes dominios litoestratigráficos: Metamórficos del Proterozoico (4), Intrusivos del Paleozoico (3), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (4), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2), sedimentarios y metamórficos silicoclásticos del Paleozoico inferior (1) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-11-18).

La anomalía de cromo de mayor intensidad (> 3T) se denotó en el dominio sedimentario silicoclástico del Cretáceo (292 ppm) asociado a Mo (3.72 ppm), ubicada en el río Marañón en la localidad de Santa María.

4.1.2.12. Distribución y anomalías geoquímicas de bario (Ba)

La distribución del cadmio es asimétrica en todas las poblaciones estudiadas y los mayores valores atípicos ocurren en la población de volcánicos del Paleozoico superior (7_VPs) (Figura 4.26).

Los valores de fondo varían de 217.89 ppm a 288.65 ppm, estos valores corresponden a sedimentarios silicoclásticos del cretáceo (4_SSK) y a volcánicos del Paleozoico superior (7_VPs).

La población de unidades sedimentarias carbonatadas del Triásico Jurásico (5_SCTJ) es la que presenta el máximo valor del umbral calculado para la intercuenca Alto Marañón IV, mientras que el menor valor se relaciona al ambiente de sedimentario silicoclástico del Cretáceo. Es importante mencionar que las mayores dispersiones se observa en los ambientes 5_SCTJ, 8_SMPi y 10_IP (Figura 4.27).

Las 11 anomalías de bario se han definido en los siguientes dominios: intrusivos del Paleozoico (1), metamórficos del Proterozoico (1), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (3), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-12-18).

La mayor intensidad de anomalía de bario se determinó en el dominio volcánico del Paleozoico, el cual forma un halo de dispersión de hasta 8

km de longitud, en la quebrada Chacahuayco en la localidad de Chuquibamba (MAPA-29-18).

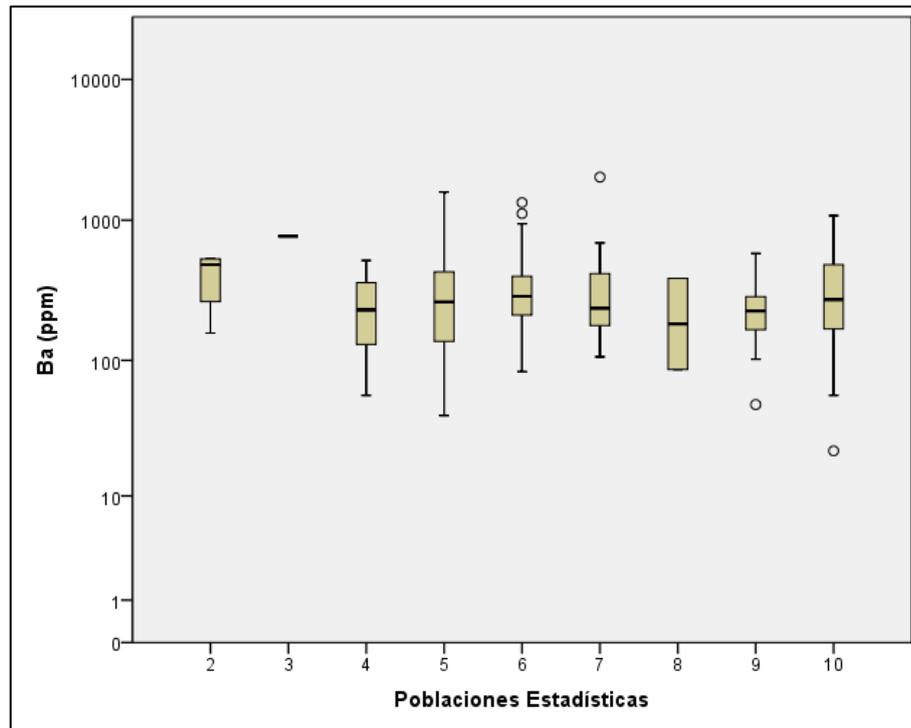
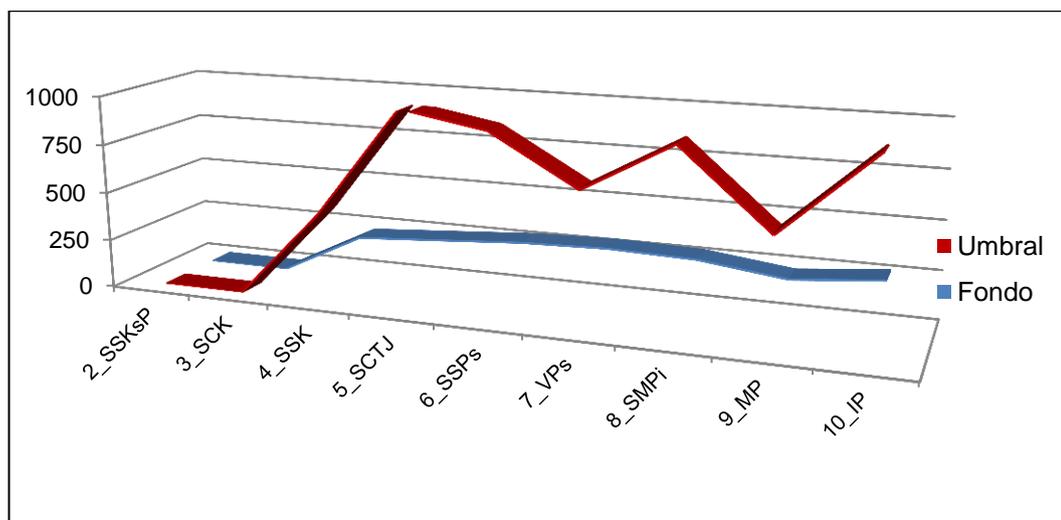


Figura 4.26. Box plots de bario en las nueve poblaciones.



| Ba_ppm | 2_SSKsp | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fondo | - | - | 217.89 | 246.76 | 276.30 | 288.65 | 276.30 | 221.95 | 263.98 |
| Umbral | - | - | 452.90 | 1013.10 | 935.77 | 688.10 | 935.77 | 556.15 | 964.56 |

Figura 4.27 Niveles de fondo y umbrales de bario en la intercuenca Alto Maraón IV.

4.1.2.13. Distribución y anomalías geoquímicas de fósforo (P)

El fósforo presenta una distribución asimétrica en las poblaciones estudiadas, en la población de intrusivos del Paleozoico (10_IP) se observa un bajo errático (Figura 4.28).

Los valores de fondo y umbrales difieren notablemente en cada caso con el fondo mínimo de 728.44 ppm para la población 6_SSPs y el máximo de 2290.78 para la población 5_SCTJ; esta última población también presenta el máximo valor de umbral calculado en 5909.35 ppm y el umbral mínimo corresponde a la población volcánica del Paleozoico superior (7_VPs) con 1184.30 ppm (Figura 4.29).

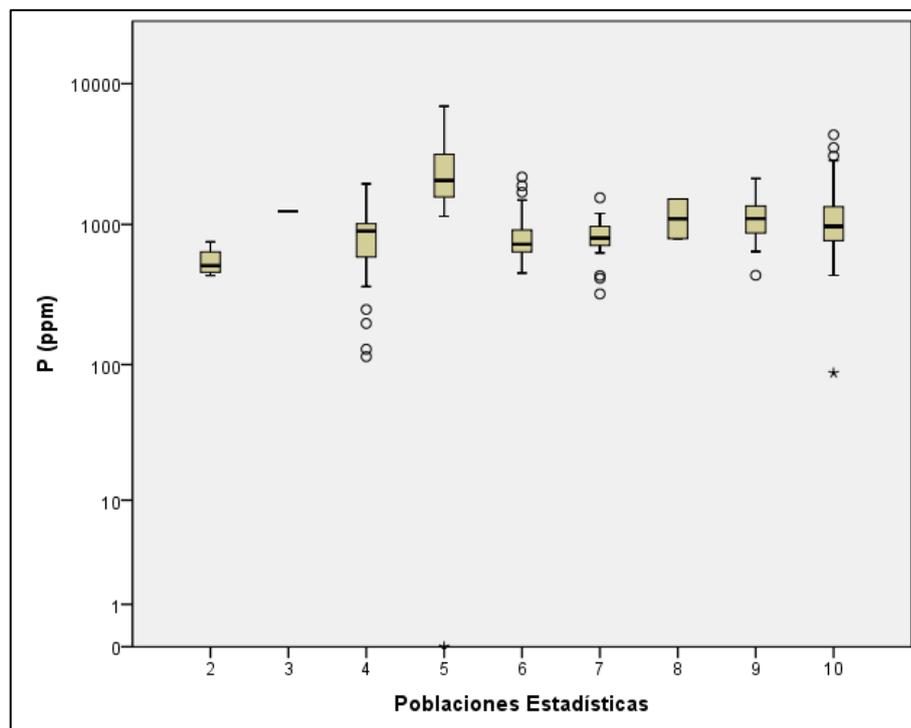
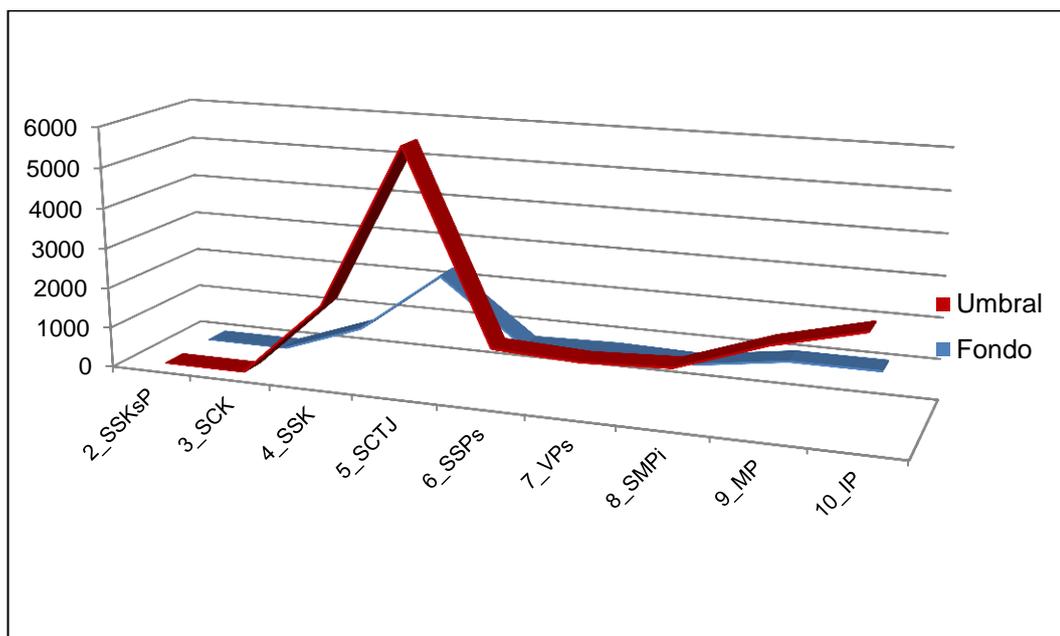


Figura 4.28. Box plots de fósforo en las nueve poblaciones.



| P_ppm | 2_SSKsp | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Fondo | - | - | 737.84 | 2290.78 | 728.44 | 779.24 | 728.44 | 1031.63 | 1030.71 |
| Umbral | - | - | 1895.80 | 5909.35 | 1283.70 | 1184.30 | 1283.70 | 2033.15 | 2562.71 |

Figura 4.29. Niveles de fondo y umbrales de fósforo en la intercuenca Alto Maraón IV.

El fósforo definió 19 anomalías en los siguientes dominios: intrusivos del Paleozoico (4), metamórficos del Proterozoico (3), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (6), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-13-18).

La mayor cantidad de anomalías se relaciona a la dispersión de sedimentos fluviales de areniscas procedentes del Grupo Mitu en un ambiente alcalino cuyo potencial de hidrógeno se encuentra en el rango de 8 a 9.

4.1.2.14. Distribución y anomalías geoquímicas de manganeso (Mn)

Las poblaciones sedimentarias carbonatadas del Triásico Jurásico (5_SCTJ), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (6_SSPs) y volcánicos del Paleozoico superior (7_VPs) muestran una tenencia de distribución log normal a diferencia de las demás poblaciones estudiadas. Los valores erráticos ocurren en la población sedimentaria silicoclástica del Cretáceo (4_SSK) (Figura 4.30).

En la figura 9.28 se observa un buen contraste entre las líneas del valor de fondo y el umbral, la población volcánica del Paleozoico superior (7_VPs) denota el máximo valor de fondo y umbral (975.33 ppm y 1839.40 ppm respectivamente); y los valores mínimos de fondo y umbral ocurre en la población sedimentaria silicoclástica del Cretáceo (4_SSK) (Figura 4.31).

Las anomalías de manganeso se distribuyen de la siguiente manera: intrusivos del Paleozoico (2), metamórficos del Proterozoico (3), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (3), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-14-18).

Cabe resaltar, que todas las anomalías de manganeso se encuentran en el rango de intensidades de $\geq T < 2T$.

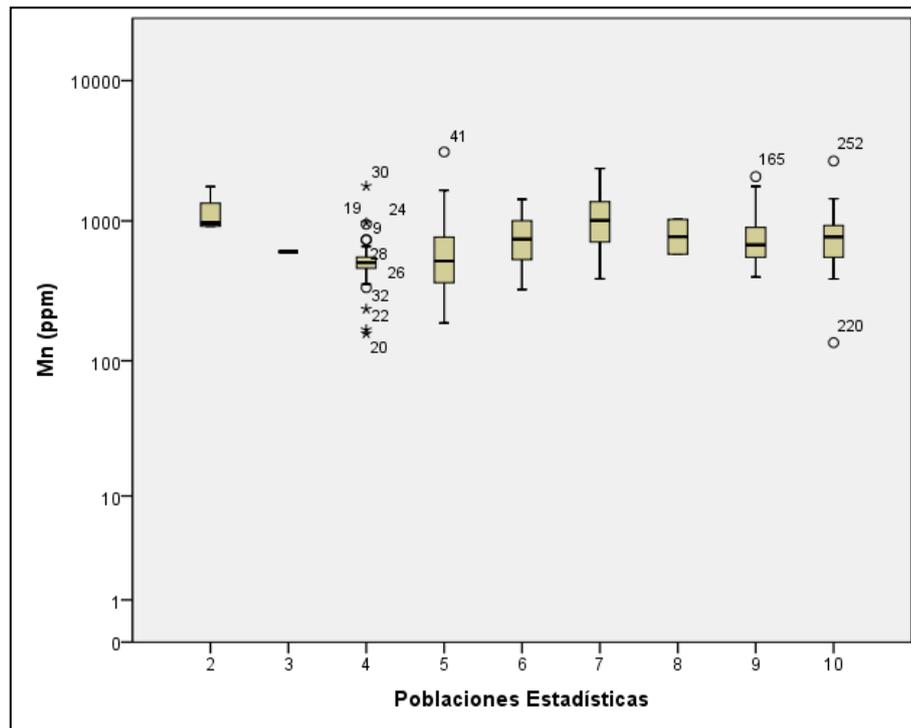
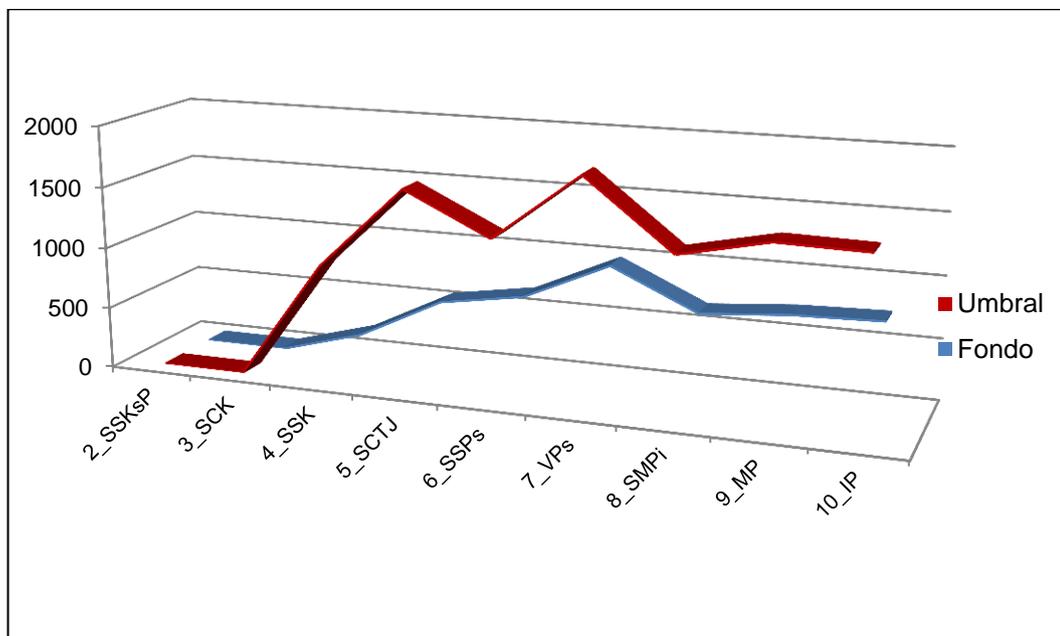


Figura 4.30 Box plots de manganeso en las nueve poblaciones.



| Mn_ppm | 2_SSkSP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Fondo | - | - | 194.48 | 543.63 | 656.77 | 975.33 | 656.77 | 715.42 | 735.49 |
| Umbral | - | - | 959.65 | 1628.25 | 1296.47 | 1839.40 | 1296.47 | 1449.58 | 1434.81 |

Figura 4.31 Niveles de fondo y umbrales de manganeso en la intercuenca Alto Maraón IV.

4.1.2.15. Distribución y anomalías geoquímicas de estroncio (Sr)

En la figura 4.32 se muestra la distribución log normal y asimétrica del estroncio. Los valores de fondo varían de 18.11 ppm a 149.79 ppm, el máximo valor ocurre en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) y el mínimo en la población volcánica del Paleozoico superior (7_VPs).

El máximo valor de umbral se denota en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) con 407.79 ppm y el valor mínimo en la población volcánica del Paleozoico superior (7_VPs) con 42.36 ppm (Figura 4.33).

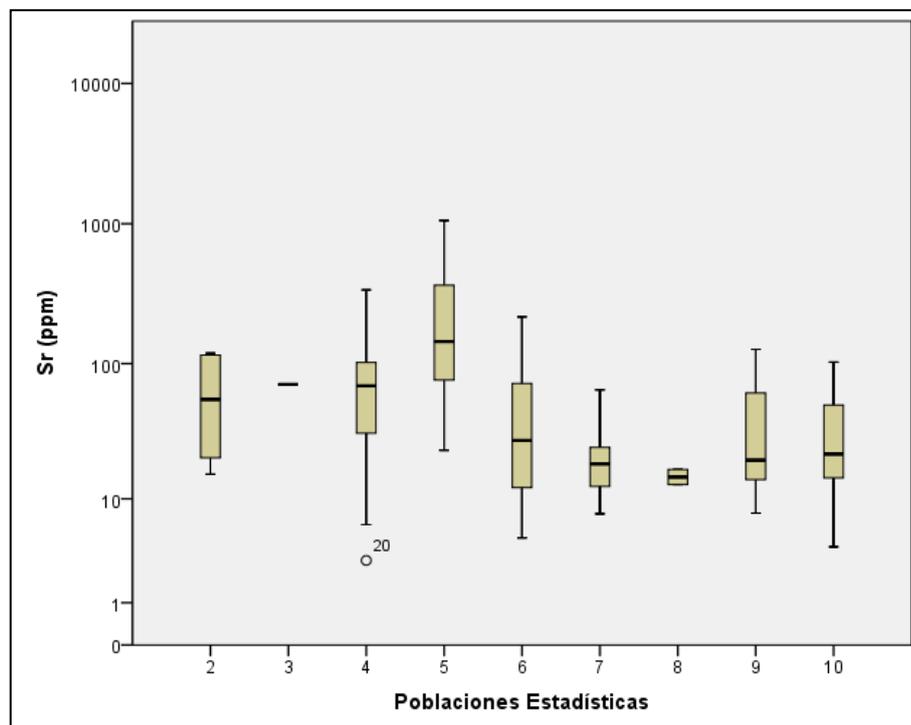
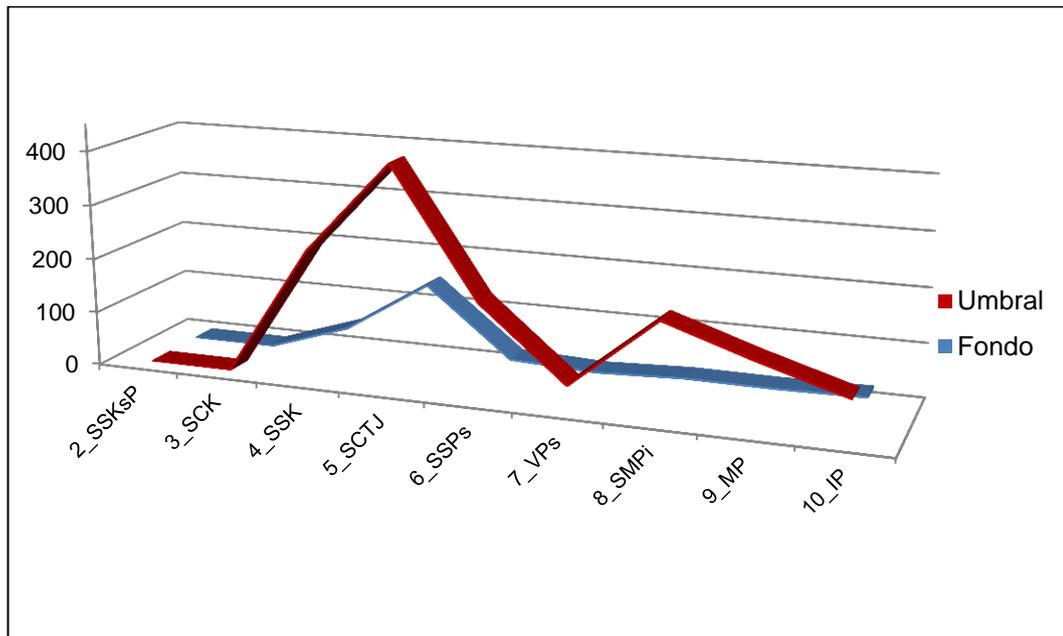


Figura 4.32. Box plots de estroncio en las nueve poblaciones.



| Sr_ppm | 2_SSKsp | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| Fondo | - | - | 51.69 | 149.79 | 24.81 | 18.11 | 24.81 | 23.78 | 26.09 |
| Umbral | - | - | 239.64 | 407.79 | 174.57 | 42.36 | 174.57 | 121.96 | 73.97 |

Figura 4.33. Niveles de fondo y umbrales de estroncio en la intercuenca Alto Maraón IV.

El estroncio definió 19 anomalías en los siguientes dominios: intrusivos del Paleozoico (11), metamórficos del Proterozoico (1), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (1), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-15-18).

La anomalía de mayor intensidad se registró en el dominio sedimentario carbonatado del Triásico Jurásico ($\geq 2T < 3T$), donde, se dispersan sedimentos fluviales procedentes de las calizas de la Formación Aramachay. En el río Cujibamba forma un halo de dispersión de hasta 7 km de longitud.

4.1.2.16. Distribución y anomalías geoquímicas de vanadio (V)

El vanadio presenta una distribución asimétrica en todas las poblaciones estudiadas (Figura 4.34). Se observa un buen contraste entre los valores de fondo y el umbral, el valor de fondo máximo se tienen en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) con 64.24 ppm y el valor mínimo ocurre en la población sedimentaria silicoclástica del Cretáceo (4_SSK) con 35.39 ppm.

El umbral geoquímico mayor se calculó en la población volcánica del Paleozoico superior (7_VPs) con 169.60 ppm, mientras que el valor menor en la población sedimentaria silicoclástica del Cretáceo (4_SSK) con 69.10 ppm (Figura 4.35).

Es importante mencionar que el umbral calculado en la población de rocas intrusivas del Paleozoico es de 112.74 ppm y en la población metamórfica del Proterozoico es de 105.36 ppm (Figura 4.35).

Se determinaron 15 anomalías de vanadio en los siguientes dominios: intrusivos del Paleozoico (4), metamórficos del Proterozoico (1), sedimentarios y metamórficos silicoclásticos del paleozoico inferior (1), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (3), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-16-18).

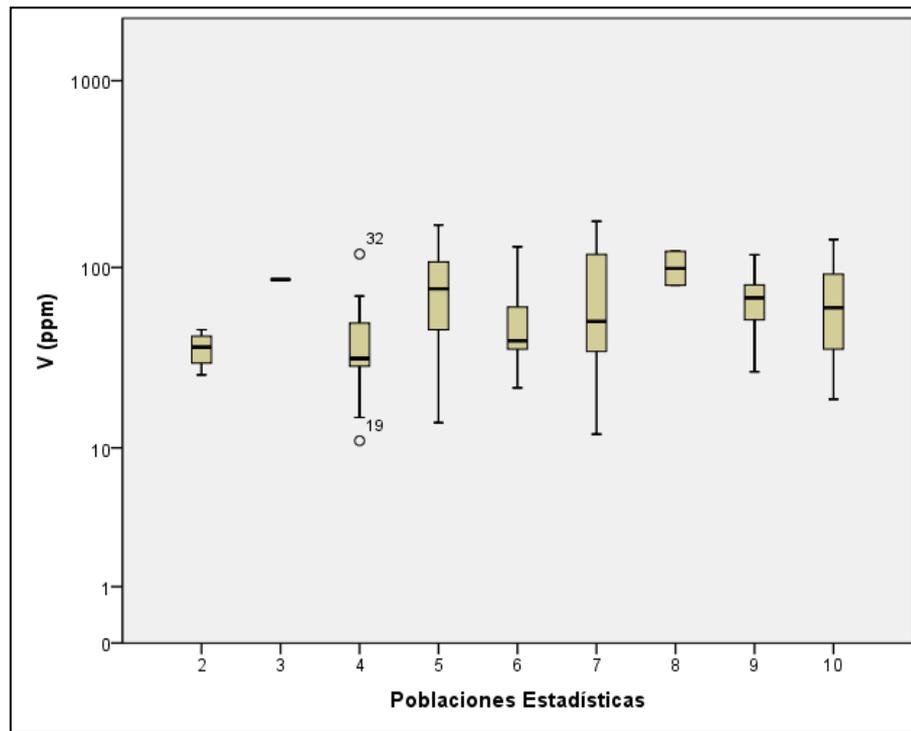
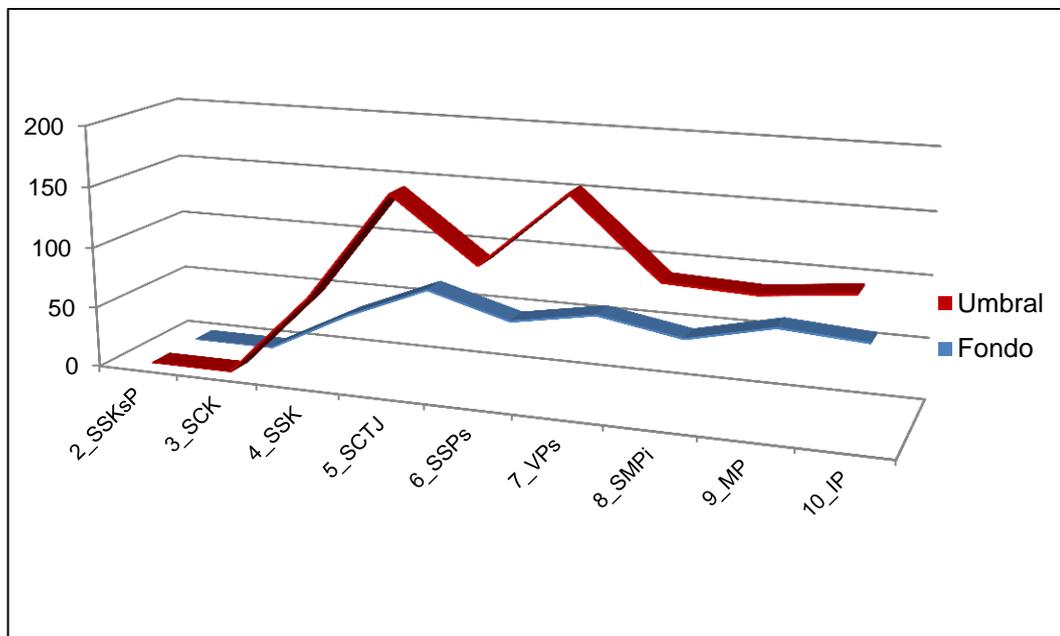


Figura 4.34. Box plots de vanadio en las nueve poblaciones.



| V_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fondo | - | - | 35.39 | 64.24 | 44.63 | 56.89 | 44.63 | 60.89 | 56.09 |
| Umbral | - | - | 69.10 | 158.90 | 108.22 | 169.60 | 108.22 | 105.36 | 112.74 |

Figura 4.35. Niveles de fondo y umbrales de vanadio en la intercuenca Alto Marañón IV.

4.1.2.17. Distribución y anomalías geoquímicas de lantano (La)

El lantano presenta una distribución asimétrica en las poblaciones estudiadas, a excepción de la población volcánica del Paleozoico superior (7_VPs) donde muestra una tendencia log normal (Figura 4.36).

Los valores de fondo varían de 11.11 ppm en sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo a 23.62 ppm en intrusivos del Paleozoico. La población de unidades metamórficas del Proterozoico (9_MP), se observa mayor dispersión en relación a las demás poblaciones, esta población revela el máximo valor del umbral con 60.90 ppm y el valor mínimo ocurre en unidades sedimentarias carbonatadas del Triásico Jurásico (5_SCTJ) (Figura 4.37). El valor de fondo de la población de rocas intrusivas del Paleozoico (10_IP) es de 23.62 ppm y su umbral es de 43.45 (Figura 4.37).

El lantano define 13 anomalías geoquímicas, en el dominio intrusivo se determinó la mayor cantidad de anomalías (4), mientras que, en el dominio metamórfico del Proterozoico se definió solo una anomalía. Asimismo, se definieron anomalías en los volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (2), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (MAPA-17-18).

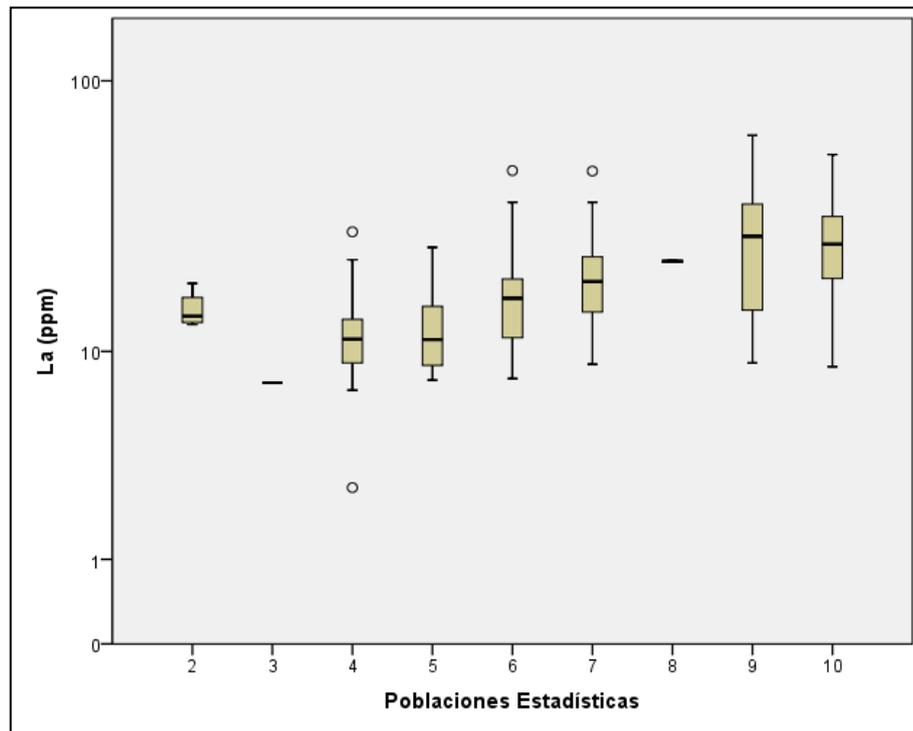
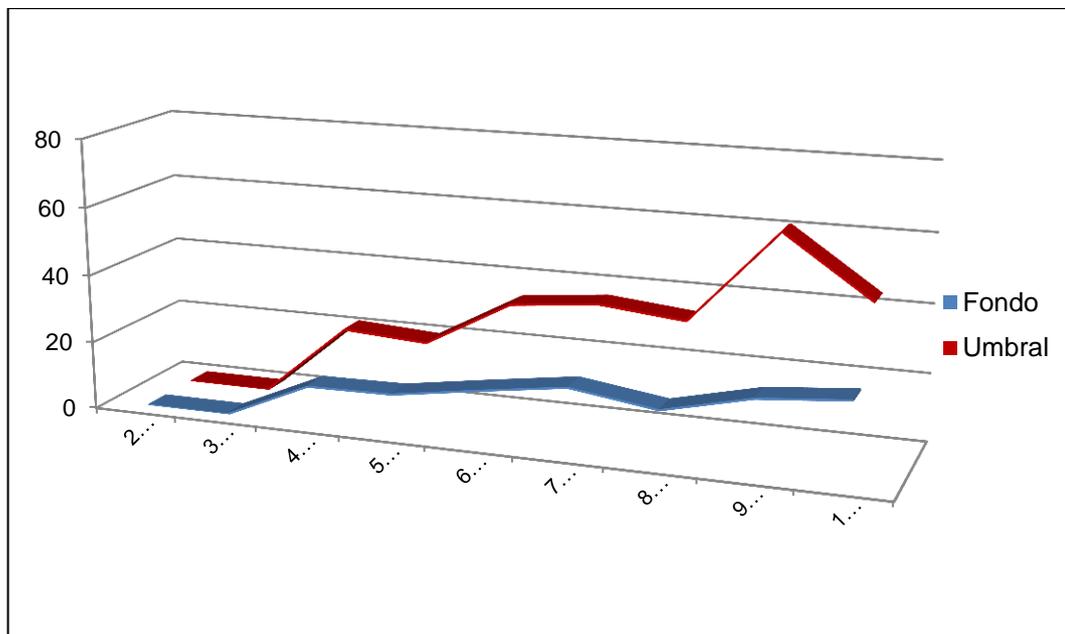


Figura 4.37. Box plots de lantano en las nueve poblaciones.



| La_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Fondo | - | - | 11.11 | 11.48 | 15.32 | 18.95 | 15.32 | 21.33 | 23.62 |
| Umbral | - | - | 21.27 | 19.68 | 33.52 | 36.06 | 33.52 | 60.90 | 43.45 |

Figura 4.38. Niveles de fondo y umbrales de lantano en la intercuenca Alto Marañón IV.

4.1.2.18. Distribución y anomalías geoquímicas de cerio (Ce)

El cerio presenta similar comportamiento al lantano, su distribución es asimétrica en las poblaciones estudiadas, a excepción de la población volcánica del Paleozoico superior (7_VPs) donde muestra una tendencia log normal (Figura 4.39).

En la población sedimentaria silicoclástica del Cretáceo (4_SSK) se determinó el mínimo valor de fondo con 26.42 ppm y el máximo en la población intrusiva del Paleozoico (10_IP) con 60.28 ppm. En tanto que el valor máximo del umbral corresponde a la población metamórfica del Proterozoico (9_MP) con 138.22 ppm y el umbral mínimo a sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (5_SCTJ) (Figura 4.40).

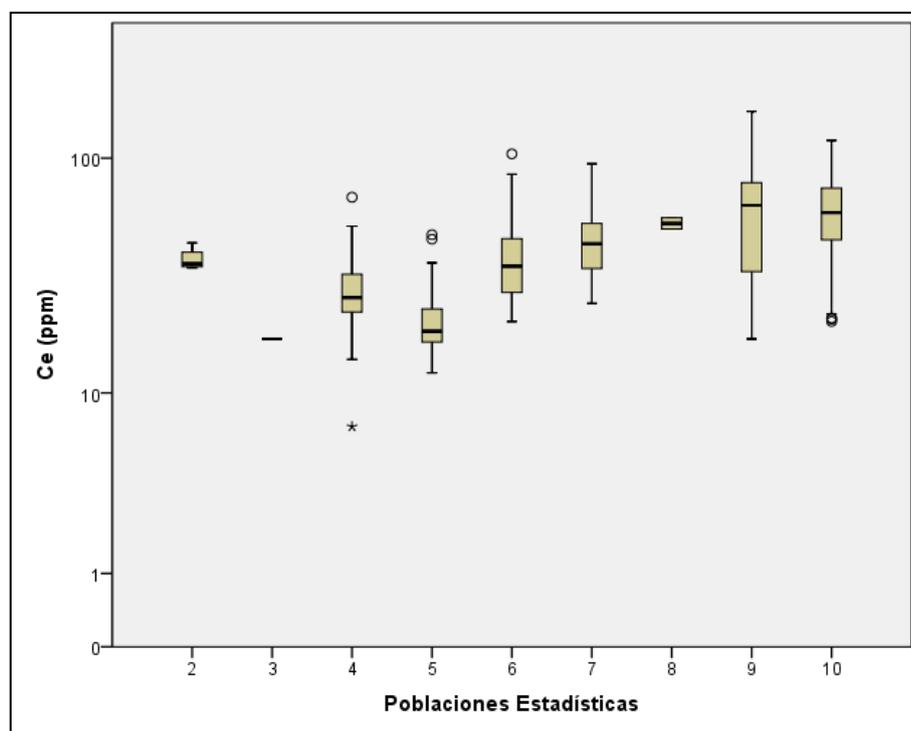
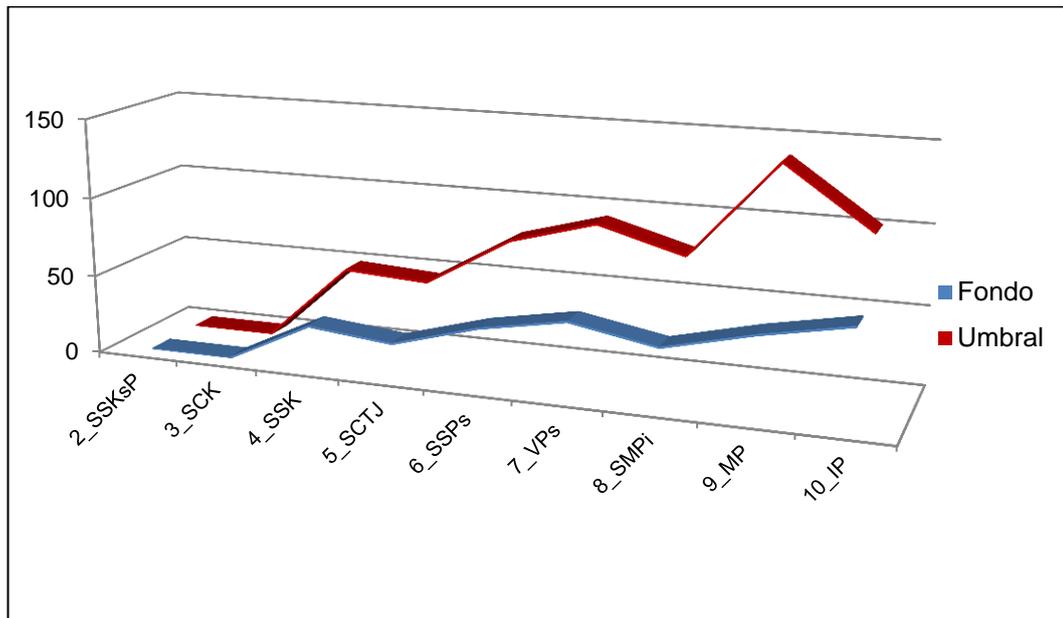


Figura 4.39. Box plots de cerio en las nueve poblaciones.



| Ce_ppm | 2_SSKsp | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Fondo | - | - | 26.42 | 21.07 | 36.42 | 46.25 | 36.42 | 49.68 | 60.28 |
| Umbral | - | - | 48.73 | 45.53 | 77.19 | 92.33 | 77.19 | 138.22 | 100.31 |

Figura 4.40. Niveles de fondo y umbrales de cerio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Al igual que el lantano, la mayor cantidad de anomalías de Cerio se registró en el dominio intrusivo del Paleozoico (3), en tanto que en el dominio metamórfico del Proterozoico se definió solo una anomalía. También, se registraron anomalías en los dominios volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (2), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (MAPA-18-18).

Las intensidades de anomalías de cerio en todos los dominios estudiados, se encuentran en el rango de $\geq T$ a $2T$.

4.1.2.19. Distribución y anomalías geoquímicas de terbio (Tb)

En la figura se observa la distribución asimétrica del terbio en todas las poblaciones estudiadas (Figura 4.41). Los valores de fondo se encuentran en un rango de 0.39 ppm a 0.66 ppm, el máximo valor ocurre en la población intrusiva del Paleozoico (10_IP) y el mínimo valor en la población sedimentaria silicoclástica del Cretáceo (SSK).

Los umbrales calculados se encuentran en el rango de 0.61 ppm a 1.42 ppm, destacando el mayor valor en la población de unidades metamórficas del Proterozoico (9_MP) y el menor valor en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) (Figura 4.42).

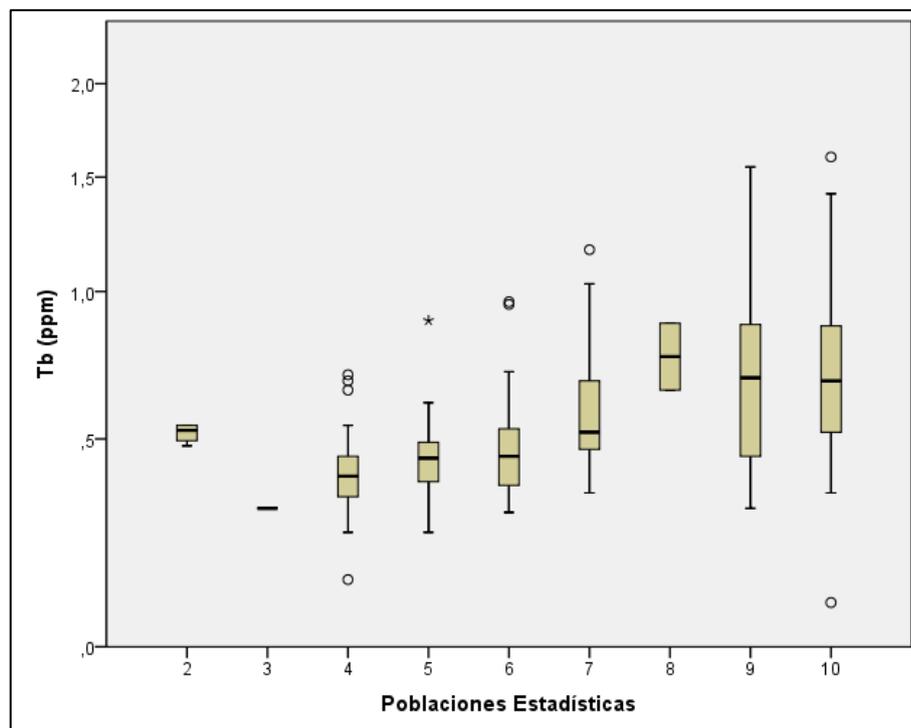
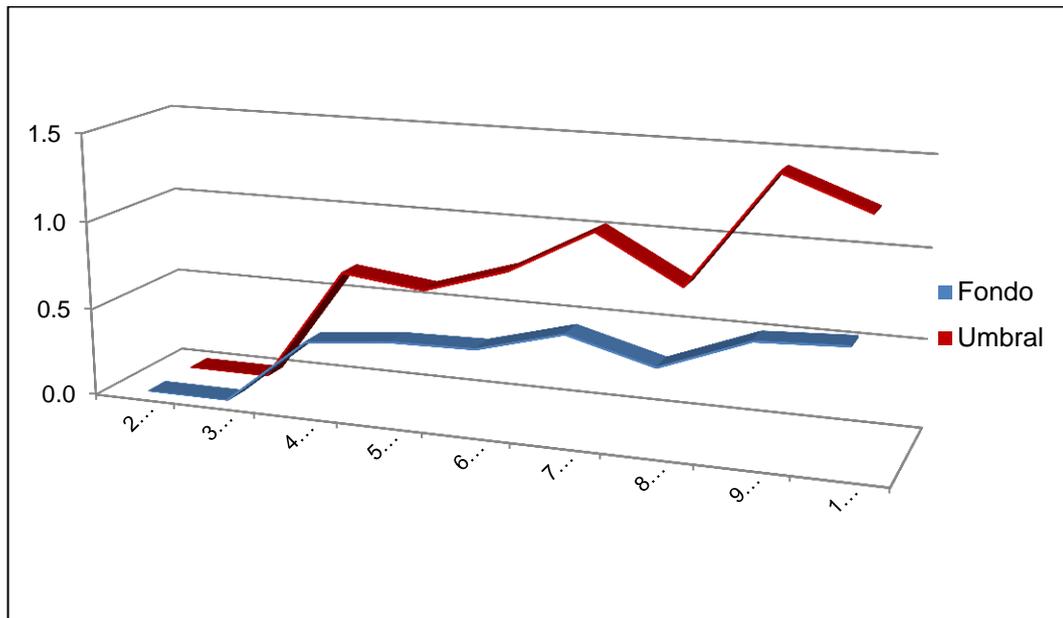


Figura 4.41. Box plots de terbio en las nueve poblaciones.



| Tb_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|
| Fondo | - | - | 0.39 | 0.44 | 0.45 | 0.58 | 0.45 | 0.64 | 0.66 |
| Umbral | - | - | 0.67 | 0.61 | 0.76 | 1.02 | 0.76 | 1.42 | 1.23 |

Figura 4.42. Niveles de fondo y umbrales de terbio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Se determinaron 16 anomalías de terbio, de los cuales 6 corresponde al dominio intrusivo del Paleozoico, (1) metamórficos del Proterozoico, (1) sedimentarios y metamórficos del Paleozoico inferior, (2) volcánicos del paleozoico superior, (2) sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior, (2) sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico, (2) sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (MAPA-19-18).

En todos los dominios estudiados las concentraciones de terbio superan en una vez el valor del *threshold* de cada dominio litoestratigráfico.

4.1.2.20. Distribución y anomalías geoquímicas de escandio (Sc)

El escandio denota una tendencia de distribución asimétrica en las poblaciones estudiadas (Figura 9.39). Los valores de fondo fluctúan de 3.36 ppm a 5.95 ppm, reportándose el mayor valor en la población de rocas metamórficas del Proterozoico (9_MP) y el menor valor en la población sedimentaria silicoclástica del Cretáceo (4_SSK) (Figura 4.43).

Los umbrales guardan un contraste positivo a los valores de fondo, de manera que las unidades más antiguas tienen valores altos, como es el caso de la población metamórfica del Proterozoico cuyo valor es de 14.97 ppm, y el menor valor corresponde a la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) su valor calculado es 5.58 ppm (Figura 4.44).

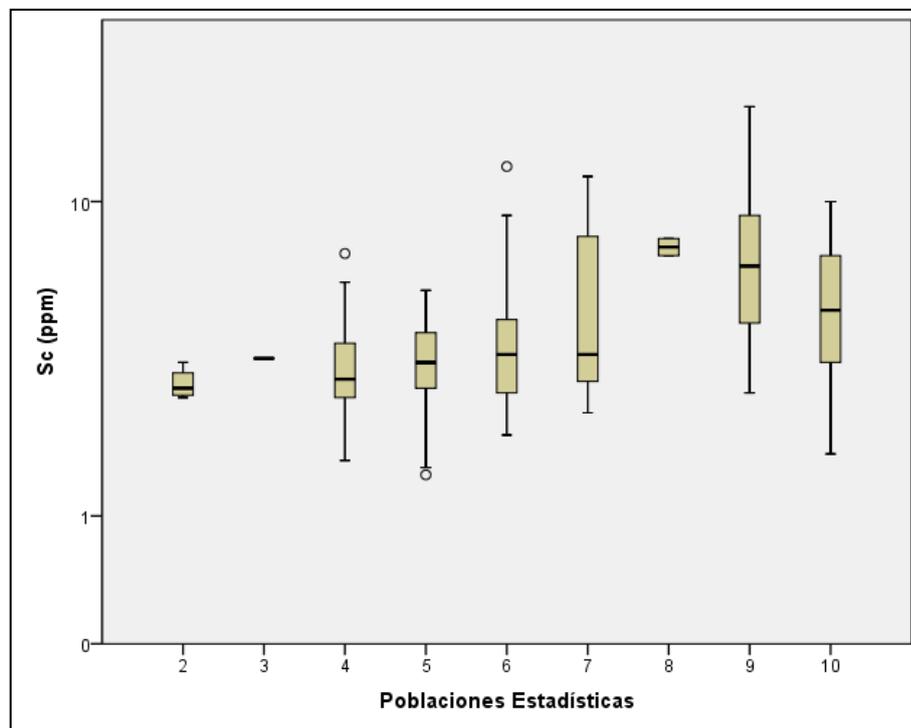
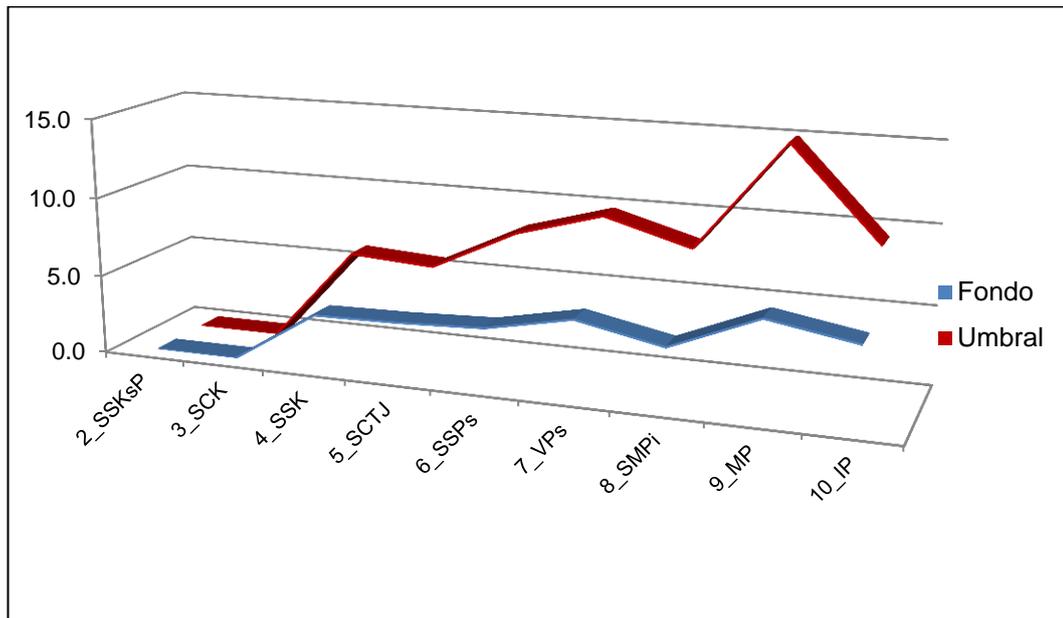


Figura 4.43. Box plots de escandio en las nueve poblaciones.



| Sc_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Fondo | - | - | 3.36 | 3.45 | 3.67 | 4.77 | 3.67 | 5.95 | 5.01 |
| Umbral | - | - | 5.92 | 5.58 | 8.20 | 9.74 | 8.20 | 14.97 | 9.30 |

Figura 4.44. Niveles de fondo y umbrales de escandio en la intercuenca Alto Marañón IV.

El escandio define 15 anomalías geoquímicas distribuidos en los siguientes dominios litoestratigráficos: intrusivos del Paleozoico (5), metamórficos del Proterozoico (1), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del paleozoico superior (3), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-20-18).

Al igual que el elemento descrito anteriormente, el escandio presenta una intensidad mayor a una vez el valor del *threshold* pero menor a dos veces el umbral geoquímico.

4.1.2.21. Distribución y anomalías geoquímicas de itrio (Y)

Se observan distribuciones asimétricas en las poblaciones estudiadas (Figura 4.45), con valores de fondo que varían de 10.29 ppm a 19.44 ppm, el valor mayor se reportó en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (4_SCTJ) y el menor en sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (4_SSK).

En la población de unidades intrusivas del Paleozoico (10_IP) ocurre el mayor valor del umbral geoquímico, cuyo valor es de 35.08 ppm, mientras que en la población sedimentaria silicoclástica del Paleozoico superior (6_SSPs) el mínimo valor es de 18.28 ppm (Figura 4.46).

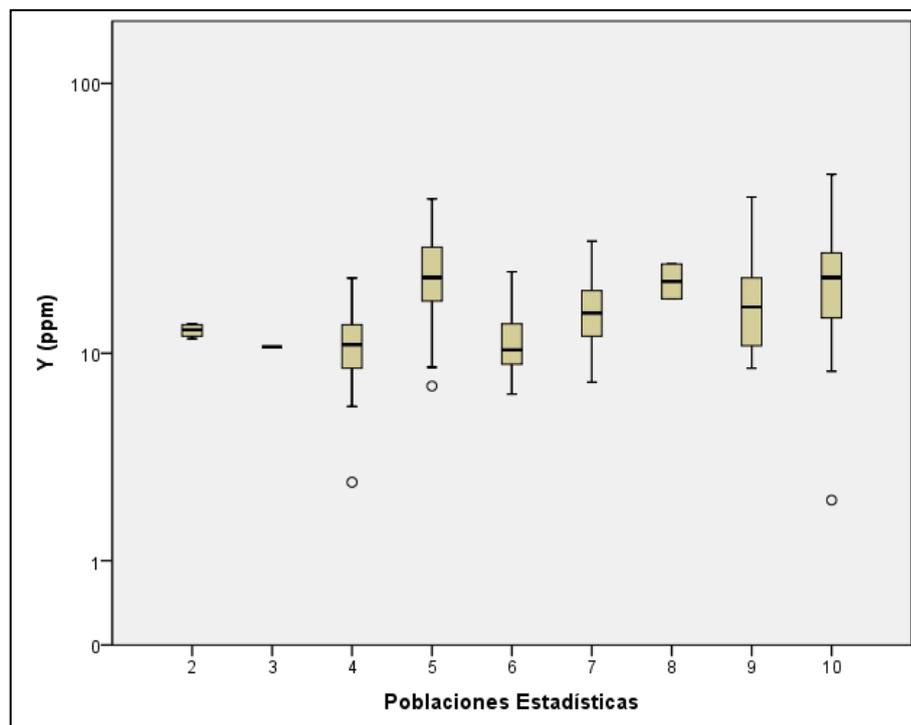
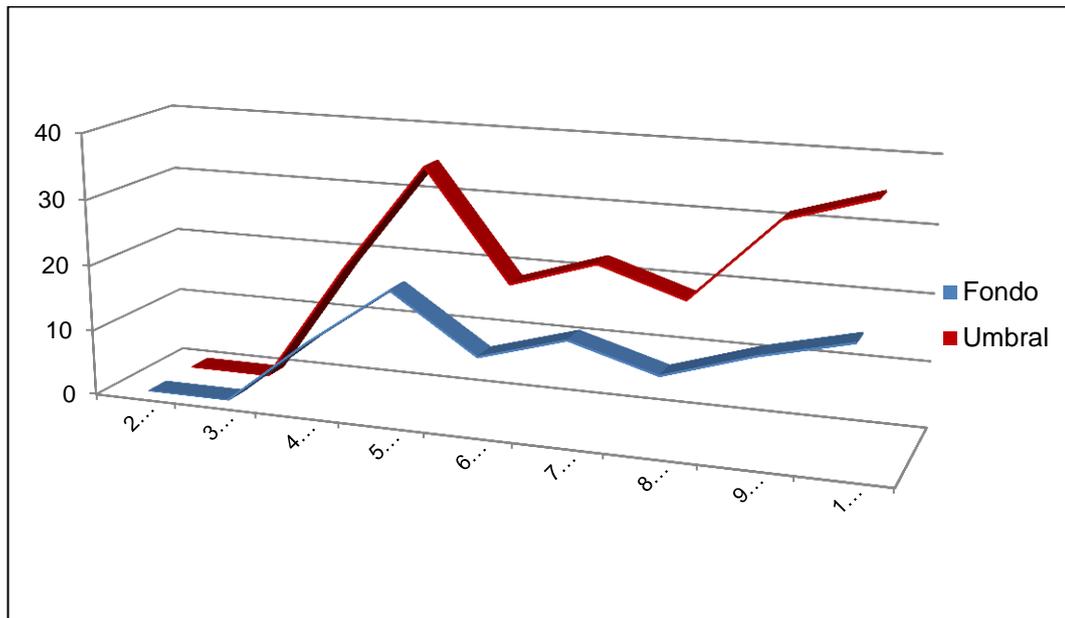


Figura 4.45. Box plots de itrio en las nueve poblaciones.



| Y_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Fondo | - | - | 10.29 | 19.44 | 10.82 | 14.62 | 10.82 | 14.99 | 18.19 |
| Umbral | - | - | 18.40 | 34.98 | 18.28 | 22.48 | 18.28 | 31.08 | 35.08 |

Figura 4.46. Niveles de fondo y umbrales de itrio en la intercuenca Alto Maraón IV.

Se determinó 13 anomalías de itrio, de las cuales 5 corresponden al dominio intrusivo, 1 a metamórficos del proterozoico, 2 a volcánicos del Paleozoico superior, 1 a sedimentarios silicoclásticos del paleozoico superior, 2 a sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico y 2 a sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (MAPA-21-18).

Cabe resaltar que, en todos los dominios litoestratigráficos estudiados, la concentración de itrio presenta intensidades débiles ($\geq T < 2T$).

4.1.2.22. Distribución y anomalías geoquímicas de niobio (Nb)

La tendencia de distribución del niobio es asimétrica, los valores altos erráticos se observan en las poblaciones sedimentarias silicoclásticas del

Cretáceo (4_SSK) y en sedimentarias carbonatadas del Triásico Jurásico (5_SCTJ) (Figura 4.47).

La población de unidades intrusivas del Paleozoico (10_IP) es la que reporta los mayores valores de fondo y umbral con 0.67 ppm y 3.53 ppm respectivamente. En tanto que los valores menores ocurre en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) cuyos valores de fondo y umbral son 0.14 ppm y 0.63 ppm respectivamente (Figura 4.48).

Se determinó 10 anomalías de niobio distribuido en los siguientes dominios litoestratigráficos: intrusivos del Paleozoico (1), metamórficos del Neoproterozoico (1), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (2), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentario silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-22-18).

Cabe resaltar que, en todos los dominios litoestratigráficos estudiados, la concentración de niobio presenta intensidades débiles ($\geq T < 2T$).

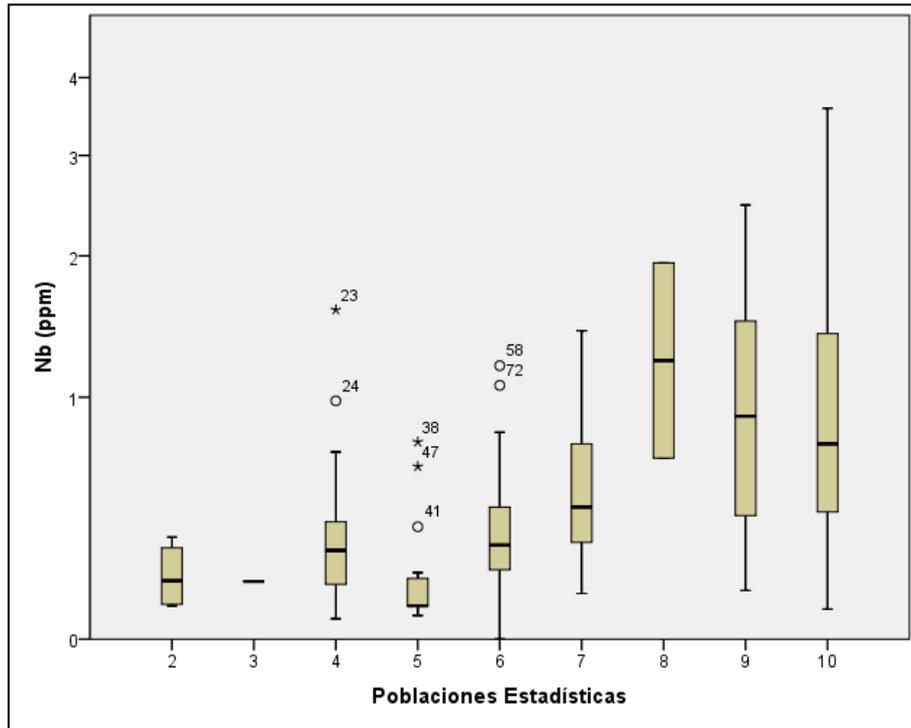
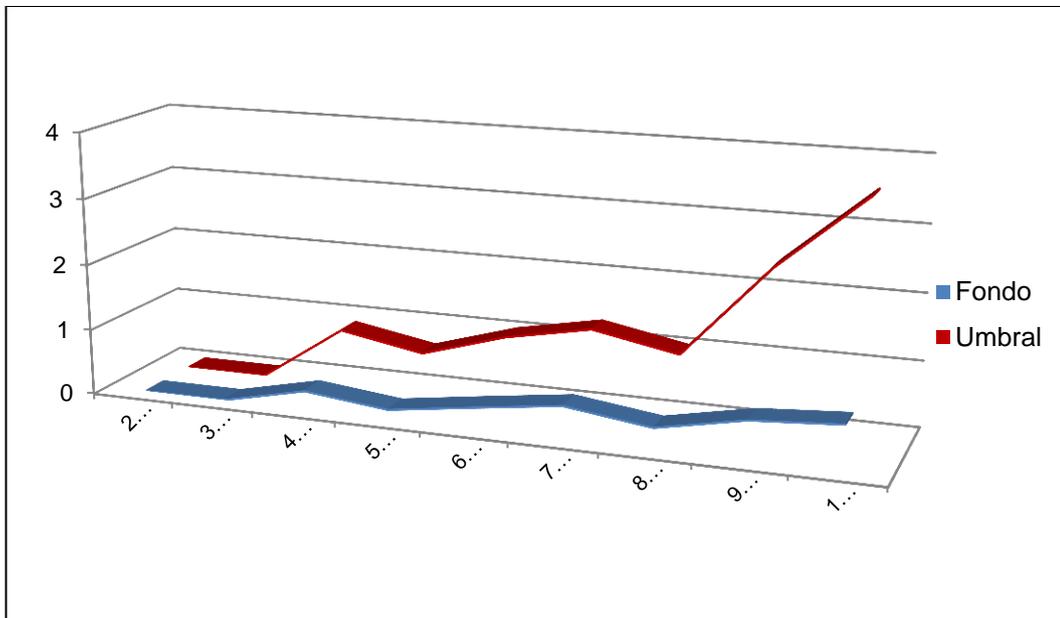


Figura 4.47. Box plots de niobio en las nueve poblaciones.



| Nb_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|
| Fondo | - | - | 0.28 | 0.14 | 0.32 | 0.49 | 0.32 | 0.58 | 0.67 |
| Umbral | - | - | 0.86 | 0.63 | 1.01 | 1.26 | 1.01 | 2.42 | 3.53 |

Figura 4.48. Niveles de fondo y umbrales de niobio en la intercuenca Alto Maraón IV.

4.1.2.23. Distribución y anomalías geoquímicas de galio (Ga)

El galio en todas las poblaciones estadísticas tiene una distribución asimétrica (Figura 4.49). Los valores de fondo varían de 2.17 ppm a 6.07 ppm, obteniendo el valor mayor en la población volcánica del Paleozoico superior (7_VPs) y el menor en la población sedimentaria carbonatada del Cretáceo (5_SCTJ) (Figura 4.50).

En relación al umbral geoquímico, el valor mayor corresponde a la población intrusiva del Paleozoico (10_IP) con 12.49 ppm y el menor valor a la población sedimentaria silicoclástica del cretáceo (4_SSK) con 5.06 ppm.

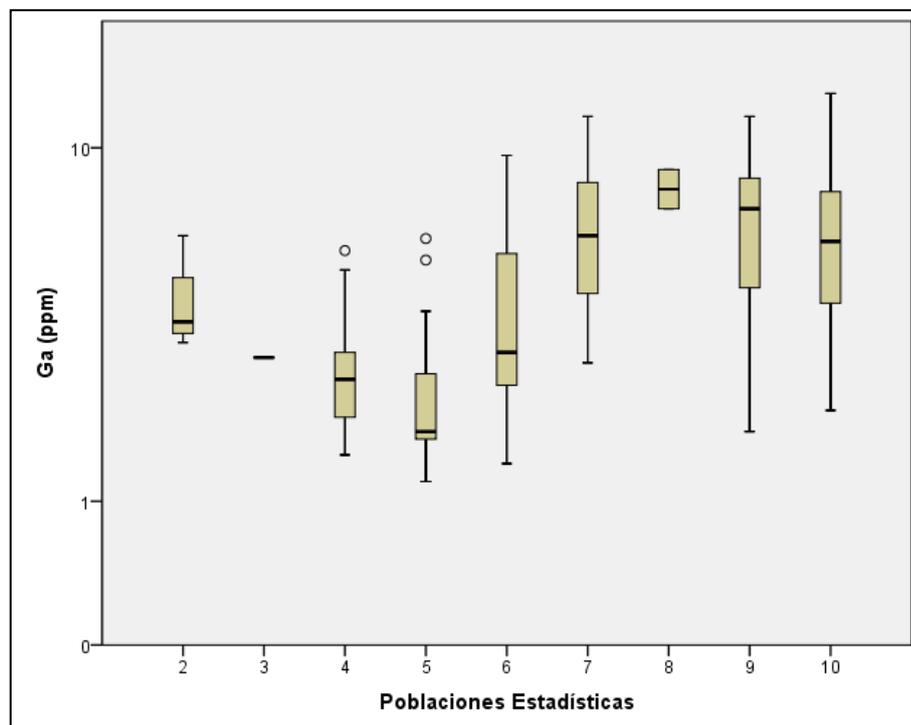
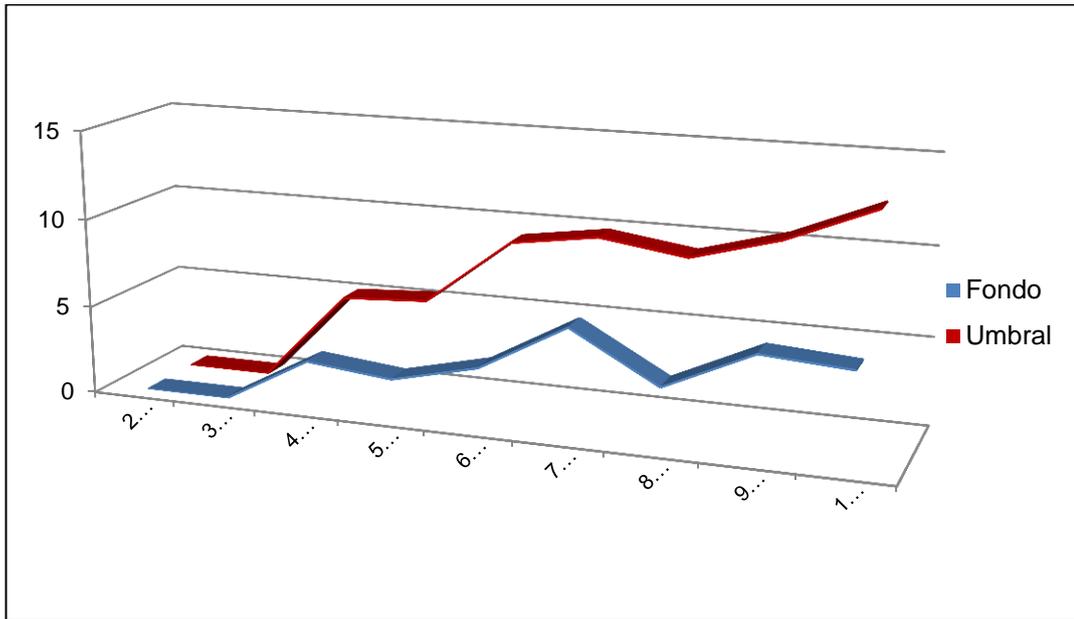


Figura 4.49. Box plots de galio en las nueve poblaciones.



| Ga_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Fondo | - | - | 2.67 | 2.17 | 3.33 | 6.07 | 3.33 | 5.64 | 5.30 |
| Umbral | - | - | 5.06 | 5.33 | 9.09 | 9.80 | 9.09 | 10.44 | 12.49 |

Figura 9.50. Niveles de fondo y umbrales de galio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Se determinó 14 anomalías geoquímicas de galio, distribuidos de la siguiente manera: intrusivos del Paleozoico (1), metamórficos del Proterozoico (3), volcánico del Paleozoico superior (3), sedimentario silicoclásticos del Paleozoico superior (3), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-23-18).

En todos los dominios litoestratigráficos estudiados la concentración de galio presenta anomalías de intensidades débiles ($\geq T < 2T$).

4.1.2.24. Distribución y anomalías geoquímicas de torio (Th)

La distribución del torio tiene una tendencia asimétrica en todas las poblaciones (Figura 4.51). Los valores de fondo se encuentran en un rango de 3.09 ppm a 10.70 ppm, el mayor valor se tiene en la población de unidades intrusivas del Paleozoico (10_IP) y el menor valor en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) (Figura 9.47).

Las unidades intrusivas del Paleozoico (10_IP) son las que muestran el valor mayor del umbral, en tanto que el menor valor corresponde a la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) (Figura 4.52).

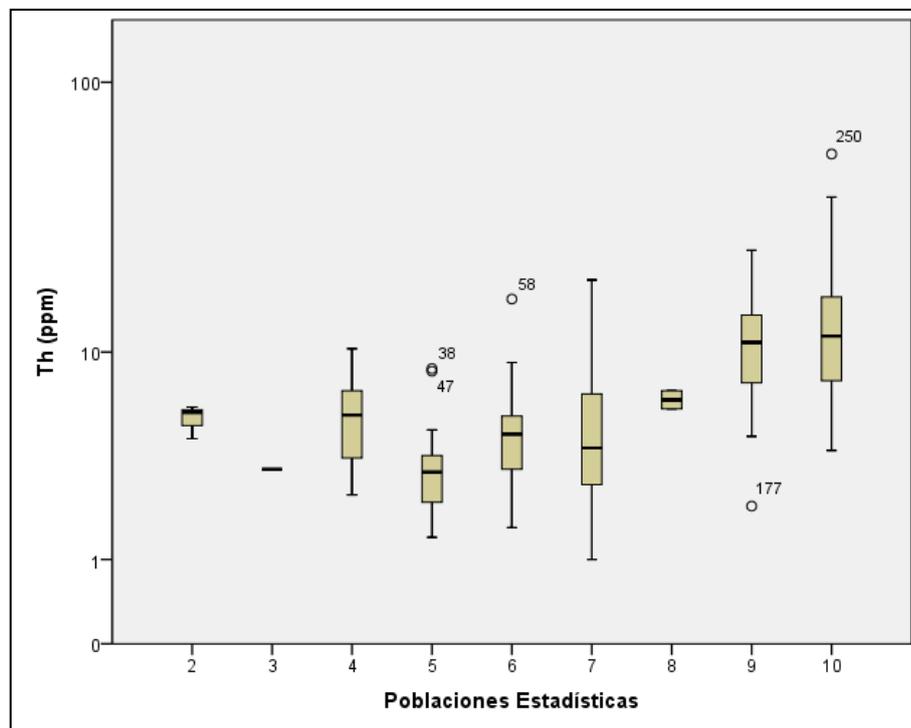
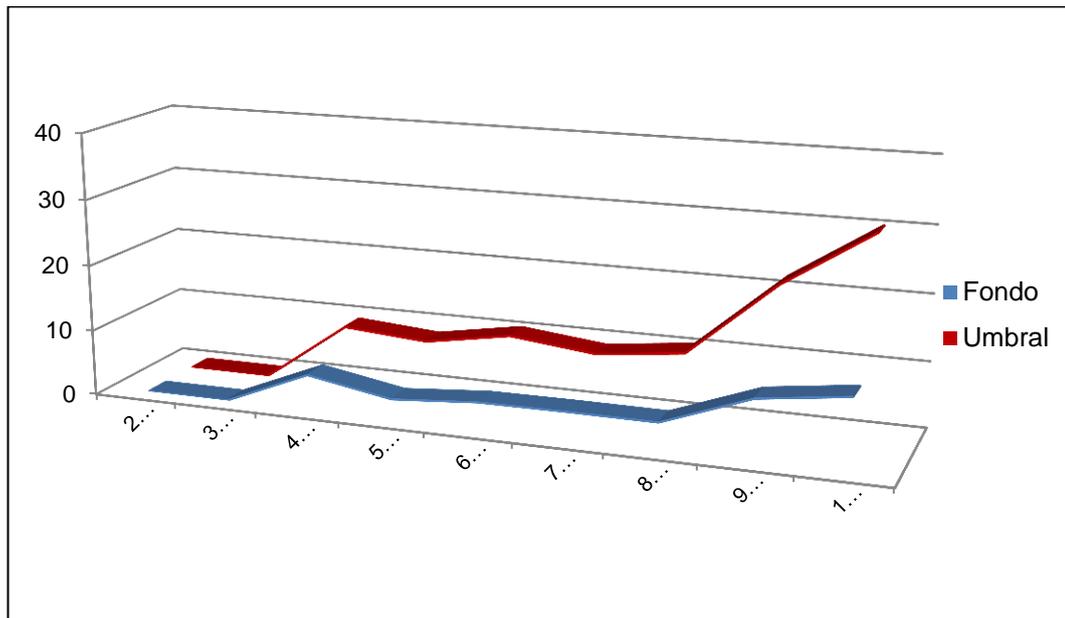


Figura 4.51. Box plots de torio en las nueve poblaciones.



| Th_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Fondo | - | - | 5.37 | 3.09 | 4.08 | 4.14 | 4.08 | 9.01 | 10.70 |
| Umbral | - | - | 9.23 | 8.22 | 10.39 | 8.93 | 10.39 | 21.78 | 30.27 |

Figura 4.52. Niveles de fondo y umbrales de torio en la intercuenca Alto Marañón IV.

Las 13 anomalías de torio se definieron en los siguientes dominios litoestratigráficos: intrusivos del Paleozoico (3), metamórficos del Proterozoico (3), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (1), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-24-18).

La anomalía de mayor intensidad ($\geq 2T < 3T$), es producto de la dispersión de sedimentos fluviales provenientes del dominio volcánico del Paleozoico, se ubica en la quebrada Chunina, en esta estación el torio se asocia a Mo, Au, Nb, Yb y Lu.

4.1.2.25. Distribución y anomalías geoquímicas de uranio (U)

La distribución del uranio es asimétrica en las poblaciones estudiadas, los valores erráticos se observan en las poblaciones intrusivas del Paleozoico (10_IP) y en los sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (4_SSK) (Figura 4.53).

Los valores de fondo se encuentran en el rango de 0.92 ppm a 2.49 ppm, el valor mayor ocurre en la población intrusiva del Paleozoico (10_IP) y el menor valor en la población sedimentaria silicoclástica del Paleozoico superior (6_SSPs).

El umbral mayor se reporta en el ambiente de unidades intrusivas del Paleozoico (10_IP) con 10.14 ppm, en tanto que el menor valor ocurre en la población sedimentaria silicoclástica del Paleozoico superior (6_SSPs) (Figura 4.54).

La mayor cantidad de anomalías de uranio se definió en el dominio intrusivo del Paleozoico (7), seguido por los volcánicos del Paleozoico superior (3), metamórficos del Proterozoico (2), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2), sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) y sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (1) (MAPA-25-18).

En las quebradas El Tambo, La plap y Sobre Lanchas, el uranio forma un halo de dispersión de hasta 4 km de longitud, en estas estaciones se dispersan sedimentos procedentes de los granitos del intrusivo del Paleozoico.

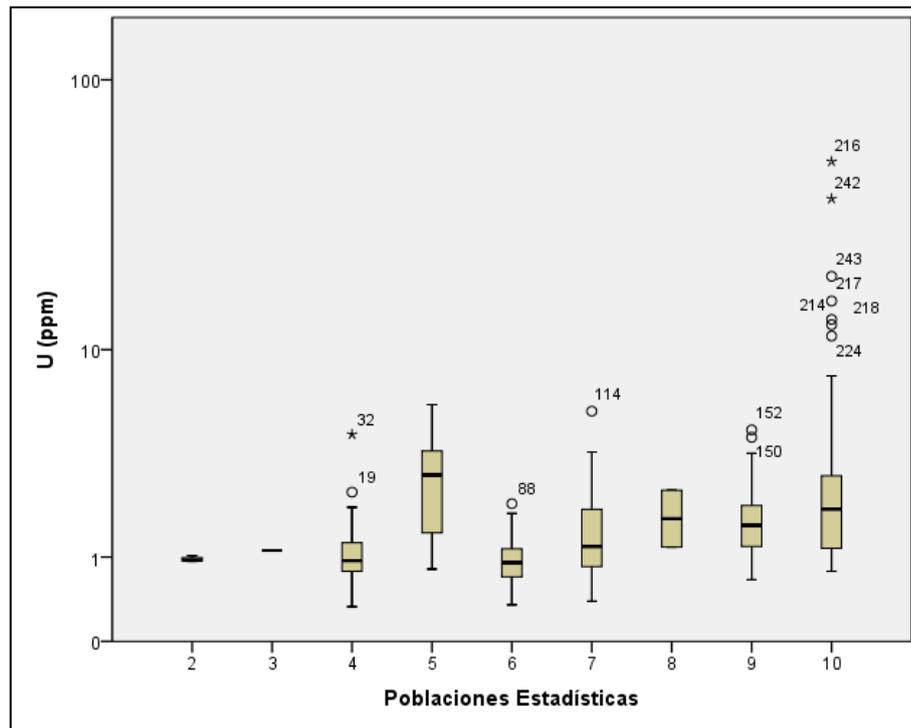
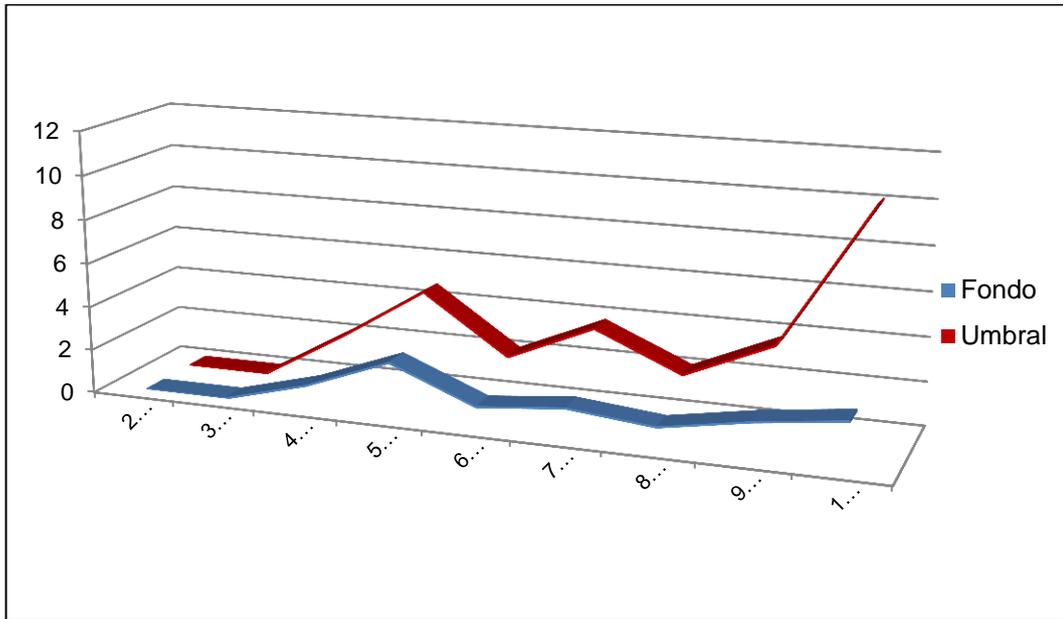


Figura 4.53. Box plots de uranio en las nueve poblaciones.



| U_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|
| Fondo | - | - | 1.02 | 2.49 | 0.92 | 1.31 | 0.92 | 1.60 | 2.09 |
| Umbral | - | - | 2.23 | 4.67 | 2.04 | 3.74 | 2.04 | 3.76 | 10.14 |

Figura 4.54. Niveles de fondo y umbrales de uranio en la intercuenca Alto Marañón IV.

4.1.2.26. Distribución y anomalías geoquímicas del Cesio (Cs)

La distribución del cesio en todas las poblaciones tiene una tendencia asimétrica positiva (Figura 4.55). Este elemento presenta el mayor valor de fondo en la población metamórfica del Proterozoico (9_MP) cuyo valor es de 2.51 ppm; en tanto el menor valor se determinó en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) con 1.59 ppm (Figura 4.55).

Los umbrales varían de 4.05 ppm a 6.34 ppm, los valores mayores se determinó en las poblaciones sedimentaria silicoclástica del Cretáceo (4_SSK) con 6.34 ppm y en la población metamórfica del Proterozoico

(9_MP) con 6.30 ppm. En la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (5_SCTJ) se reportó el mínimo valor del umbral (4.05 ppm) (Figura 4.56).

El cesio define 16 anomalías geoquímicas, donde, la mayor cantidad se registró en el dominio intrusivo del Paleozoico (5), seguidos de sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (3), metamórficos del Proterozoico (2), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (2) (MAPA-26-18).

La mayor concentración de cesio se registró en la quebrada La Chorrera (9.95 ppm) de la localidad Laurel, donde se dispersan sedimentos procedentes del dominio metamórfico del Proterozoico.

Por otro lado, la abundancia de cerio en los dominios estudiados definió anomalías con intensidades que superan en una vez el umbral geoquímico.

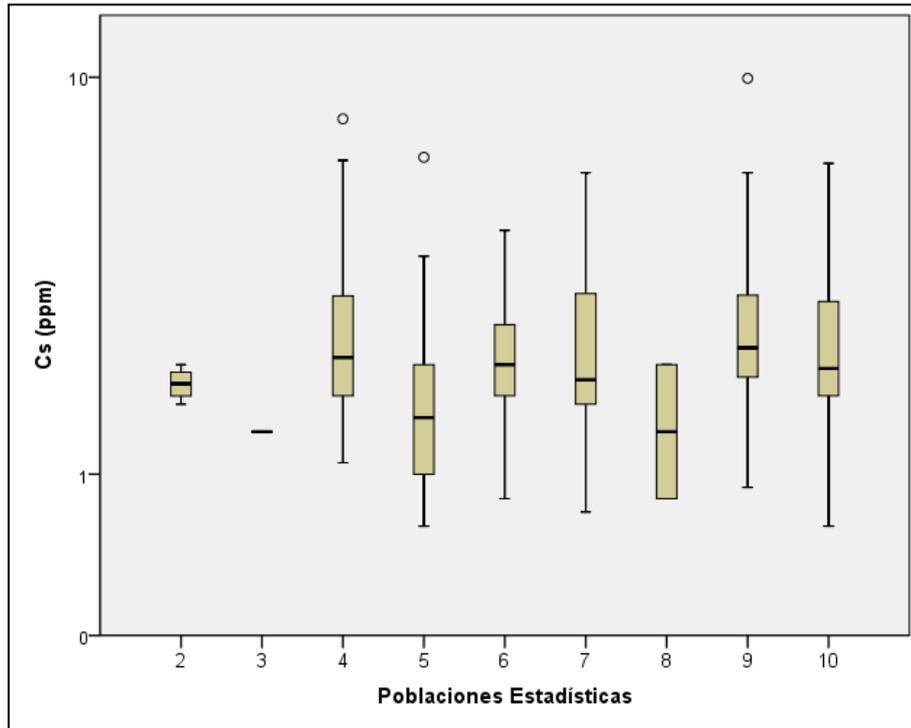
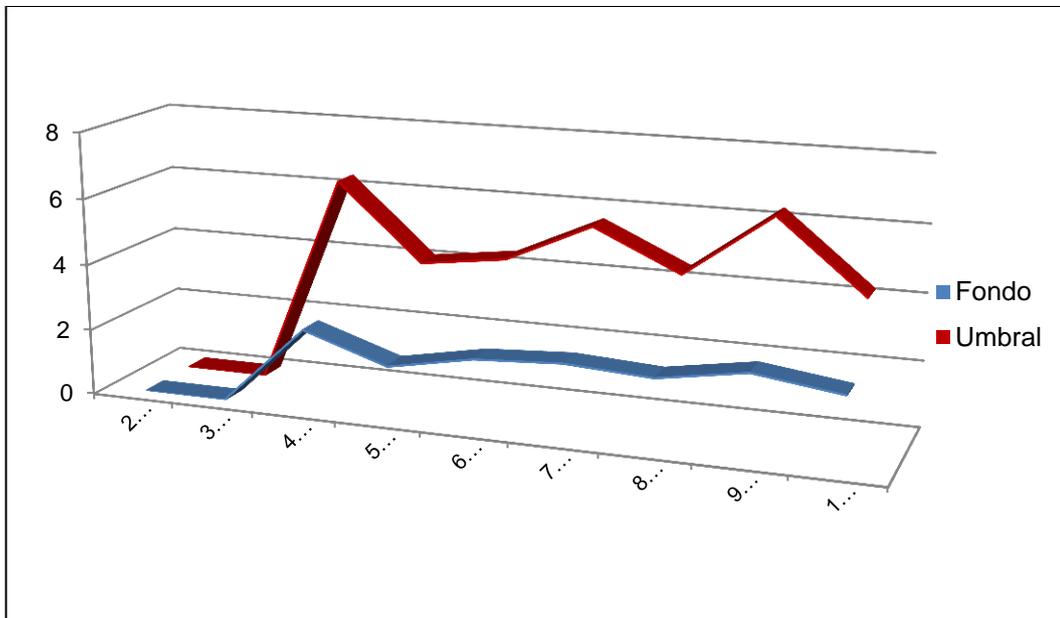


Figura 4.55. Box plots de cesio en las nueve poblaciones.



| Cs_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|
| Fondo | - | - | 2.43 | 1.59 | 2.08 | 2.23 | 2.08 | 2.51 | 2.16 |
| Umbral | - | - | 6.34 | 4.05 | 4.39 | 5.58 | 4.39 | 6.30 | 4.17 |

Figura 4.56. Niveles de fondo y umbrales de cesio en la intercuenca Alto Maraón IV.

4.1.2.27. Distribución y anomalías geoquímicas de rubidio (Rb)

Al igual que los otros elementos de tierras raras, la distribución del rubidio tiene una tendencia asimétrica (Figura 4.57).

Es muy notable que el mayor valor de fondo (18.19 ppm) y el mayor valor del umbral (58.10 ppm) ocurre en la población metamórfica del Proterozoico (10_MP). En tanto que los valores menores de fondo y umbral se reporta en la población sedimentaria carbonatada del Triásico Jurásico (Figura 4.58).

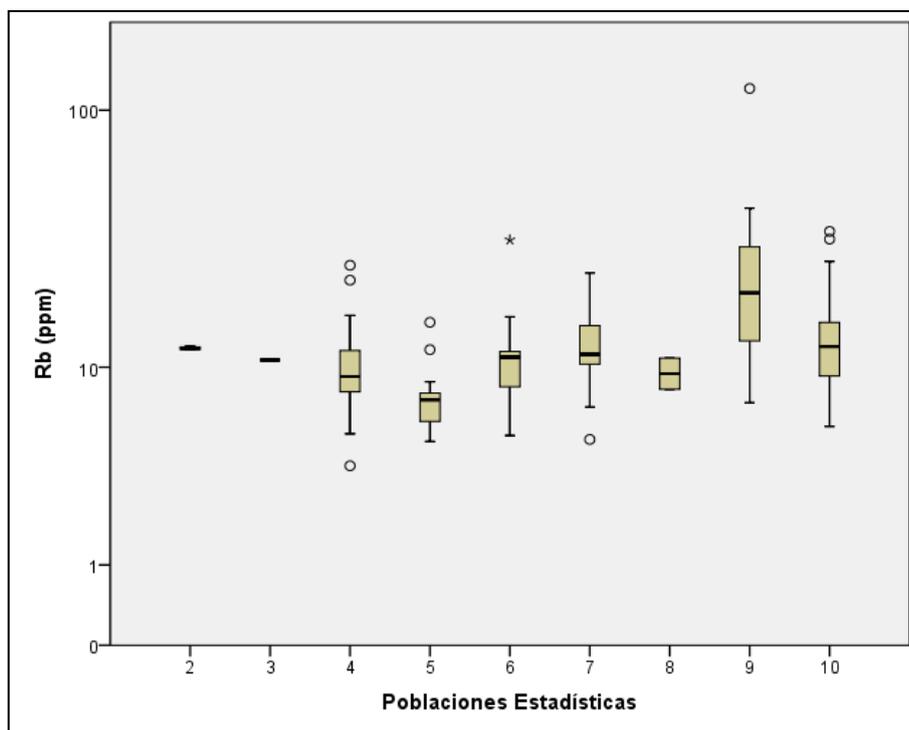
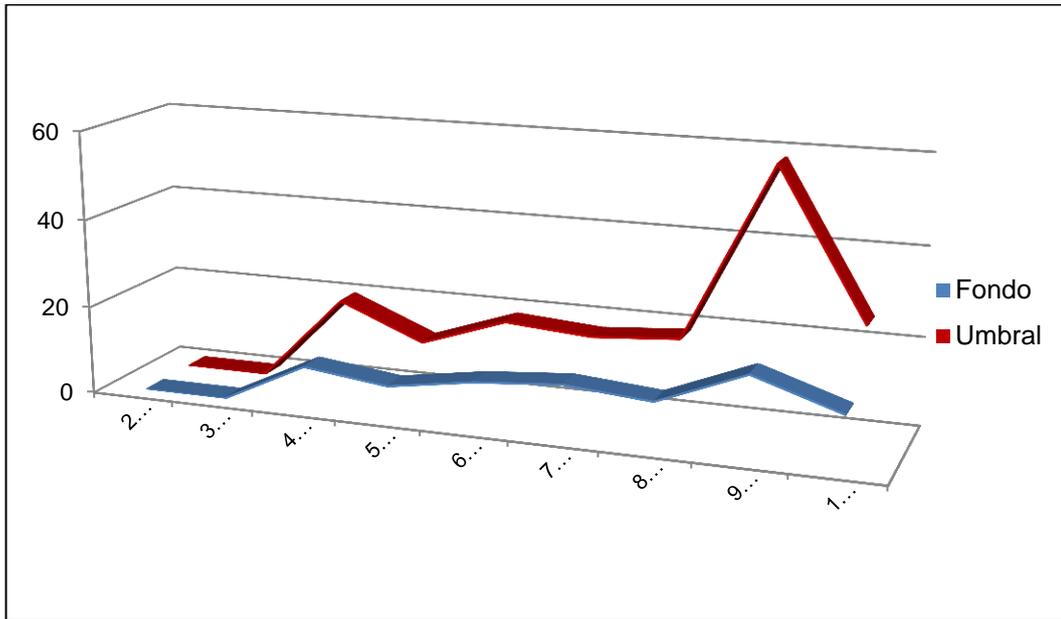


Figura 4.57. Box plots de rubidio en las nueve poblaciones.



| Rb_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Fondo | - | - | 9.50 | 7.15 | 10.19 | 11.78 | 10.19 | 18.19 | 11.76 |
| Umbral | - | - | 19.56 | 11.65 | 18.36 | 16.90 | 18.36 | 58.10 | 25.05 |

Figura 4.58. Niveles de fondo y umbrales de rubidio en la intercuenca Alto Maraón IV.

Se definieron 12 anomalías de rubidio compartidos en los siguientes dominios litoestratigráficos: intrusivos del Paleozoico (3), metamórficos del Proterozoico (1), volcánicos del Paleozoico superior (3), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (1), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclástico del Cretáceo (2) (MAPA-27-18).

Es importante mencionar que todas las anomalías de rubidio presentan intensidades débiles ($\geq T < 2T$). La mayor concentración de rubidio es producto de la dispersión de sedimentos fluviales provenientes de

unidades metamórficas del proterozoico y se ubica en la quebrada La Chorrera, asociada a Cs, Ga, Sc y V.

4.1.2.28. Distribución y anomalías geoquímicas del Iterbio (Yb)

El iterbio muestra una distribución asimétrica positiva en la mayoría de casos (Figura 4.59). Las concentraciones promedias varían de 0.72 ppm a 1.40 ppm, destaca la población intrusiva del Paleozoico (10_IP) por tener el mayor valor calculado, mientras que el menor valor se relaciona a la población sedimentaria silicoclástica del Cretáceo (4_SSK).

Similar comportamiento se observa para los umbrales, donde el máximo valor (3.36 ppm) ocurre en la población que reporta el mayor valor de fondo (10_IP), en tanto que el menor valor del umbral (1.20 ppm) reporta menor valor de fondo (4_SSK) (Figura 4.60).

Se definieron 13 anomalías de iterbio en los siguientes dominios litoestratigráficos: intrusivos del Paleozoico (3), metamórficos del Proterozoico (1), volcánicos del Paleozoico superior (2), sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (2), sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico (2) y sedimentarios silicoclástico del Cretáceo (3) (MAPA-28-18). Todas las anomalías de iterbio son de intensidades débiles ($\geq T < 2T$).

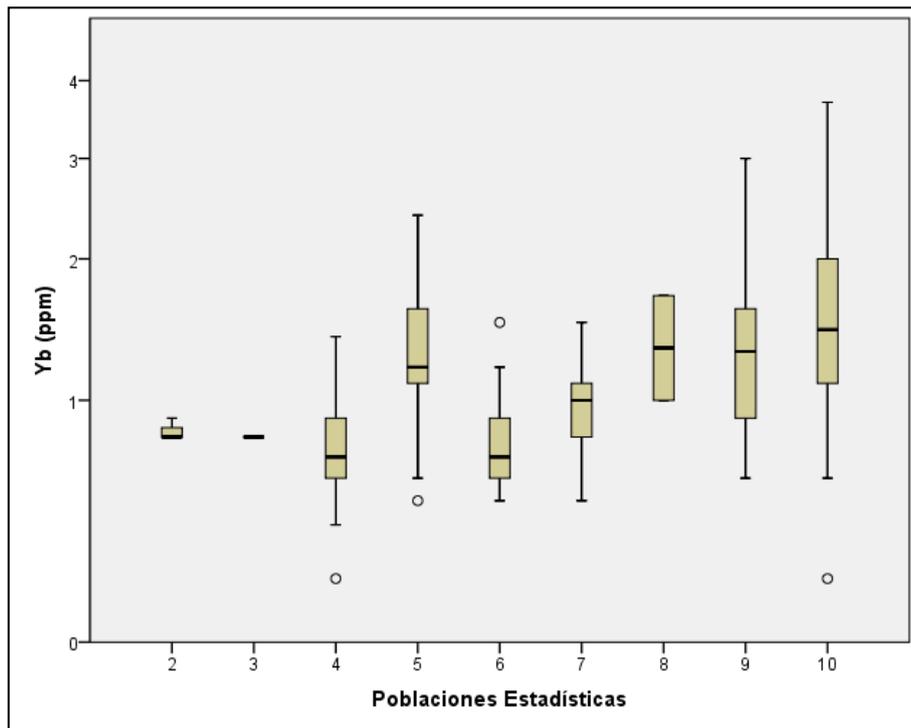
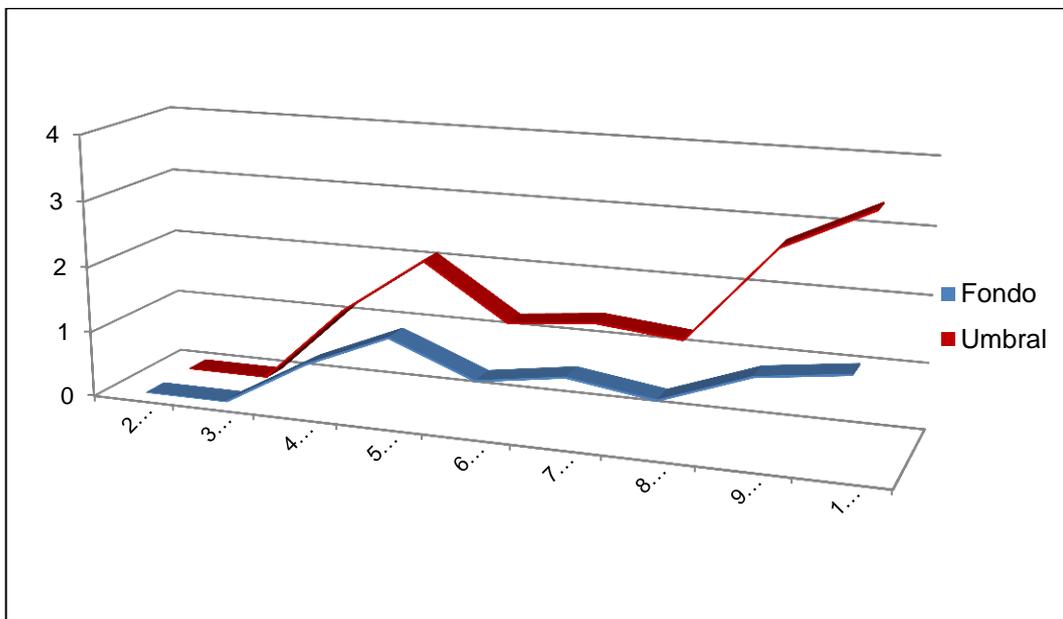


Figura 4.59. Box plots de iterbio en las nueve poblaciones.



| Yb_ppm | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|
| Fondo | - | - | 0.72 | 1.26 | 0.75 | 0.94 | 0.75 | 1.23 | 1.40 |
| Umbral | - | - | 1.20 | 2.10 | 1.26 | 1.39 | 1.26 | 2.73 | 3.36 |

Figura 4.60. Niveles de fondo y umbrales de iterbio en la intercuenca Alto Maraón IV.

4.1.3. Correlaciones geoquímicas

Las correlaciones geoquímicas se realizaron utilizando Geosoft módulo Chimera. Se utilizó el coeficiente de Pearson a escala logarítmica debido a que la distribución de los elementos se acomoda mejor a esta escala. La intensidad de las correlaciones varía entre los rangos desde nulo hasta muy fuerte. Las poblaciones a las que se ha aplicado correlación bivariada son las siguientes:

- Sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (4_SSK).
- Sedimentarios carbonatados del Triásico Cretáceo (5_SCTJ).
- Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (6_SSPs).
- Volcánicos del Paleozoico superior (7_VPs).
- Metamórficos del Proterozoico (9_MP).
- Intrusivos del Paleozoico (10_IP).

4.1.3.1 Correlaciones en sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (4_SSK)

Este ambiente se caracteriza por presentar correlaciones débiles a moderadas de los principales elementos *comodities*, es así que el oro se correlaciona moderadamente y positivamente al As, mientras que la plata se correlaciona débilmente al As y Pb (Cuadro 4.1).

El cobre se correlaciona positivamente y moderada con As y Ni y débilmente a Ga, Co, Cs, Zn, Pb, V. Es relevante mencionar las

correlaciones débiles del Pb con Ag, Cu, Ga, La, Nb, P y correlaciones moderadas del Zn con Ni, P, Pb, U, V, Y y débiles con Cu, Mo, Yb.

Cuadro 4.1 Principales correlaciones en sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo.

| | Muy fuerte | Fuerte | Moderada | Débil |
|-----------|-------------------|---------------|--------------------|-----------------------|
| Au | - | - | As | - |
| Ag | - | - | - | As, Pb |
| Cu | - | - | As, Ni | Ga, Co, Cs, Zn, Pb, V |
| Pb | - | - | Zn | Ag, Cu, Ga, La, Nb, P |
| Zn | - | - | Ni, P, Pb, U, V, Y | Cu, Mo, Yb |

Es importante mencionar las correlaciones muy fuertes de La-Ce y de Yb-Tb-Y. Asimismo, las correlaciones fuertes de Ga-Ce-La-Nb, Tb-Ce-La y Y-P-Tb-U (Figura 4.61).

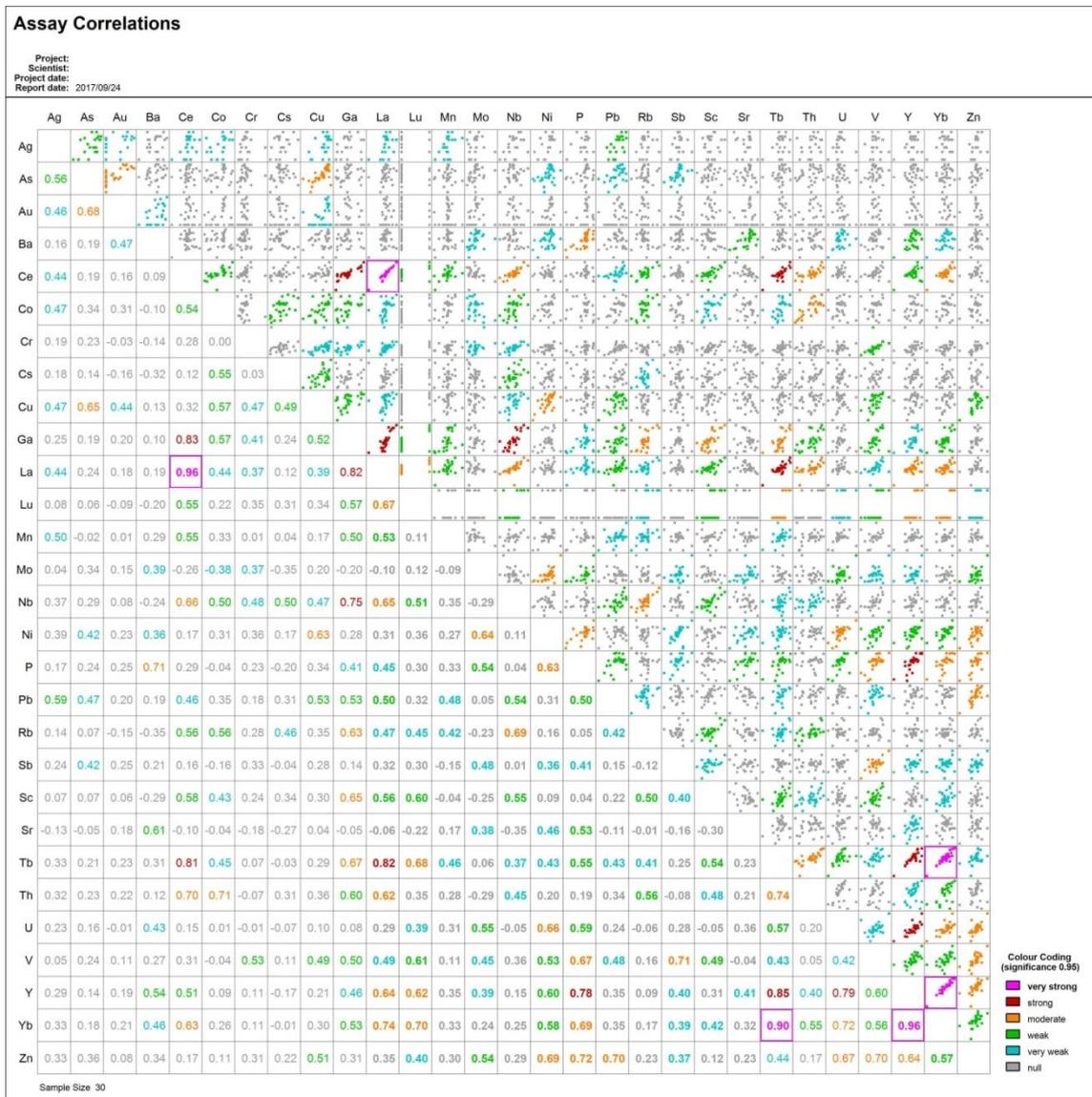


Figura 4.61. Correlaciones bivariadas en sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo.

4.1.3.2. Sedimentarios carbonatados del Triásico Cretácico (5_SCTJ)

En este ambiente el Au y Ag no presentan correlaciones. Destaca la muy fuerte correlación entre Zn con Ni, fuerte correlación entre Zn con Sb, moderada correlación entre Zn con Mo, U y débil con Cu y V. Tanto el Cu como el Pb presentan correlaciones de débiles a fuertes (Cuadro 4.2).

La asociación polimetálica es independiente, como es el caso del Pb, este elemento se encuentra ligado a las tierras raras (La, Lu, Tb, Y, Yb).

Cuadro 4.2. Principales correlaciones en sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico.

| | Muy fuerte | Fuerte | Moderada | Débil |
|-----------|-------------------|---------------|-------------------|--------------|
| Au | - | - | - | - |
| Ag | - | - | - | - |
| Cu | - | Sb, V | Co, Mo | Ba, Ni, Zn |
| Pb | - | Mn | La, Lu, Tb, Y, Yb | P |
| Zn | Ni | Sb | Mo, U | Cu, V |

Es importante mencionar las correlaciones muy fuertes entre los elementos de tierras raras como Ce con Ga-La y Tb con Lu-Yb. Asimismo, correlaciones fuertes de Ce con Rb-Th y moderada de Ce con Nb-Sc-Tb (Figura 4.62).

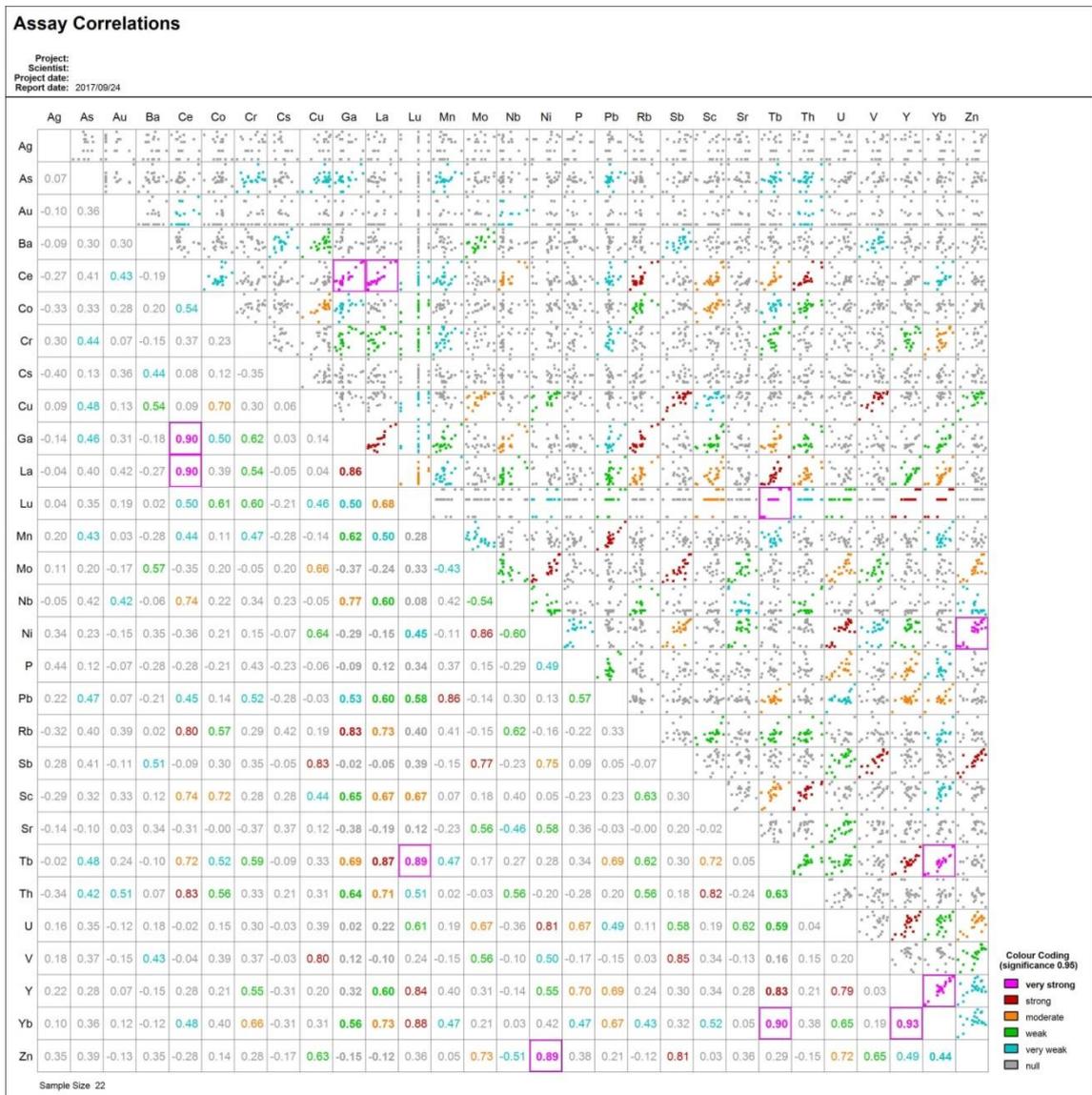


Figura 4.62. Correlaciones bivariadas en sedimentarios carbonatados del Triásico Jurásico.

4.1.3.3. Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (6_SSPs)

A diferencia del ambiente anterior, las tierras raras presentan correlaciones positivas débiles como es el caso de Ce con Lu, Nb, Rb, Y y Yb y del La con Lu, Ga, Nb, Rb, Th, Y, Yb. Asimismo, es importante

mencionar las correlaciones moderadas y negativas del Sr con Ce, La y Nb.

La plata se correlaciona moderadamente y positivamente con el As y débilmente con Mo. (Figura 4.63).

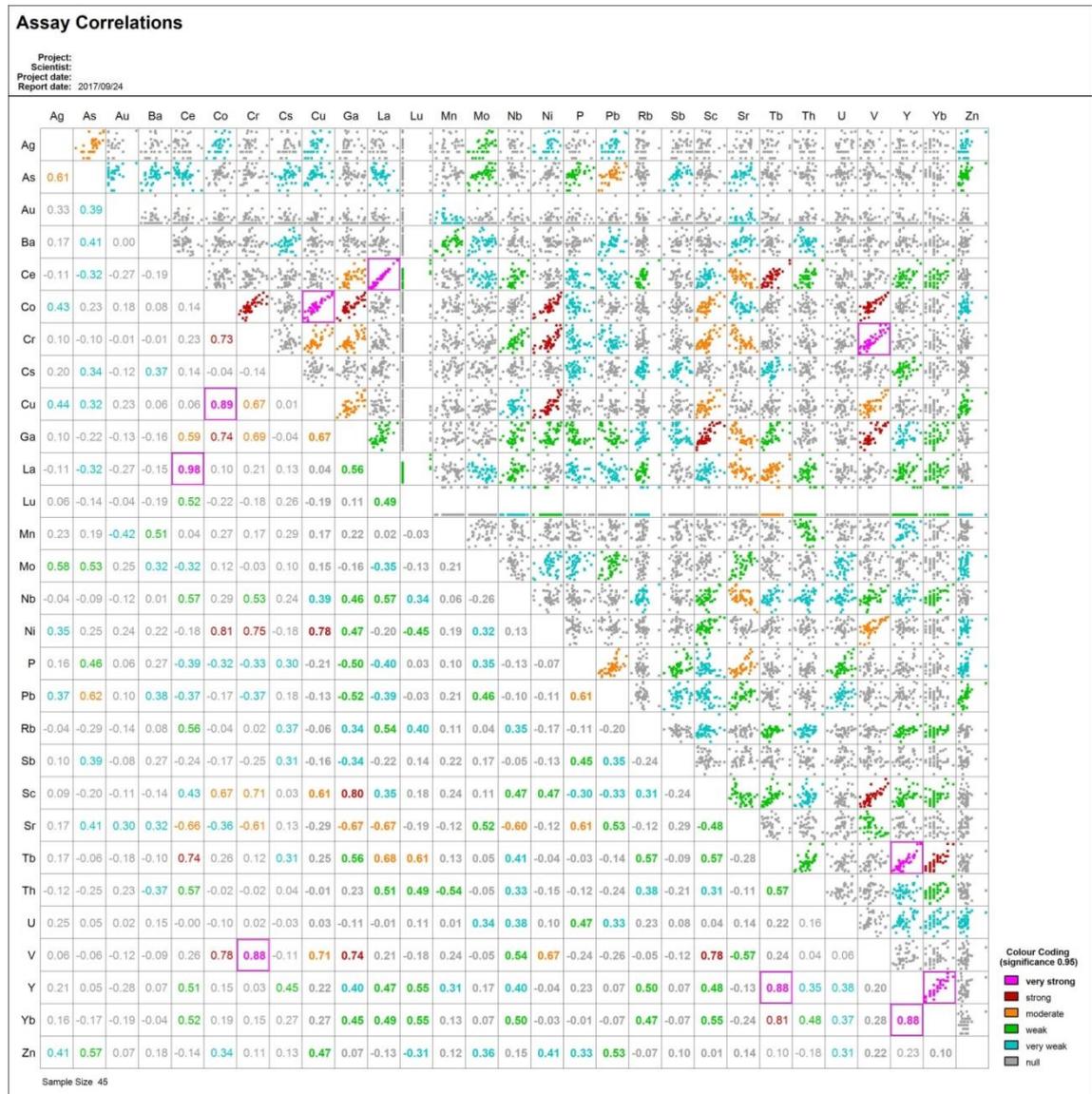


Figura 4.63. Correlaciones bivariadas en sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior.

Se destaca la muy fuerte correlación entre Cu y Co, fuerte entre Cu, Ni y Cr y débil entre Cu y Zn. El plomo presenta correlaciones moderadas con

As y P, y débil con Zn. Asimismo, el Zn destaca por sus correlaciones débiles con As, Cu y Pb (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3. Correlaciones bivariadas en sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior.

| | Muy fuerte | Fuerte | Moderada | Débil |
|-----------|-------------------|---------------|-----------------|--------------|
| Au | - | - | - | - |
| Ag | - | - | As | Mo |
| Cu | Co | Ni, Cr | Ga, Sc, V | Zn |
| Pb | - | - | As, P, | Mo, Sr, Zn |
| Zn | - | - | - | As, Cu, Pb |

4.1.3.4. Volcánicos del Paleozoico superior (7_VPs)

El oro se correlaciona débilmente con el Th y la plata moderadamente con el As (Cuadro 4.4). Se destaca la muy fuerte correlación del Cu con Sc, V y Co, fuerte correlación con Ga y Ni, moderada correlación con las tierras raras (Lu, Nb, Yb) además de Zn y Cr.

Cuadro 4.4 Correlaciones bivariadas en volcánicos del Paleozoico superior.

| | Muy fuerte | Fuerte | Moderada | Débil |
|-----------|-------------------|---------------|--------------------|--------------|
| Au | - | - | - | Th |
| Ag | - | - | As | - |
| Cu | Sc, V, Co | Ga, Ni, (-Rb) | Lu, Nb, Yb, Zn, Cr | As, Sb |
| Pb | - | - | - | Mn |
| Zn | - | - | Co, Cu, Ni, Sc, V | Ga, Nb |

El Zn presenta correlaciones moderadas con Co, Cu, Ni, Sc y V, esta afinidad denota la naturaleza geogénica. También se resalta las correlaciones débiles y negativas de Ni, Sr y V con Ce y La, estos últimos a su vez se correlacionan moderadamente con Tb (Figura 4.64).

Otras importantes correlaciones de intensidad muy fuerte son: Ni, Co, Cr y V, Ni, Sc, los cuales denotan el carácter liófilo.

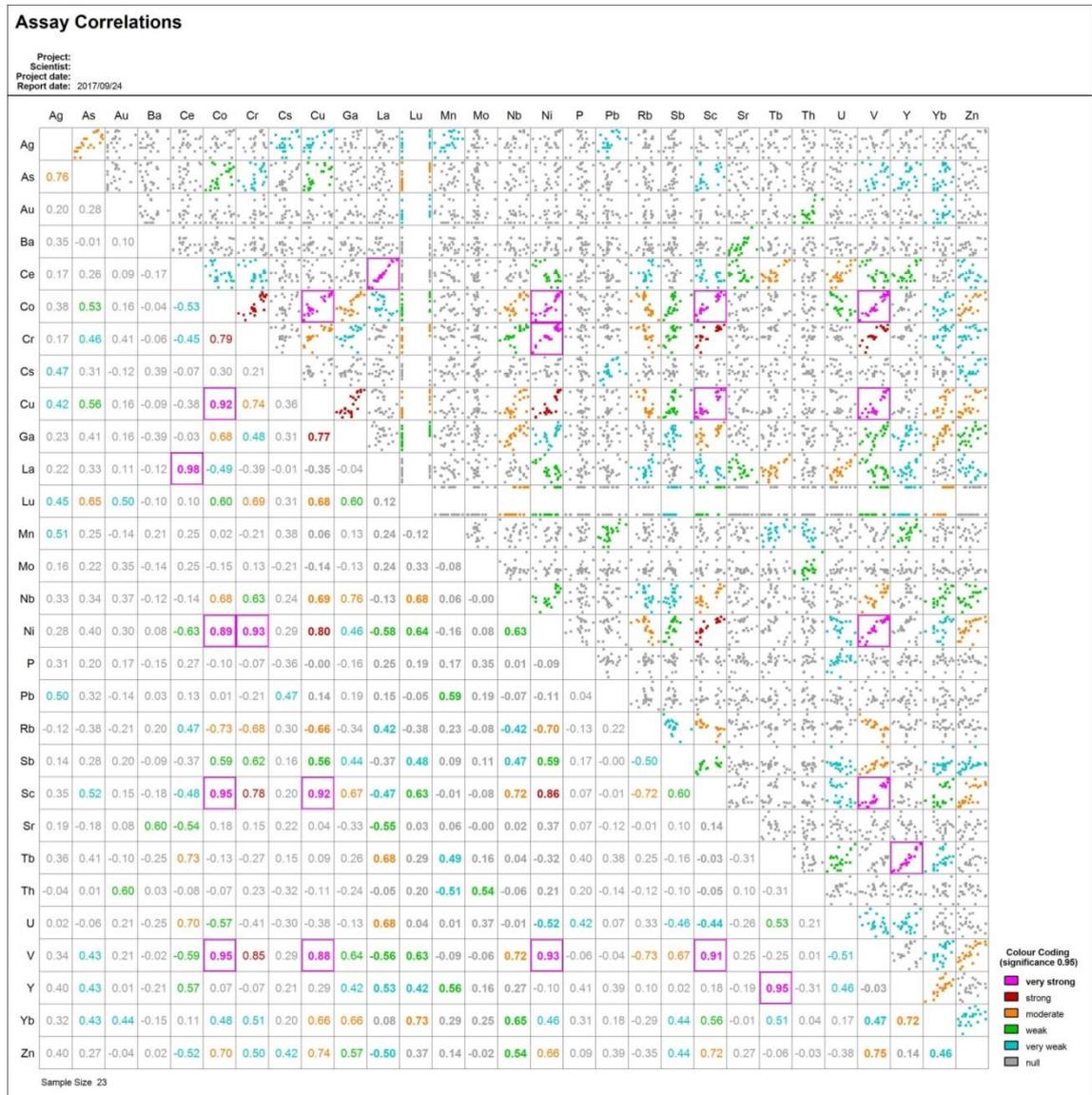


Figura 4.64. Correlaciones bivariadas en volcánicos del Paleozoico superior.

4.1.3.5. Metamórficos del Paleozoico (9_MP)

El oro se correlaciona débil y positivamente con As y Sr; y negativamente con Ga y Sc. Mientras que la plata se correlaciona moderadamente con Pb y débilmente con Zn. En este ambiente se denota una afinidad

calcófila los cuales muestran correlaciones fuertes a moderada como es el caso del Pb y Zn (Cuadro 4.5).

Las tierras raras muestran correlaciones muy fuertes a moderadas, resalta las correlaciones de Ce y La con Tb, Th y Yb, también estos elementos muestran correlaciones fuertes con Ga, Lu, U y Y. Es importante señalar que estos elementos se correlacionan negativamente con Sr (Figura 4.66).

Cuadro 4.5 Correlaciones bivariadas en metamórficos del Paleozoico.

| | Muy fuerte | Fuerte | Moderada | Débil |
|-----------|-------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------|
| Au | - | - | - | As, (-Ga, -Sc), Sr |
| Ag | - | - | Pb | Zn |
| Cu | - | - | Co, Cr, Ni, Rb, Sc, V | Ga, Nb |
| Pb | - | Zn | Ag, As, Sb | Ba |
| Zn | - | Pb | Sb | Ag, As |
| Ce | La, Tb, Th, Yb | Ga, Lu, (-Sr), U, Y | Nb, Rb, Sc | (-As, -Ba) |
| La | Ce, Tb, Th, Yb | Ga, Lu, (-Sr), U, Y | Nb, Rb, Sc, V | (-As, -Ba) |
| Lu | Tb, Y, Yb | Ce, Ga, La, Nb, Th, U | Rb, Sc, V | Mn, (-Sr) |
| Tb | Ce, La, Lu, Y, Yb | Ga, Th, U | Nb, (-Sr) | Mn, P, Rb, Sc, V |
| Yb | Ce, La, Lu, Tb, Y | Ga, Nb, Th, U | Rb, Sc, (-Sr), V | Mn, P |
| Nb | Ga, Rb | Lu, Sc, V, Yb | Ce, Cr, La, (-Sr), Tb, Th, U, Y | Cu |

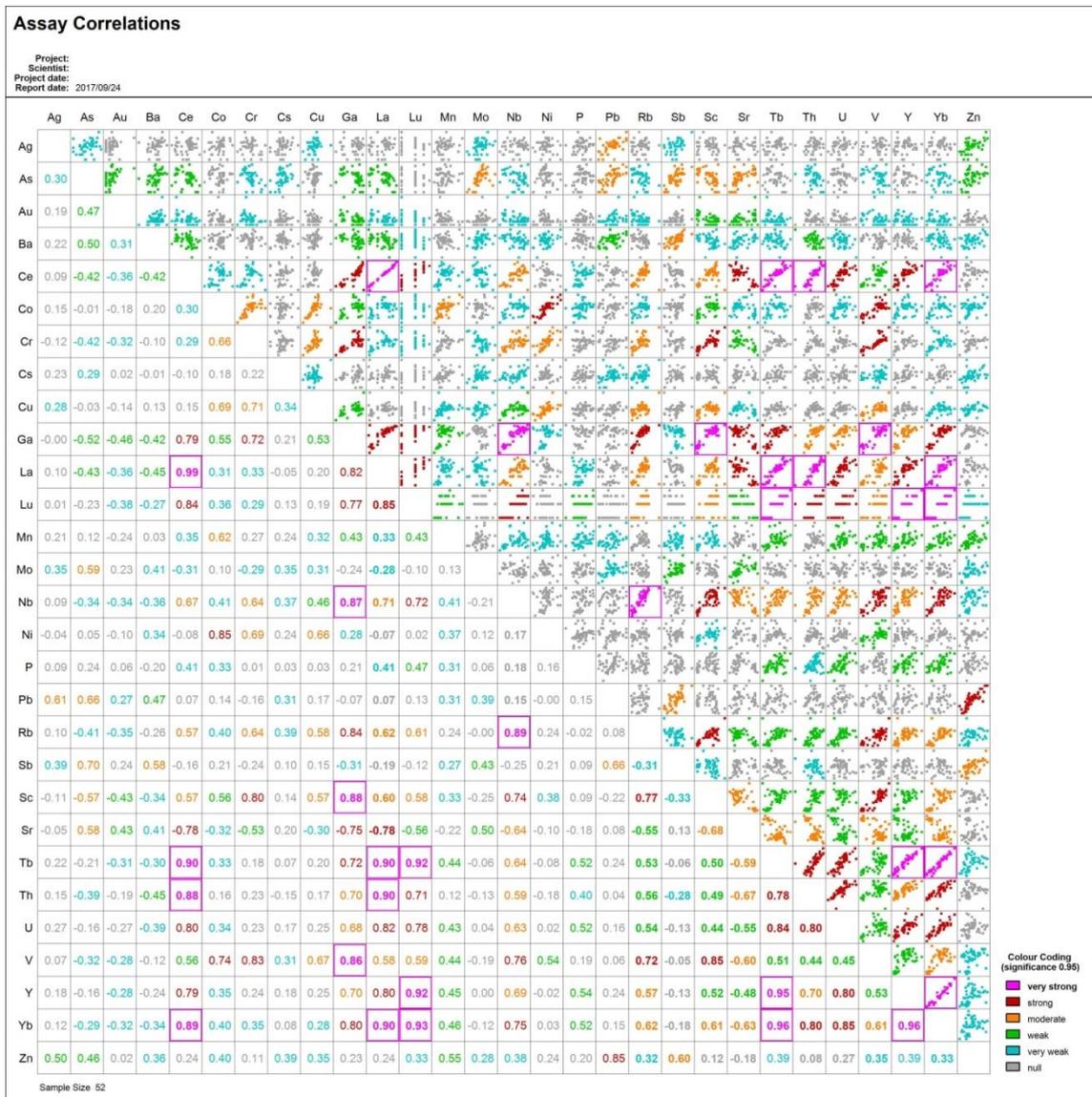


Figura 4.65. Correlaciones bivariadas en metamórficos del Proterozoico.

4.1.3.6. Intrusivos del Paleozoico (10_IP)

El oro se correlaciona débil y positivamente con As y negativamente con Ce y La. Por su parte la plata se correlaciona débilmente con Cu, Pb y Zn denotando una afinidad calcófila (Cuadro 4.6).

Asimismo, se destaca la correlación muy fuerte del Pb y Zn denotando su carácter calcófilo, mientras que las correlaciones del Cu denotan un comportamiento litófilo al correlacionarse fuertemente con Co y Ni (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Correlaciones bivariadas en intrusivos del Paleozoico.

| | Muy fuerte | Fuerte | Moderada | Débil |
|-----------|-------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|
| Au | - | - | - | As, (-Ce, -La) |
| Ag | - | - | - | Cu, Pb, Zn |
| Cu | - | Co, Ni | As, Sc, V, Zn | Ag, Ga, Pb, P |
| Pb | Zn | - | As | Ag, Cs, Cu, Mn, Mo, Rb, Tb |
| Zn | Pb | - | As, Co, Cu, Mn | Ag, Ga, Ni, P, Rb, Tb, Y |
| Ce | La, Tb | Ga, Lu, Th, Y, Yb | Mn, Nb, Rb | (-Au, -Sr), Sc, U |
| La | Ce | Ga, Lu, Tb, Th, Y, Yb | Nb, Rb, U | (-Au, -Sr), Sc, Mn |
| Lu | Tb, Y, Yb | Ce, Ga, Th | Nb, P, Sc | Mn, Rb, V |
| Tb | Ce, Lu, Y, Yb | Ga, La | Mn, P, Rb, Th | Cs, Nb, Pb, Sc, Zn |
| Yb | Lu, Tb, Y | Ce, Ga, La, Th | P, Rb, Sc | Mn, Nb, V |
| Nb | - | Ga | Ce, La, Lu, Sc, (-Sr), V | Mn, Rb, Tb, U |

Las correlaciones de las tierras raras varían desde muy fuerte hasta débil, como se observa en la figura 9.6, el Ce y La se correlaciona muy fuertemente con Tb y fuertemente con Ga, Lu, Th, Y y Yb, moderadamente con Nb y Rb y débil con Sc.

El Nb se correlaciona moderadamente y positivamente con Ce, La, Lu, Sc y V y negativamente con Sr. Asimismo otra correlación de interés se denota en el Tb con Pb, Zn, Cs, Nb y Sc.

Se destaca la correlación muy fuerte entre Lu con Tb, Y y Yb, los cuales denotan un carácter geogénico; correlación fuerte con Ce, Ga y Th; correlación moderada con Nb, P y Sc y débil correlación con Mn, Rb y V (Figura 4.66).

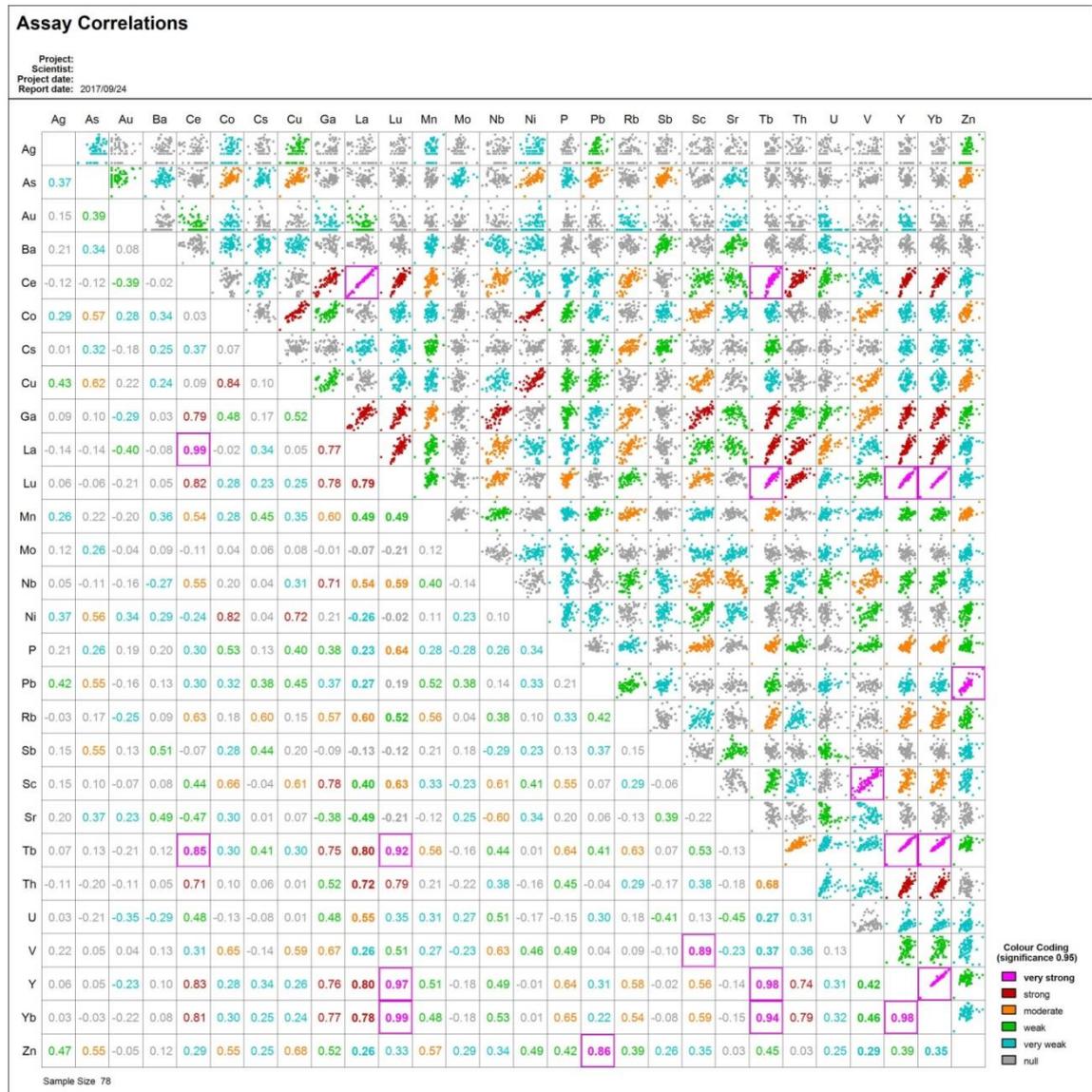


Figura 4.66. Correlaciones bivariadas en intrusivos del Paleozoico.

4.1.4 Análisis multivariado de componentes principales

Mediante la estadística multivariada se han determinado asociaciones geoquímicas que distinguen a cada población conformada; existen poblaciones que tienen un número insignificante de muestras para este tipo de análisis, solamente se ha aplicado este en 6 poblaciones.

El análisis de componentes principales nos permite identificar asociaciones geoquímicas, en tanto que con el análisis *clúster* se determina como se conforman las mismas, incidiendo principalmente en aquellas donde se encuentren involucrados los elementos de interés económico, teniendo en cuenta que algunas son resultado de la dispersión de elementos por condiciones geogénicas. A continuación, se presentan las asociaciones geoquímicas de acuerdo al análisis de componentes principales (PC1, PC2 y PC3), así como las derivadas del análisis *clúster*.

4.1.4.1. Asociaciones geoquímicas en sedimentarios silicoclásticos del Cretáceo (4_SSK)

El análisis de componentes principales (ACP), muestra la importante asociación Au-As-Cu, la cual ocurre en el cuarto componente (Cuadro 4.7). El Ba-Zn se encuentra una asociación poco común con el U-Mo-V-Ni-Y-P-Lu-Yb-Sr, conformando una asociación de tendencia geogénica. Otra importante asociación es la de las tierras raras (Ce-La-Tb) asociadas a Ga-Th-Sc-Nb-Rb el cual ocurre en el primer componente; la

particularidad en estos ambientes es que la plata no conforma ninguna asociación.

Por otro lado el análisis *clúster* confirma las asociaciones resultantes del ACP, (U-Yb-Mo-Tb-Nb-Sb) incluyendo, además la asociación Cu-Ni-Pb (Figura 4.67).

Cuadro 4.7 Matriz de componentes rotados en sedimentos silicoclásticos del Cretáceo.

| Rotated Component Matrix | | | | | | | |
|--------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Component | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Ln_Ce_ppm | .938 | .024 | .050 | .188 | .099 | .103 | -.069 |
| Ln_La_ppm | .884 | .208 | .017 | .287 | .109 | .029 | -.102 |
| Ln_Tb_ppm | .845 | .464 | -.012 | -.095 | .072 | -.025 | -.041 |
| Ln_Ga_ppm | .824 | .087 | .148 | .341 | .140 | .168 | .135 |
| Ln_Th_ppm | .757 | .108 | .312 | -.336 | .190 | .108 | .130 |
| Ln_Sc_ppm | .699 | -.037 | .272 | .162 | -.058 | -.506 | .252 |
| Ln_Nb_ppm | .588 | -.122 | .459 | .506 | .102 | .127 | -.076 |
| Ln_Rb_ppm | .542 | -.025 | .503 | .215 | -.164 | .302 | .345 |
| Ln_U_ppm | .124 | .864 | .048 | -.113 | -.072 | -.031 | -.346 |
| Ln_Ni_ppm | .074 | .823 | .227 | .094 | .249 | .056 | .135 |
| Ln_Zn_ppm | .090 | .810 | .269 | .349 | .107 | .092 | -.041 |
| Ln_P_ppm | .257 | .791 | -.282 | .197 | .186 | .171 | .041 |
| Ln_Y_ppm | .552 | .775 | -.184 | -.026 | .007 | -.089 | -.175 |
| Ln_Mo_ppm | -.365 | .735 | -.261 | .245 | .152 | -.116 | .129 |
| Ln_Lu_ppm | .681 | .684 | -.075 | -.010 | -.034 | -.150 | -.073 |
| Ln_Yb_ppm | .665 | .682 | -.057 | -.079 | .058 | -.143 | -.150 |
| Ln_V_ppm | .285 | .588 | -.002 | .587 | .056 | -.307 | .143 |
| Ln_Sr_ppm | -.030 | .568 | -.286 | -.473 | .059 | .406 | .310 |
| Ln_Ba_ppm | .080 | .542 | -.488 | -.168 | .402 | .259 | -.092 |
| Ln_Cs_ppm | .082 | -.035 | .902 | .039 | .012 | -.032 | .054 |
| Ln_Co_ppm | .527 | -.065 | .612 | -.203 | .364 | .176 | .129 |
| Ln_Cr_ppm | .119 | .136 | .004 | .781 | .039 | -.046 | .252 |
| Ln_Pb_ppm | .332 | .301 | .339 | .434 | .303 | .293 | -.148 |
| Ln_Au_ppb | .168 | .052 | -.193 | -.104 | .902 | -.051 | .014 |
| Ln_As_ppm | .028 | .190 | .223 | .209 | .847 | -.111 | -.067 |
| Ln_Cu_ppm | .197 | .304 | .457 | .316 | .581 | .052 | .338 |
| Ln_Mn_ppm | .445 | .206 | .037 | .150 | -.037 | .678 | -.205 |
| Ln_Sb_ppm | .108 | .394 | -.152 | .387 | .249 | -.649 | .021 |
| Ln_Ag_ppm | .019 | .114 | -.120 | -.154 | -.002 | .147 | -.828 |

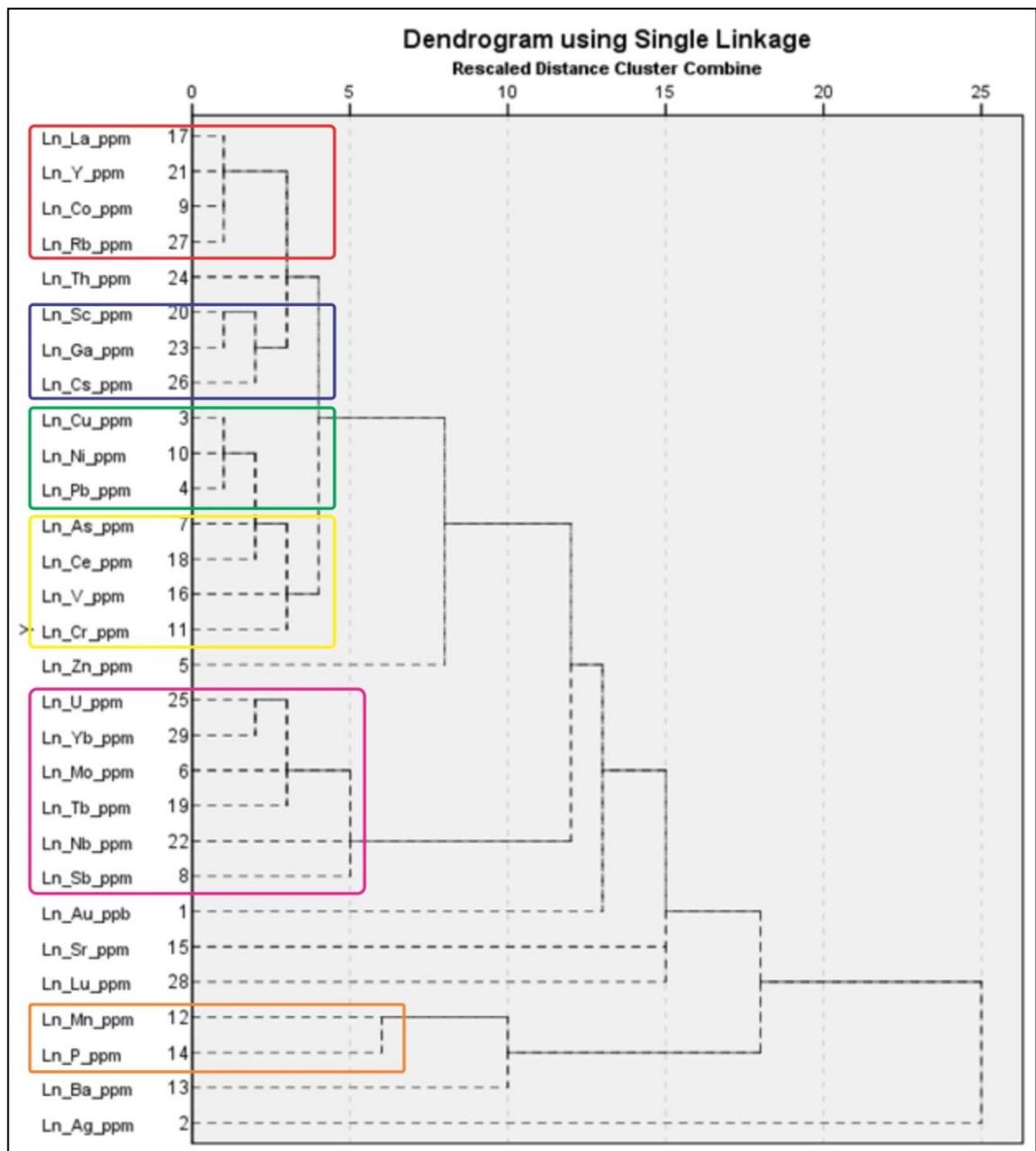


Figura 4.67. Dendrograma en sedimentos silicoclásticos del Cretáceo.

Cuadro 4.8 Asociaciones geoquímicas en sedimentos silicoclásticos del Cretáceo según el análisis Clúster.

| | |
|---|------------------|
| 1 | La-Y-Co-Rb |
| 2 | Sc-Ga-Cs |
| 3 | Cu-Ni-Pb |
| 4 | As-Ce-V-Cr |
| 5 | U-Yb-Mo-Tb-Nb-Sb |
| 6 | Mn-P |

Cuadro 4.9. Asociaciones geoquímicas de sedimentos silicoclásticos del Cretáceo según el análisis de componentes principales.

| | |
|-----|------------------------------|
| PC1 | Ce-La-Tb-Ga-Th-Sc-Nb-Rb |
| PC2 | U-Ni-Zn-P-Y-Mo-Lu-Yb-V-Sr-Ba |
| PC3 | Cs-Co |
| PC4 | Au-As-Cu |
| PC5 | Mn-Sb |

4.1.4.2. Sedimentarios carbonatados del Triásico Cretáceo (5_SCTJ)

Con el ACP, se tienen 6 componentes principales, de los cuales 3 componentes a destacar, el que involucra a las tierras raras (PC1 y PC2), el de los metales de interés (PC3) y el componente PC6 donde se muestra la asociación del Au-As (Cuadro 4.11).

El análisis clúster denota mejor la asociación de Sc-Th-Ga; Co-Rb-La-Cu-As y la asociación referida a la mineralización es Zn-Ba-Sr (Figura 4.68) (Cuadro 4.12).

Cuadro 4.10 Matriz de componentes rotados en sedimentos carbonatados del Triásico Jurásico.

| Rotated Component Matrixa | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Component | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ln_Sc_ppm | .894 | .206 | .211 | -.024 | .063 | .055 |
| Ln_Ce_ppm | .841 | .223 | -.207 | .303 | -.174 | .190 |
| Ln_Th_ppm | .841 | .131 | .053 | -.076 | -.136 | .337 |
| Ln_Rb_ppm | .763 | .104 | -.057 | .491 | .170 | .118 |
| Ln_Co_ppm | .742 | .054 | .397 | .038 | .010 | -.074 |
| Ln_Ga_ppm | .723 | .243 | -.084 | .498 | -.317 | .117 |
| Ln_La_ppm | .691 | .560 | -.222 | .235 | -.153 | .220 |
| Ln_Nb_ppm | .541 | -.179 | -.263 | .447 | -.327 | .429 |
| Ln_Y_ppm | .135 | .963 | .136 | .062 | .075 | -.017 |
| Ln_Lu_ppm | .365 | .888 | .189 | .056 | -.074 | -.001 |
| Ln_Yb_ppm | .367 | .863 | .192 | .127 | -.093 | -.044 |
| Ln_U_ppm | -.071 | .737 | .448 | .113 | .407 | -.027 |
| Ln_Tb_ppm | .599 | .735 | .146 | .224 | .003 | .053 |
| Ln_Pb_ppm | .068 | .698 | -.078 | .594 | -.123 | .114 |
| Ln_Sb_ppm | .045 | .205 | .919 | -.056 | .001 | .011 |
| Ln_V_ppm | .171 | -.089 | .899 | -.008 | -.241 | -.112 |
| Ln_Cu_ppm | .320 | .047 | .894 | -.069 | -.016 | .064 |
| Ln_Zn_ppm | -.252 | .434 | .797 | .067 | .128 | -.048 |
| Ln_Mo_ppm | -.083 | .206 | .772 | -.277 | .456 | -.039 |
| Ln_Ni_ppm | -.226 | .482 | .733 | -.138 | .331 | -.086 |
| Ln_Ba_ppm | -.012 | -.275 | .610 | .011 | .372 | .430 |
| Ln_Mn_ppm | .033 | .410 | -.171 | .813 | -.265 | .015 |
| Ln_P_ppm | -.383 | -.127 | .139 | -.656 | -.305 | .023 |
| Ln_Ag_ppm | -.368 | .410 | -.300 | -.464 | .046 | .281 |
| Ln_Sr_ppm | -.167 | .218 | .167 | -.065 | .885 | -.017 |
| Ln_Cs_ppm | .288 | -.443 | .064 | .122 | .630 | .330 |
| Ln_Cr_ppm | .216 | .507 | .265 | .240 | -.585 | .099 |
| Ln_Au_ppb | .382 | .012 | -.096 | -.049 | .098 | .783 |
| Ln_As_ppm | .190 | .203 | .459 | .453 | -.161 | .551 |

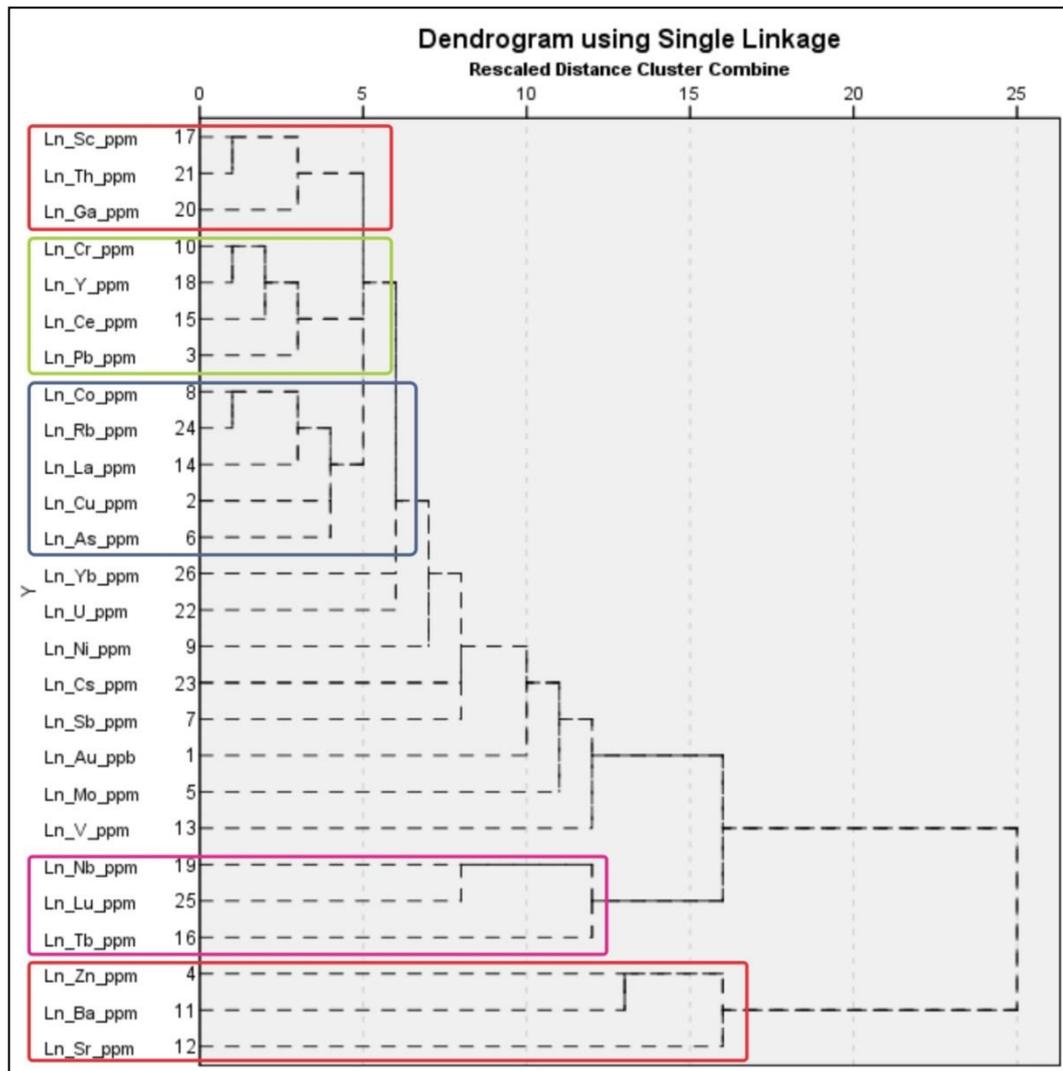


Figura 4.68. Dendrograma en sedimentos carbonatados del Triásico Jurásico.

Cuadro 4.11 Asociaciones geoquímicas de sedimentos carbonatados del Triásico Jurásico según el análisis de componentes principales.

| | |
|-----|-------------------------|
| PC1 | Sc-Ce-Th/Rb-Co-Ga/La-Nb |
| PC2 | Y-Lu-Yb/U-Tb-Pb |
| PC3 | Sb-V-Cu-Zn-Mo-Ni-Ba |
| PC4 | Mn-P |
| PC5 | Sr-Cs-Cr |
| PC6 | Au-As |

Cuadro 4.12. Asociaciones geoquímicas en sedimentos carbonatados del Triásico Jurásico según análisis Clúster.

| | |
|---|----------------|
| 1 | Sc-Th-Ga |
| 2 | Cr-Y-Ce-Pb |
| 3 | Co-Rb-La-Cu-As |
| 4 | Nb-Lu-Tb |
| 5 | Zn-Ba-Sr |

4.1.4.3. Sedimentarios silicoclásticos del Paleozoico superior (6_SSPs)

Según el análisis de componentes principales (ACP) los factores PC1 y PC2 son de comportamiento geogénico, mientras que los factores PC3, PC4 Y PC5 están ligados a alguna mineralización, donde el Zn-Pb está asociada a As-P, en tanto que el Cu se encuentra asociado a elementos residuales de comportamiento geogénico. Además, el Au, Ag y Mo no muestra asociación alguna. (Cuadro 4.13 y Cuadro 4.15).

Mediante el análisis clúster, se han determinado cinco principales asociaciones: tres geogénicas (1, 3, 4 y 5) y uno de mineralización (2). Asimismo, se confirma la asociación Cu-Ni-Cr y Pb-As determinado por ACP (Figura 4.69 y Cuadro 4.14).

Cuadro 4.13 Matriz de componentes rotados en sedimentos silicoclásticos del paleozoico superior.

| Rotated Component Matrixa | | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Component | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Ln_V_ppm | .907 | .112 | .229 | -.083 | .000 | .053 | -.140 |
| Ln_Co_ppm | .900 | .070 | .018 | .168 | .059 | -.247 | .088 |
| Ln_Cr_ppm | .886 | -.029 | .248 | -.140 | .068 | .102 | .076 |
| Ln_Ni_ppm | .872 | -.169 | -.214 | .184 | .081 | .053 | .119 |
| Ln_Cu_ppm | .866 | .106 | .015 | .294 | -.025 | -.099 | .041 |
| Ln_Sc_ppm | .744 | .502 | .016 | -.270 | .015 | -.029 | .044 |
| Ln_Ga_ppm | .732 | .389 | .293 | -.194 | .015 | -.268 | .207 |
| Ln_Y_ppm | .112 | .931 | -.001 | .114 | .148 | .042 | -.117 |
| Ln_Tb_ppb | .152 | .925 | .136 | .033 | -.039 | -.097 | .091 |
| Ln_Lu_ppb | .037 | .924 | .064 | .024 | -.060 | .236 | -.048 |
| Ln_Yb_ppb | .196 | .892 | .047 | -.058 | -.026 | .125 | -.046 |
| Ln_Rb_ppm | -.121 | .621 | .131 | -.141 | .256 | .137 | .535 |
| Ln_Th_ppm | -.069 | .595 | .115 | -.049 | -.586 | .058 | .237 |
| Ln_Cs_ppb | -.217 | .444 | .102 | .335 | .440 | -.195 | -.149 |
| Ln_Sr_ppm | -.441 | -.112 | -.760 | .322 | .036 | .088 | -.045 |
| Ln_Mo_ppm | .130 | .155 | -.701 | .358 | .191 | .174 | .110 |
| Ln_La_ppm | .024 | .566 | .688 | -.125 | -.024 | -.116 | .282 |
| Ln_Nb_ppb | .333 | .380 | .679 | .131 | .006 | .399 | .002 |
| Ln_Ce_ppm | .061 | .617 | .641 | -.139 | -.043 | -.127 | .272 |
| Ln_As_ppm | .067 | -.080 | -.227 | .843 | .183 | -.147 | -.194 |
| Ln_Zn_ppm | .311 | .047 | -.063 | .796 | .012 | .143 | .001 |
| Ln_Pb_ppm | -.243 | -.035 | -.264 | .682 | .198 | .238 | -.213 |
| Ln_P_ppm | -.268 | .121 | -.379 | .433 | .123 | .353 | -.420 |
| Ln_Mn_ppm | .234 | .130 | -.037 | -.021 | .853 | -.101 | -.186 |
| Ln_Ba_ppm | -.023 | -.066 | -.130 | .317 | .777 | .136 | .097 |
| Ln_U_ppb | .049 | .311 | -.126 | .206 | .014 | .824 | .020 |
| Ln_Ag_ppm | .449 | .098 | .020 | .067 | .074 | -.634 | .110 |
| Ln_Sb_ppb | -.206 | .009 | -.048 | .218 | .254 | .078 | -.745 |

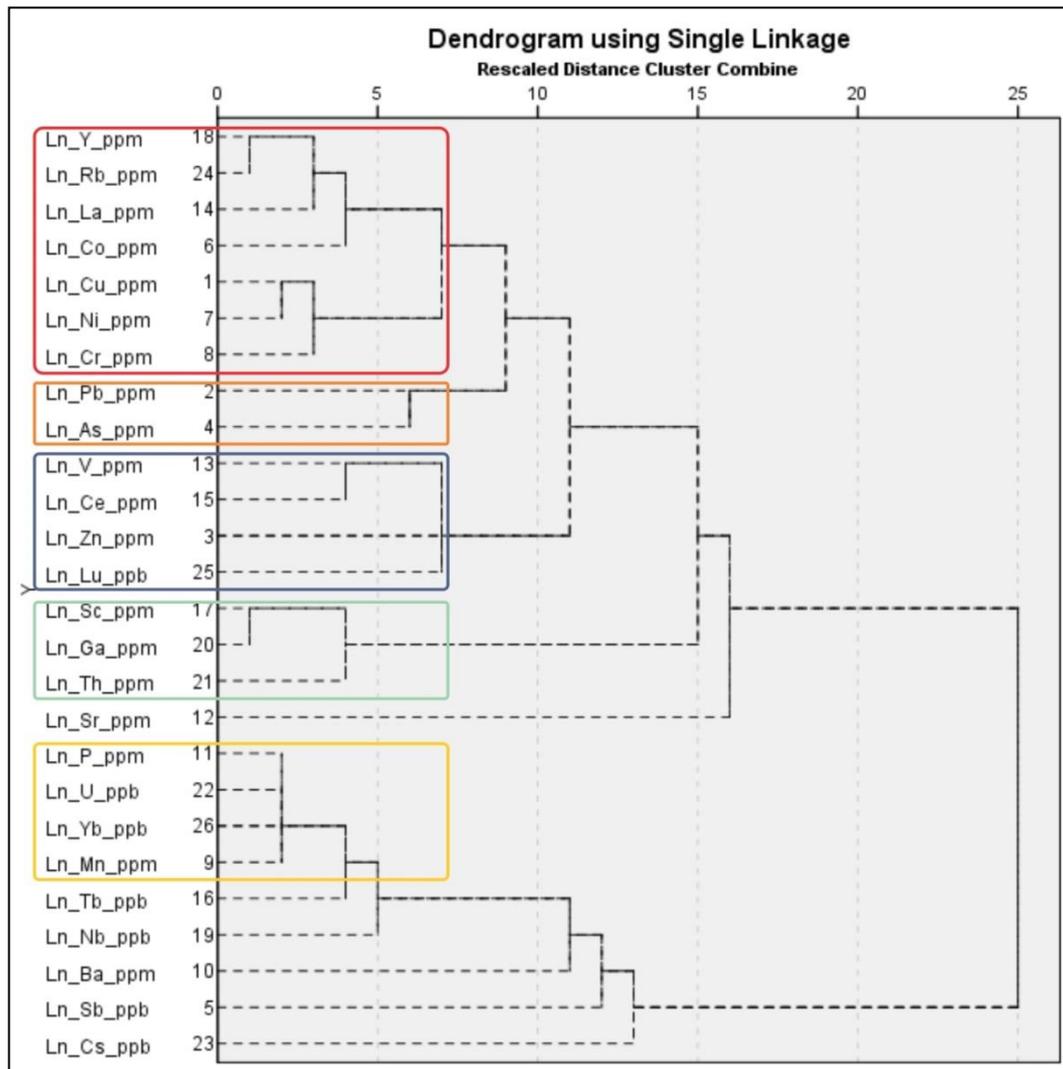


Figura 4.69. Dendrograma en sedimentos carbonatados del Triásico Jurásico.

Cuadro 4.14 Asociaciones geoquímicas en sedimentos silicoclásticos del Paleozoico superior según análisis Clúster.

| | |
|---|---------------------|
| 1 | Y-Rb-La-Co/Cu-Ni-Cr |
| 2 | Pb-As |
| 3 | V-Ce-Zn-Lu |
| 4 | Sc-Ga-Th |
| 5 | P-U-Yb-Mn |

Cuadro 4.15 Asociaciones geoquímicas de sedimentos silicoclásticos del Paleozoico superior según el análisis de componentes principales.

| | |
|-----|---------------------|
| PC1 | V-Co-Cr-Ni-Cu-Sc-Ga |
| PC2 | Y-Tb-Lu-Yb-Rb-Th |
| PC3 | Sr-Mo-La-Nb-Ce |
| PC4 | As-Zn-Pb-P |
| PC5 | Mn-Ba |

4.1.4.4. Volcánicos del Paleozoico superior (7_VPs)

De acuerdo al análisis multivariante, se destacan las siguientes asociaciones: V-Co-Sc-Cu-Ni-Cr/Rb-Zn-Nb-Sb/Ga-La; Th-Mo-Au y As-Ag relacionada a la manifestación mineral; Y-Tb-Yb-Lu-U-Ce como resultado de la dispersión geogénica. Otras asociaciones resultado de la dispersión mineral son Pb-Mn y Sr-Ba (Cuadro 4.16 y Cuadro 4.18

El análisis *clúster* muestra asociaciones referidas a la mineralización, como el Cu asociado a Sc-Ga y estos a Ni-Cr-Co, otra importante asociación es Zn-V asociado a Ce y la asociación As-Pb-Sr asociado a La-Y-Rb, la particularidad en este ambiente es que la plata y el oro no conforman ninguna asociación (Figura 4.70 y Cuadro 4.17).

Cuadro 4.16. Matriz de componentes rotados en sedimentos volcánicos del paleozoico superior.

| Rotated Component Matrixa | | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Component | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Ln_V_ppm | .973 | -.069 | .026 | .086 | .032 | .025 | .069 |
| Ln_Co_ppm | .962 | -.035 | -.094 | .042 | .040 | .144 | .078 |
| Ln_Sc_ppm | .962 | .091 | -.063 | -.025 | .029 | .048 | -.052 |
| Ln_Cu_ppm | .923 | .189 | -.084 | -.035 | .115 | .113 | .102 |
| Ln_Ni_ppm | .919 | -.130 | .207 | .204 | -.013 | .014 | .079 |
| Ln_Cr_ppm | .863 | -.072 | .273 | .032 | -.164 | .104 | .114 |
| Ln_Rb_ppm | -.773 | .188 | -.077 | .170 | .226 | -.140 | .369 |
| Ln_Zn_ppm | .732 | .066 | -.016 | .130 | .517 | -.196 | .028 |
| Ln_Nb_ppm | .723 | .396 | .091 | -.008 | -.137 | -.029 | .288 |
| Ln_Sb_ppm | .699 | -.012 | -.023 | .011 | .038 | .011 | -.153 |
| Ln_Ga_ppm | .678 | .399 | -.111 | -.381 | .111 | -.004 | .380 |
| Ln_La_ppm | -.545 | .535 | .101 | -.273 | -.064 | .533 | .087 |
| Ln_Y_ppm | .059 | .920 | -.147 | -.089 | .215 | .162 | -.082 |
| Ln_Tb_ppm | -.172 | .844 | -.169 | -.183 | .216 | .258 | -.114 |
| Ln_Yb_ppm | .560 | .747 | .205 | .011 | .063 | -.037 | .039 |
| Ln_Lu_ppm | .550 | .717 | .291 | .005 | .089 | .088 | -.151 |
| Ln_U_ppm | -.509 | .617 | .358 | -.191 | -.098 | -.034 | -.102 |
| Ln_Ce_ppm | -.569 | .592 | .075 | -.292 | -.073 | .446 | .049 |
| Ln_Th_ppm | -.005 | -.186 | .907 | .037 | -.077 | -.049 | -.109 |
| Ln_Mo_ppm | -.055 | .159 | .745 | -.097 | .243 | .084 | -.309 |
| Ln_Au_ppb | .217 | .215 | .715 | .156 | -.280 | .198 | .137 |
| Ln_Sr_ppm | .171 | -.115 | .051 | .880 | .023 | -.264 | -.136 |
| Ln_Ba_ppm | -.123 | -.174 | -.008 | .860 | .027 | .227 | .190 |
| Ln_Pb_ppm | -.049 | .180 | -.011 | -.049 | .926 | .168 | .073 |
| Ln_Mn_ppm | -.064 | .447 | -.408 | .270 | .465 | .248 | -.048 |
| Ln_As_ppm | .445 | .245 | .116 | -.082 | .188 | .802 | -.026 |
| Ln_Ag_ppm | .279 | .299 | .056 | .360 | .411 | .643 | -.048 |
| Ln_P_ppm | -.003 | .446 | .187 | .085 | .021 | .082 | -.774 |
| Ln-Cs_ppm | .205 | .110 | -.215 | .357 | .482 | .195 | .613 |

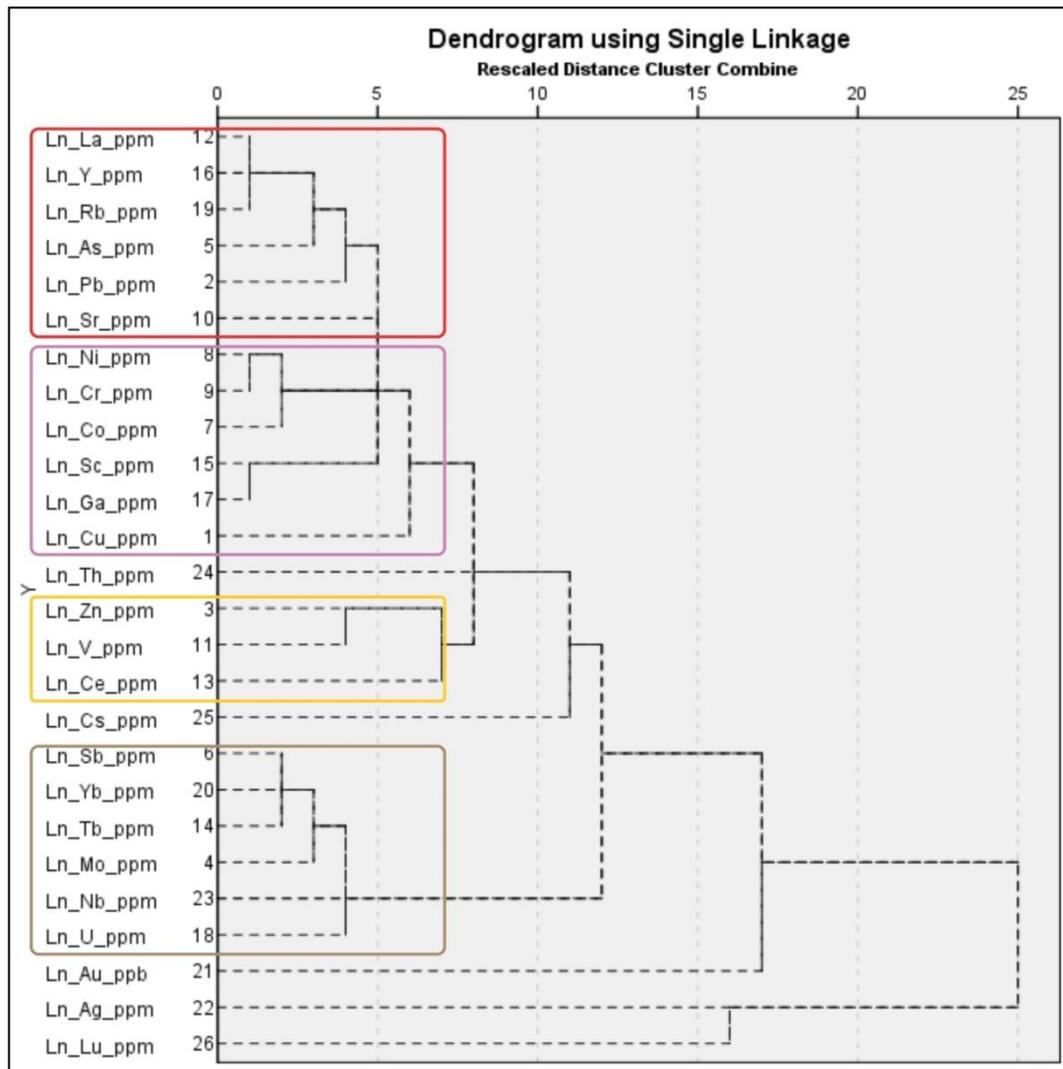


Figura 4.70. Dendrograma en sedimentos volcánicos del Paleozoico superior.

Cuadro 4.17. Asociaciones geoquímicas en sedimentos volcánicos del Paleozoico superior según análisis clúster.

| | |
|---|-------------------|
| 1 | La-Y-Rb-As-Pb-Sr |
| 2 | Ni-Cr-Co-Sc-Ga-Cu |
| 3 | Zn-V-Ce |
| 4 | Sb-Yb-Tb-Mo-Nb-U |

Cuadro 4.18 Asociaciones geoquímicas de sedimentos volcánicos del Paleozoico superior según el análisis de componentes principales.

| | |
|-----|------------------------------------|
| PC1 | V-Co-Sc-Cu-Ni-Cr-Rb-Zn-Nb-Sb-Ga-La |
| PC2 | Y-Tb-Yb-Lu-U-Ce |
| PC3 | Th-Mo-Au |
| PC4 | Sr-Ba |
| PC5 | Pb-Mn |
| PC6 | As-Ag |
| PC7 | P-Cs |

4.1.4.5 Metamórficos del Proterozoico (9_MP)

Las asociaciones resultantes del análisis de componentes principales definen la asociación de los elementos geogénicos en el componente PC1 Tb-Yb-Lu-La-Ce-Y y estos a la vez asociados a U-Th-Ga-Nb-Sr-Rb. En los componentes PC2 (Ni-Co-Cr-Cu-Sc) y PC3 (Pb-Sb-Zn-As-Ba-Mn) las asociaciones denotan una manifestación mineral. Otras asociaciones resultado de la dispersión mineral son Cs-Mo y Ag-Au (Cuadro 4.19 y Cuadro 4.21).

El análisis *clúster* confirma las asociaciones Rb-Th-La-Y y U-Yb-P-Mn-Tb de carácter geogénico; asimismo las asociaciones relacionados a las manifestaciones minerales como Cu-Cr-Ni y Zn-.Ba-Lu (Cuadro 4.20 y Figura 4.71).

Cuadro 4.19. Matriz de componentes rotados en sedimentos metamórficos del Proterozoico.

| Rotated Component Matrixa | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Component | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ln_Tb_ppb | .963 | .031 | .125 | .057 | .004 | -.026 |
| Ln_Yb_ppb | .960 | .161 | .014 | .038 | .027 | -.059 |
| Ln_Lu_ppm | .951 | .176 | .021 | .039 | -.022 | -.079 |
| Ln_La_ppm | .949 | .096 | -.052 | -.109 | -.166 | -.023 |
| Ln_Ce_ppm | .941 | .067 | -.021 | -.088 | -.228 | -.042 |
| Ln_Y_ppm | .914 | .086 | .092 | .086 | .164 | -.055 |
| Ln_U_ppb | .888 | .103 | -.010 | .137 | .149 | .051 |
| Ln_Th_ppm | .875 | .017 | -.189 | -.050 | -.129 | .263 |
| Ln_Ga_ppm | .766 | .501 | -.170 | -.285 | .052 | -.128 |
| Ln_Nb_ppb | .719 | .358 | -.024 | -.410 | .243 | -.120 |
| Ln_Sr_ppm | -.671 | -.295 | .072 | .354 | .451 | .033 |
| Ln_Rb_ppm | .587 | .447 | -.111 | -.514 | .328 | .036 |
| Ln_Ni_ppm | -.139 | .919 | .148 | .193 | .031 | -.132 |
| Ln_Co_ppm | .262 | .863 | .249 | .210 | -.026 | -.097 |
| Ln_Cr_ppm | .218 | .849 | -.180 | -.287 | -.008 | -.150 |
| Ln_Cu_ppm | .158 | .825 | .132 | -.151 | .237 | .208 |
| Ln_Sc_ppm | .534 | .634 | -.254 | -.319 | -.009 | -.116 |
| Ln_Pb_ppm | .168 | -.093 | .874 | -.060 | .236 | .204 |
| Ln_Sb_ppm | -.179 | .048 | .864 | .172 | -.071 | .108 |
| Ln_Zn_ppm | .309 | .173 | .851 | -.153 | .205 | -.016 |
| Ln_As_ppm | -.288 | -.165 | .660 | .426 | .366 | .130 |
| Ln_Ba_ppm | -.462 | .191 | .632 | .084 | -.046 | .151 |
| Ln_Mn_ppm | .402 | .353 | .449 | .175 | .107 | -.387 |
| Ln_P_ppm | .528 | .078 | .070 | .717 | .022 | .026 |
| Ln_Cs_ppm | .050 | .188 | .165 | -.142 | .857 | -.108 |
| Ln_Mo_ppm | -.149 | .054 | .342 | .295 | .586 | .339 |
| Ln_Ag_ppm | .251 | -.033 | .247 | -.090 | -.045 | .687 |
| Ln_Au_ppb | -.310 | -.154 | .153 | .270 | .108 | .583 |

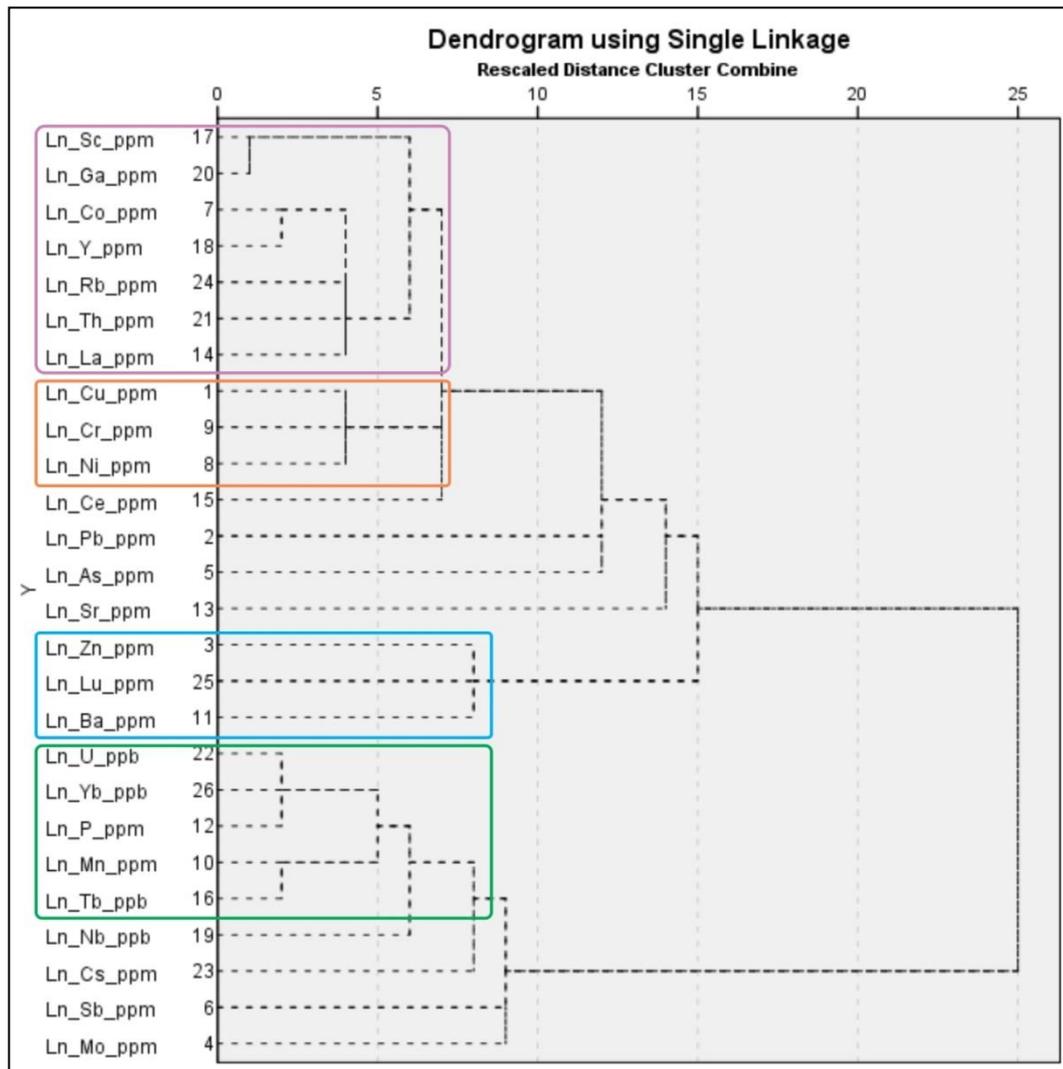


Figura 4.71. Dendrograma en sedimentos metamórficos del Proterozoico.

Cuadro 4.20. Asociaciones geoquímicas en sedimentos metamórficos del Proterozoico según análisis clúster.

| | |
|---|---------------------|
| 1 | Sc-Ga-Co-Y-Rb-Th-La |
| 2 | Cu-Cr-Ni |
| 3 | Zn-Lu-Ba |
| 4 | U-Yb-P-Mn-Tb |

Cuadro 4.21. Asociaciones geoquímicas de sedimentos volcánicos del Paleozoico superior según el análisis de componentes principales.

| | |
|-----|-----------------------------------|
| PC1 | Tb-Yb-Lu-La-Ce-Y-U-Th-Ga-Nb-Sr-Rb |
| PC2 | Ni-Co-Cr-Cu-Sc |
| PC3 | Pb-Sb-Zn-As-Ba-Mn |
| PC4 | Cs-Mo |
| PC5 | Ag-Au |

4.1.4.6 Intrusivos del Paleozoico (10_IP)

Del análisis de componentes principales (ACP) se dedujo 6 componentes, el componente PC1 define la asociación de los elementos geogénicos Yb-Y-Lu-Tb-Th-Ce-La-Ga-P; PC2 Cr-V-Sc-Co-Ni-Cu; PC3 Zn-Ag-Pb-As; PC4 Sr, Ba, Nb; PC5 Cs-Rb-Sb-Mn; PC6 Mo-U-Au (Cuadro 4.22 y Cuadro 4.24).

El análisis *clúster* confirma la asociación calcófila Co-Ni-Cu-As-Cr-Pb-La-Y-Tb-Th, el Zn se asocia a V-Ce y el P a U-Nb (Figura 4.72 y Cuadro 4.23).

Cuadro 4.22 Matriz de componentes rotados en sedimentos intrusivos del Paleozoico.

| Rotated Component Matrixa | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Component | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ln_Yb_ppb | .961 | .189 | .037 | -.018 | .070 | .006 |
| Ln_Y_ppm | .957 | .132 | .101 | -.008 | .155 | -.007 |
| Ln_Lu_ppb | .953 | .209 | .035 | -.094 | .054 | -.017 |
| Ln_Tb_ppm | .924 | .105 | .184 | .012 | .246 | -.024 |
| Ln_Th_ppm | .857 | .041 | -.167 | -.026 | -.137 | -.031 |
| Ln_Ce_ppm | .828 | .032 | -.020 | -.303 | .342 | .188 |
| Ln_La_ppm | .810 | -.001 | -.037 | -.336 | .286 | .241 |
| Ln_Ga_ppm | .668 | .537 | .113 | -.253 | .222 | .270 |
| Ln_P_ppm | .621 | .319 | .272 | .251 | -.062 | -.432 |
| Ln_Cr_ppm | .042 | .868 | .132 | -.123 | -.006 | .006 |
| Ln_V_ppm | .336 | .859 | -.013 | -.155 | -.087 | -.095 |
| Ln_Sc_ppm | .463 | .811 | -.027 | -.126 | .028 | -.073 |
| Ln_Co_ppm | .152 | .786 | .337 | .364 | .024 | -.088 |
| Ln_Ni_ppm | -.165 | .750 | .386 | .339 | -.015 | .003 |
| Ln_Cu_ppm | .098 | .707 | .530 | .122 | .069 | -.029 |
| Ln_Zn_ppm | .258 | .303 | .785 | .032 | .193 | .222 |
| Ln_Ag_ppb | -.036 | .198 | .780 | -.183 | .003 | -.091 |
| Ln_Pb_ppm | .182 | .041 | .768 | .066 | .327 | .344 |
| Ln_As_ppm | -.101 | .233 | .678 | .406 | .247 | -.119 |
| Ln_Sr_ppm | -.121 | -.071 | .111 | .903 | -.152 | -.017 |
| Ln_Ba_ppm | .062 | .211 | -.047 | .703 | .323 | .040 |
| Ln_Nb_ppm | .422 | .456 | .118 | -.635 | .070 | .065 |
| Ln_Cs_ppm | .204 | -.139 | .179 | .117 | .820 | -.045 |
| Ln_Rb_ppm | .491 | .089 | .137 | -.066 | .624 | .108 |
| Ln_Sb_ppb | -.124 | .008 | .267 | .527 | .549 | -.129 |
| Ln_Mn_ppm | .423 | .179 | .324 | -.030 | .515 | .238 |
| Ln_Mo_ppb | -.201 | -.055 | .338 | .258 | -.036 | .726 |
| Ln_U_ppb | .346 | -.018 | .163 | -.491 | -.164 | .641 |
| Ln_Au_ppb | -.218 | .114 | .316 | .206 | -.309 | -.549 |

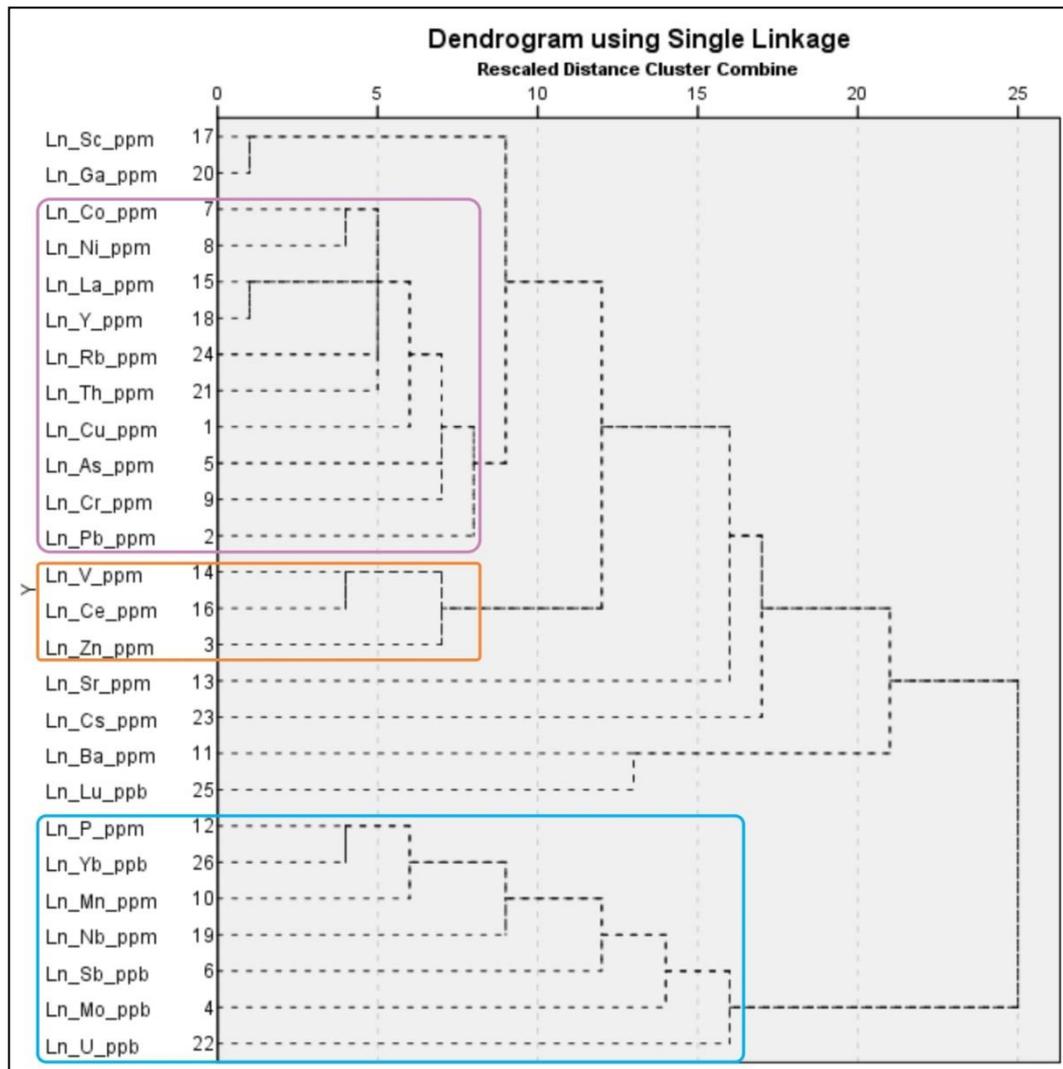


Figura 4.72. Dendrograma en sedimentos intrusivos del Paleozoico.

Cuadro 4.23. Asociaciones geoquímicas en sedimentos intrusivos del Paleozoico según análisis clúster.

| | |
|---|------------------------------|
| 1 | Co-Ni-La-Y-Rb-Th-Cu-As-Cr-Pb |
| 2 | V-Ce-Zn |
| 3 | P-Yb-Mn-Nb-Sb-Mo-U |

Cuadro 4.24 Asociaciones geoquímicas de sedimentos intrusivos del Paleozoico superior según el análisis de componentes principales.

| | |
|-----|--------------------------|
| PC1 | Yb-Y-Lu-Tb-Th-Ce-La-Ga-P |
| PC2 | Cr-V-Sc-Co-Ni-Cu |
| PC3 | Zn-Ag-Pb-As |
| PC4 | Sr-Ba-Nb |
| PC5 | Cs-Rb-Sb-Mn |
| PC6 | Mo-U-Au |

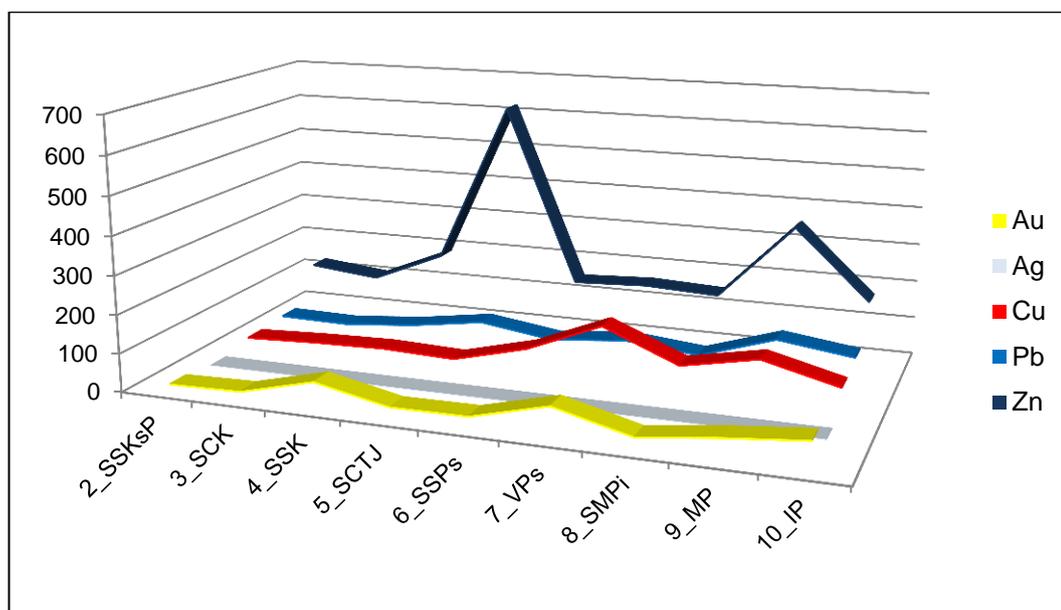
4.2. Discusión

Los mayores umbrales geoquímicos determinados en los dominios litoestratigráficos aflorantes en el sureste de la intercuenca Alto Marañón IV, son de zinc (Figura 4.73), donde se reportó seis anomalías geoquímicas, tres de ellas en ambientes sedimentarios carbonatados.

Los mayores umbrales geoquímicos de Au, Ag y Cu ocurren en el dominio volcánico del Paleozoico superior (7_VPs) (Figura 4.73), en este dominio se ha determinado 19 anomalías, los más importantes y relacionados a la mineralización son: Au-As-Nb-Th-Lu (14h-038), Ag-Cu-Zn-Co-Ni-V-Sc-Ga-Cs (15h-110), Ag-Lu (15h-108), Mo-Th-Au-Nb-Lu-Yb (15h-139), Pb-As-Mn-La-Tb-Y (14h-002), Zn-Mn (15h-107) y La-Ce-Tb-Y-U-Cs-Rb (15h-104).

En el dominio intrusivo del Paleozoico (10_IP), según, los umbrales geoquímicos (Figura 4.73), se han definido 42 anomalías; es el dominio en la que se ha determinado más anomalías de Au, Ag y Cu en relación al dominio anterior. Cabe resaltar que se definieron cinco anomalías de

plata, cuatro anomalías de oro, cuatro anomalías de cobre, dos anomalías de plomo, una de zinc y dos anomalías de elementos lantánidos (La, Ce, Th, La, Ce, Th, Tb, Y, Yb, Lu) (MAPA-29-18).



| Umbral | 2_SSKsP | 3_SCK | 4_SSK | 5_SCTJ | 6_SSPs | 7_VPs | 8_SMPi | 9_MP | 10_IP |
|--------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Au_ppb | 12.9 | 17.1 | 65.30 | 24.95 | 26.34 | 76.30 | 26.34 | 50.27 | 69.52 |
| Ag_ppm | 0.07 | 0.12 | 0.10 | 0.07 | 0.17 | 0.18 | 0.17 | 0.15 | 0.18 |
| Cu_ppm | 18.8 | 26.8 | 31.32 | 24.37 | 73.50 | 154.74 | 73.50 | 111.90 | 61.95 |
| Pb_ppm | 24.82 | 21.65 | 39.32 | 68.03 | 40.24 | 59.19 | 40.24 | 103.75 | 77.16 |
| Zn_ppm | 125 | 105 | 186.50 | 619.45 | 148.00 | 156.90 | 148.00 | 350.95 | 167.43 |

Figura 4.73. Valores umbrales de los principales elementos *comodities*.

Se han determinado 24 anomalías en las unidades del dominio metamórfico del Proterozoico (9_MP), de los cuales cuatro corresponden a plata, cinco a oro y uno a plomo-zinc.

La mayor concentración de oro se ubica en el río Marañón, el cual está asociado a depósitos aluviales, como se observa en la localidad de Tupen Grande donde la abundancia de oro es de 5000 ppb, asimismo, en la

localidad de Siucate la concentración de oro es de 1183 ppb, en ambos parajes el oro se encuentra asociado a la Ag y As.

Otra importante concentración de oro y su pathfinder As, se ubica en la quebrada Achupa de segundo orden, donde se dispersan sedimentos fluviales procedentes del dominio intrusivo del Paleozoico, esta anomalía forma un halo de dispersión de hasta 5 Km de longitud, el cual aguas abajo los sedimentos fluviales se mezclan con las del dominio volcánico del Paleozoico, en aguas superficiales con tendencia alcalina.

La mayor concentración de oro se relaciona a los depósitos fluviales de oro del río Marañón, asimismo, se registraron en el dominio intrusivo del Paleozoico.

La dispersión geoquímica de la plata en el dominio intrusivo del Paleozoico denota cinco anomalías, asociados a elementos liófilos, mientras que, las cuatro anomalías definidas en el dominio metamórfico del Paleozoico presentan una afinidad geoquímica con los elementos calcófilos (Pb, Zn), asociados al Sb.

Por otra parte, en el dominio volcánico del Paleozoico, se ha definido dos anomalías de plata; una de ellas se ubica en la quebrada Talara de la localidad de Pana, la plata tiene afinidades con elementos calcófilos (Cu,

Zn) asociados a elementos litófilos (Ni, Co, Sc). La mayor concentración de plata se determinó en el dominio metamórfico del Proterozoico.

En la quebrada Pana, se definió cuatro anomalías consecutivas de Cu asociados a Ni y V, donde se dispersan sedimentos fluviales del dominio intrusivo del Paleozoico. El cobre forma un halo de dispersión de hasta 7 km de longitud en aguas superficiales cuyo potencial de hidrogeno está en el rango de 6 a 7 el cual define un medio alcalino. Cabe mencionar que a 4 km al SO se ubica la ocurrencia Incapirca (vetas de Au).

Es importante mencionar que las anomalías de cobre en el dominio metamórfico del Paleozoico definen una asociación calcófila Cu-Zn-Mo, asociados a un pH alcalino. Los dos valores más altos de este metal se ubican en el dominio metamórfico del Proterozoico y en los sedimentarios y metamórficos del Paleozoico superior.

El plomo en el dominio intrusivo del Paleozoico se asocia a elementos calcófilos (Zn-As), mientras que en el dominio sedimentario carbonatado del Triásico Jurásico se asocia a elementos litófilos de las tierras raras. En el dominio volcánico del Paleozoico se asocia a As, Mn La, Tb, Rb, U.

Las mayores concentraciones de este metal se registraron en los dominios sedimentarios del Triásico Jurásico y metamórficos del Proterozoico e intrusivos del Paleozoico.

El zinc en el dominio intrusivo presenta una asociación con elementos calcófilos (Pb-Ag-Cu) asociados a Ni-V. En tanto que, en el dominio volcánico del Paleozoico solo se asocia con Mn, registrándose la mayor concentración en el dominio sedimentario del Triásico Jurásico.

En relación a las correlaciones bivariales, en los dominios intrusivos el oro tiene una correlación débil positiva con As y débil negativa con Ce y La. Asimismo, resalta las correlaciones muy fuertes de Zn y Pb y entre los elementos lantánidos. Se deduce que a concentraciones bajas de La y Ce se tendría concentraciones altas de oro, constituyendo un pathfinder.

En el dominio metamórfico el oro tiene una correlación negativa con Ga y Sc y débil positivo con As y Sr. Los elementos calcófilos presentan correlaciones fuertes a moderada. Al igual que el dominio anterior, las correlaciones entre los elementos lantánidos son de intensidad muy fuerte. Se resalta las correlaciones negativas de As y Ba con La y Ce.

En el dominio volcánico del Paleozoico el oro se correlaciona débilmente con Th, las correlaciones más resaltantes de este dominio es del Cu con el Sc, V y Co. En este dominio el Rb tiene una correlación negativa y fuerte con el cobre. Cabe resaltar que en este dominio diferencia de los descritos anteriormente, los elementos lantánidos no guaran correlación notable.

Las asociaciones geoquímicas resaltantes del dominio intrusivo del Paleozoico son las de los elementos lantánidos, Zn-Ag-Pb-As y Mo-U-Au (Cuadro 4.24). La asociación de los elementos lantánidos indica las condiciones geogénicas, la segunda asociación representa la presencia de mineralización, el cual se consideraría como elementos *pathfinder* en este dominio y la tercera asociación es propia de los intrusivos ácidos.

En el dominio metamórfico las asociaciones relevantes muestran los elementos lantánidos, Ag-Au, Pb-Sb-Zn-As-Ba-Mn; las primeras demuestran las condiciones geogénicas, las segundas se relacionan a la mineralización de oro y la tercera asociación se relacionaría a la mineralización polimetálica.

Es importante mencionar que, en el dominio volcánico del Paleozoico, no se muestran asociaciones de los elementos lantánidos; la asociación más relevante es de los elementos calcófilos (Zn-Cu-Sb-Ga) con los elementos liófilos (Ni-Co-V), As-Ag y Th-Mo-Au.

4.3. Contrastación de la hipótesis

El análisis y caracterización geoquímica por dispersión secundaria del sureste de la intercuenca Alto Maraón IV, entre Bambamarca y Pisúquia, demuestra que las abundancias significativas de oro y plata se relacionan a las unidades intrusivas del Paleozoico representados por unidades

tonalíticas y granodioríticas, cuya signatura de distribución es Au, Cu, As, Sc, Sr, V, Co, Ni, Ag, Pb, Zn, asociados a U, Mo, Pb, Ni, La (Mapa-29-18).

Del análisis bivariado de este dominio litoestratigráfico (Cuadro 4.6), se expone, que el oro tiene una débil correlación positiva con As y negativa con Ce y La. En tanto que la plata se correlaciona a Cu, Pb, Zn y el cobre demuestra fuertes correlaciones con Co y Ni, moderadas correlaciones con Zn, As, Sc, V y débiles con Ag, Pb, Ga, P.

El dominio metamórfico del Paleozoico, exhibe correlaciones de fuerte a muy fuerte entre los elementos lantánidos o tierras raras. Según el cuadro 4.5, se deduce correlaciones: muy fuertes entre Ce, La, Tb, Yb; fuertes entre Lu, Y. Además, es importante mencionar que el Ce y La tiene una fuerte correlación inversa con Sr.

El análisis bivariado del dominio intrusivo (Cuadro 4.6), sustenta la correlación inversa entre las tierras raras ligeras (LILE) (Ce, La) con las abundancias de oro.

CONCLUSIONES

Se han determinado 148 anomalías geoquímicas de los principales elementos trazas y elementos lantánidos en ocho dominios litoestratigráficos aflorantes en el sureste de la intercuenca Alto Marañón IV.

Los intrusivos del Paleozoico constituyen la unidad litoestratigráfica de mayor interés prospectivo, dado que, en este dominio se determinó las máximas abundancias de oro. Además, es el dominio en el que se define la mayor cantidad de asociaciones de elementos anómalos, destaca la asociación Au, Cu, As, V, Sc, Sr, Cr, P y Pb, Zn, As, Ce, Co, Ni, Cs, relacionado a la mineralización existente.

El La y Ce se correlaciona débil y negativamente al oro, el cual se define como elementos *pathfinders* para prospectar por oro en estos ambientes.

Los mayores umbrales de Au, Ag y Cu se determinaron en rocas del dominio volcánico del Paleozoico (Formación Lavasen), donde se determinó una anomalía de oro, asociada a As, Nb, Th, Lu. Mientras que en el dominio intrusivo del Paleozoico se determinó cuatro anomalías de oro asociados a Cu, As, V, Sc y en el dominio metamórfico se determinó cinco anomalías de oro asociados a plata.

La mayor cantidad de anomalías geoquímicas de plata se definió en los dominios metamórficos del Proterozoico e intrusivos del Paleozoico. En ambos dominios se resalta la asociación anómala de Ag, Pb, Zn, Mn. En los volcánicos del Paleozoico solo se definieron dos anomalías de plata asociadas con Cu, Zn, Co, Ni, V, Sc, Ga, Cs, Lu.

Del mismo modo, las anomalías de cobre se determinaron en el dominio intrusivo del Paleozoico asociado a Co, Ni, Sc, Cs, mientras que la única anomalía de este metal en el dominio metamórfico del Proterozoico está asociado a Cr, Mo, V, Sc, Ga, Cs, Rb. En el dominio volcánico del Paleozoico no se definió anomalías de cobre.

El comportamiento del Zn y Pb muestra las máximas concentraciones en el dominio sedimentario carbonatado del Triásico-Jurásico, la asociación definida en este dominio denota una calcofilia entre sus elementos el cual estaría ligada a una mineralización polimetálica.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar buenas prácticas de los protocolos de trabajo, en todas las fases del mismo.

Tener criterio en la elección de procedimientos estadísticos, puesto que una mala elección podría conducir a realizar interpretaciones erradas.

Antes de realizar la caracterización y/o interpretación, validar los datos a través de un control de calidad.

Continuar con estudios a escala local en las áreas donde se determinó anomalías importantes.

BIBLIOGRAFÍA

Andrews & Jones, D. A. 1968 - The application of geochemical techniques to mineral exploration. Colorado School Mines Mineral Industries Bulletin., v. 11, (6).

Basuki, N & Spooner, E., 2009 - Post-Early Cretaceous Mississippi Vallery-type Zn-Pb mineralization in the Bongará area, northern Peru: Fluid Evolution and paleo flow from Fluid. Exploration and mining geology, v. 18, n. 1-4, 25-39p.

Bellido, E & De Montreuil, L., 1972 - Aspectos Generales de la Metalogenia del Perú. Servicio de Geología y Minería. Boletín N° 1. Geología Económica.

Benavides, V., 1956 - Cretaceous System of Northern Peru. Bulletin American Museum, Natural History. New York, vol. 108.

Beus, A & Grigorian, S., 1977 - Geochemical exploration methods for mineral deposits. Applied Publishing LTD.

Boque, R., 2000 - Grupo de Quimiometría y Cualimetría, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, www.quimica.urv.es.

Boyle, R., 1974a - Element associations in mineral deposits and indicator elements of interest in geochemical prospecting (revised). Geology Survey Canada, paper 74-75, 40.

Carrasco, S., Sánchez, A & Galdós, J., 2006 - Petrografía y geoquímica de lavas almohadilladas de posible edad siluro-devoniana en la Cordillera Oriental de los Andes del Norte del Perú: región de Pataz-Balsas. En: Congreso Peruano de Geología, 13, Lima, PE, 2006. Resúmenes extendidos, Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 259-262.

Cardona, A. 2006 - Reconhecimento da evolucao tectónica da proto-margem Andina do centro-norte Peruano, baseada em dados geoquimicos e isotopicos do embasamento da Cordilheira Oriental na regio de Huanuco-La Unión. PhD thesis, Universidade de Sao Paulo. 247 p.

Chang, R & College,W., 2002 – Química. 7a. ed. México: McGraw-Hill, 943p.

Chira, J., Vargas, L., Castañeda, D., De La Cruz, C., Aguilar, P., Pascual, O & Pérez, V., 2017 - Prospección geoquímica regional de las cuencas de la vertiente pacífica al norte del paralelo 8°00' sur. INGEMMET, Boletín, Serie B: Geología Económica, 44, 200 p., 11 mapas.

Chira, J., Vargas, L., Vásquez, R & Palomino, Ch., 2011 - Prospección geoquímica regional de sedimentos de corriente entre los paralelos 8° - 9°, cuencas de la vertiente Atlántica. INGEMMET. Boletín, Serie B: Geología Económica, 27, 98 p., 8 mapas.

Chira, J., Valencia, M., Chero, D., Vargas, L., Rodríguez, H & Lizama, H., 2009 - Prospección geoquímica de sedimentos de quebrada en la Cuenca del Río Huaura. INGEMMET. Boletín, Serie B: Geología Económica, 20, 123 p., 7 mapas.

Haeberlin, Y., Moritz, R., Fontboté, L & Cosca, M 2004 - Carboniferous orogenic gold deposits at Pataz, Eastern Andean Cordillera, Peru: Geological and structural framework, paragenesis, alteration, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. *Economic Geology*, v. 99, n. 1, p. 73-112.

Goldschmidt, V., 1937 - The principles of distribution of chemical elements in minerals and rock, *J. Chem. Soc*, 655-673.

Gupta, C & Krishnamurthy, N., 2005 – Extractive Metallurgy of Rare Earth Elements. CRC, Press, 522p.

Haeberlin, Y., 2002 - Geological and Structural Setting, Age, and Geochemistry of the Orogenic Gold Deposits at the Pataz Province,

Eastern Andean Cordillera, Perú. Terre & Environnement, volume 36.
Section des Sciences de la Terre, Université de Genève.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 1995 - Geología del Perú.
INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 55, 177p.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2017 - Atlas Geoquímico del
Perú, diciembre de 2017. Lima: INGEMMET, 265p.

Kummel, B., 1950 - Stratigraphic Studies in Northern Peru, publicado por
American Journal of Sciences, volumen 248, 249-263p.

Levinson, A., 1980 - Introduction to Exploration Geochemistry, Applied
Publ. Co., Calgary, 612p.

Lepeltier, C., 1969 - A simplified statistical treatment of geochemical data
by graphical representation, Economic Geology, 64, 538-550.

Maluenda, R., 2014 – Fundamentos de estadística. Diplomado
internacional en geoestadística aplicada a la evaluación de recursos
mineros. BSgrupo, 224p.

Martín Serrano, A; Salazar, A; Nozal, F & Suárez, A. 2004 - Mapa
Geomorfológico de España y del margen continental a escala

1:1.000.000. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 232 pp. + mapas.

Megard, F. 1968 – Geología del cuadrángulo de Huancayo. INGEMMET. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional, v. 18, 123 p.

Mégard, F., 1979 - Estudio Geológico de los Andes del Perú Central, Lima-Perú, Instituto Geológico Minero Metalúrgico, Boletín Serie: Estudios Especiales N° 8, 227p.

Mena, M 2016 – La estadística como herramienta en ciencias de la tierra- 1ª ed. Buenos aires: Librería Akadia Editorial, 625p.

Mišković, A., Spikings, R., Chew, D., Košler, J., Ulianov, A & Schaltegger, U., 2009 - Tectonomagmatic evolution of Western Amazonia: Geochemical characterization and zircon U-Pb geochronologic constraints from the Peruvian Eastern Cordilleran granitoids. Geological Society of American Bulletin, v. 121, p. 1298-1324.

Quispe, J., Carlotto, V., Acosta, J., Macharé, J., Chirif, H., Rivera, R., Romero, D., Huanacuni, D. & Rodríguez, R. 2008. Mapa Metalogenético 2008. Resúmenes extendidos XIV Congreso Peruano de Geología.

Rivera, H., 2007 - Introducción a la Geoquímica General y Aplicada. 2ª Edición. Lima. Perú. 475 pp.

Rose, A., Haenkes, J & Web, J 1979 – Geochemistry in mineral exploration, academic, Londres y Nueva York, N. 2da. Edición del libro de Hawkes, J y Webb, J. 657p.

Rudnick & Gao., 2003 - Treatise of Geochemistry, Vol. 3, The Crust: Elsevier, pp.1-64.

Sánchez, A., 2006 - Las rocas graníticas y la mineralización aurífera asociada, en la Cordillera Oriental del norte del Perú, 6° 30' – 7° 30' S. Tesis de Maestría, Universidad Mayor de San Marcos.

Sánchez, A., Carrasco, S., Galdos, J & Lipa, V., 2006 - Geología del Batolito Gollón – Buldibuyo. INGEMMET. Informes Técnicos. <http://www.ingemmet.gob.pe/AplicacionesWeb/Productos/Default.aspx> . Sin Publicar.

Sánchez, A., 1995 - Geología de los Cuadrángulos de Bagua Grande, Jumbilla, Lonya Grande, Chachapoyas, Rioja, Leimebamba y Bolívar, Lima – Perú, Instituto Geológico Minero Metalúrgico, Boletín Serie A: Carta Geológica Nacional N°56, p. 287.

Samsom, I. & Wood, S. (2005) - The Rare Earth Elements: Behavior In Hydrothermal Fluids And Concentration in Hydrothermal Mineral Deposits, Exclusive of Alkaline Settings, in Linnen RL., and Samson I.M., eds., Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits : Geological Association of Canada. GAC Short Course Notes 17, pp. 269-297.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2014 –Lima: SENAMHI. (Consulta 21 enero 2014). Disponible en: <<http://www.senamhi.gob.pe/?p=1203>>.

Schreiber, D; Fonbote, L & Lochmann, D. 1990 - Geologic Setting, Paragenesis, and Physicochemistry of Gold Quartz Veins Hosted by Plutonic Rocks in the Pataz Region. Economic Geology Vol. 85, 1328–1347p.

Siegel, F. (1992) – Geoquímica Aplicada. Washington: Secretaría General de la OEA, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. 170 p.

Verstappen, H.Th. y Van Zuidam, R.M. (1991): The ITC System of Geomorphologic Survey. ITC Publication, Enschede. Vol. 10, 89 pp.

Viladevall, M., 2008 – La Prospección Geoquímica. Grupo consolidado en Geología Económica, Ambiental e Hidrología. Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona, 270p.

Wilson, J., 1984 - Carta Geológica de los Cuadrángulos de Jayanca 13-d), Incahuasi (13–e), Cutervo (13–f), Chiclayo (14–d), Chongoyape (14–e), Chota (14-f), Celendín (14-g), Pacasmayo (15-d) y Chepen (15-e), Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Boletín Serie A: Carta Geológica Nacional N° 38, p.104.

Wilson, J & Reyes, L., 1964 - Geología del Cuadrángulo de Pataz (Hoja 16-h), Comisión de la Carta Geológica Nacional, Boletín Serie A: Carta Geológica N° 09, 91p.

Wilson, J., Reyes., L., & Garayar, J., 1967 - Geología de los cuadrángulos de Mollebamba, Tayabamba, Huaylas, Pomabamba, Carhuaz y Huari. Servicio de Geología y Minería, Boletín N° 16. Lima.

ANEXOS