

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS ESPACIAL DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN HÍDRICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES CONDICIONANTES EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS, MINA A CIELO ABIERTO C.V.M. S.A. DIVISIÓN-NÍQUEL, TIARA – ESTADO ARAGUA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Quijada G., Geilin A.
Para optar al Título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, 2021

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS ESPACIAL DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN HÍDRICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES CONDICIONANTES EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS, MINA A CIELO ABIERTO C.V.M. S.A. DIVISIÓN-NÍQUEL, TIARA – ESTADO ARAGUA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. ALBA CASTILLO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Quijada G., Geilin A.
Para optar al Título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, 2021

ACTA DE DEFENSA
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

El día miércoles veintiséis de mayo del año en curso (26-05-2021) se realizó la defensa del Trabajo Especial de Grado de la Bachiller **GEILIN QUIJADA**, titular de la cédula de identidad V-22.035.547, titulado “ANÁLISIS ESPACIAL DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN HÍDRICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES CONDICIONANTES EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS, MINA A CIELO ABIERTO C.V.M. S.A. DIVISIÓN NÍQUEL, TIARA - ESTADO ARAGUA”, para aspirar al título de Ingeniería Geológica.

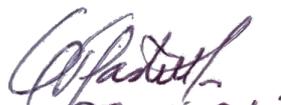
La Defensa se inició a las 2:00 pm y concluyó a las 5:00pm. La misma se realizó utilizando la aplicación Google Meet. Concluida la presentación oral fue cubierta la fase de preguntas y respuestas. Posteriormente, mediante reunión virtual, el Jurado deliberó y acordó que la nota a ser asignada es de veinte (20) puntos.



Prof. Liliana Urbina
Jurado



Prof. Santiago Marrero
Jurado



Prof. Alba Castillo
Coordinadora del Jurado

ACTA DE EVALUACIÓN DEL TRABAJO ESPECIAL DE GRADO DE LA BACHILLER GEILIN ALEJANDRA QUIJADA GARCÍA DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Los abajo firmantes, integrantes de la totalidad del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica para evaluar el Trabajo Especial de Grado titulado “ANÁLISIS ESPACIAL DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN HÍDRICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES CONDICIONANTES EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS, MINA A CIELO ABIERTO C.V.M. S.A. DIVISIÓN NÍQUEL, TIARA - ESTADO ARA-GUA”, presentada por la Bachiller **GEILIN ALEJANDRA QUIJADA GARCÍA**, titular de la cédula de identidad V-22.035.547, para aspirar al título de Ingeniería Geológica, en el acto de defensa pública, el día miércoles veintiséis de mayo de dos mil veintiuno, considerando que:

1. Se realizó una revisión sistemática, amplia y actualizada de la bibliografía temática en GeoAmbiente y Geoprocesamiento de Imágenes Satelitales, aplicada en beneficio de la construcción de una Minería Responsable.
2. La Investigación Geológica Petrográfica genera una solución tangible que pudiera ser utilizada como Instrumento de Gestión del Riesgo Socionatural.
3. Representa un aporte significativo, desde el punto de vista de la Ingeniería Geológica, porque consiste en un producto para el proceso de toma de decisiones orientado al diseño de soluciones tangibles, dentro de la problemática que resulta del transporte, aguas abajo, del sedimento generado por la minería de laterita (en este caso, niquelífera) a zonas altitudinalmente más bajas.
4. El producto tiene méritos para ser publicado en una revista científica en materia de Gestión Integral de Riesgos.

Se acuerda, por unanimidad, otorgar Mención Honorífica a la Bachiller GEILIN ALEJANDRA QUIJADA GARCÍA.

En la Ciudad Universitaria de Caracas, a los dos días del mes de junio de dos mil veintiuno.



Prof. Liliana Urbina
Miembro del Jurado



Prof. Santiago Marrero
Miembro del Jurado



Prof. Alba Castillo
Coordinadora del Jurado

*A Dios y a mis tíos,
Orlando García y Teresa García...*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su infinito amor y bendiciones.

A mis padres Yoli García y Genis Quijada, por todo su apoyo durante la carrera, por motivarme, guiarme, y por sobre todo darme siempre las mejores palabras de aliento para que nunca me rindiera. Gracias por su amor puro e incondicional.

A mis hermanos Génesis, Argenis y Carmen, por estar presentes a pesar de la distancia, por ser tan comprensivos y brindarme siempre su apoyo. Son un ejemplo a seguir para mí.

A la Universidad Central de Venezuela, por permitirme formarme durante estos años en sus maravillosos espacios, por ser mi segunda casa, porque gracias a ella tuve la dicha de conocer y aprender de excelentes profesionales.

Al profesor Ricardo Alezones, gracias por enseñarnos con tanta pasión.

A mis grandes amigos y compañeros de universidad que estuvieron presentes durante este camino, con los que pude aprender más de la ingeniería y la vida.

A la familia Carrillo Ojeda por abrirme las puertas de su casa durante el trabajo de campo. Gracias por tanto cariño y su increíble apoyo prestado.

A la empresa División Níquel, de la Corporación Venezolana de Minería (CVM), por accederme a realizar el estudio en sus instalaciones, y brindarme datos para la elaboración del trabajo. Además de permitirme interactuar y aprender de grandes personas como José Cova, y la familia Prado.

A mi tutora Alba Castillo, por permitirme ser parte de su línea de investigación. Gracias por todo el tiempo de dedicación en asesorías, por sus enseñanzas y orientación, por ayudarme a tomar consciencia de las problemáticas ambientales. Infinitas gracias.

Quijada G., Geilin A.

ANÁLISIS ESPACIAL DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN HÍDRICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES CONDICIONANTES EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS, MINA A CIELO ABIERTO C.V.M. S.A. DIVISIÓN-NÍQUEL, TIARA – ESTADO ARAGUA

Tutor Académico: Prof. Alba Castillo.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología,

Minas y Geofísica. Año 2021. 259 p

Palabras Claves: Erosión hídrica, Empresa C.V.M.S.A. División-Níquel, Análisis espacial, Factores condicionantes y desencadenantes, Mapa de susceptibilidad.

Resumen. Esta investigación tiene como propósito evaluar la susceptibilidad en el proceso de erosión hídrica de las cuatro (4) subcuencas hidrográficas de los ríos: Mesia, Tiara, Paito y Cagua, donde ocurre el yacimiento mineral Loma de Hierro, entre los estados Aragua y Miranda, en territorio venezolano. La finalidad consiste en establecer las relaciones entre variables geológicas y su influencia en la generación de sedimentos transportados en suspensión hídrica, a través de prácticas de geología de campo y del análisis espacial con imágenes satelitales y un modelo digital del terreno. Con este objetivo, se realizó geoprocesamiento de los factores condicionantes y desencadenantes, que intervienen en la generación del proceso erosivo: morfometría de las subcuencas, red de drenaje, tipo de suelo, longitud e inclinación de las pendientes, cobertura vegetal y condiciones climáticas, así como las vinculadas con las operaciones mineras actuales, realizadas por la empresa C.V.M.S.A. División-Níquel.

Las condiciones climáticas sobre el yacimiento, generan en la roca madre Harzburgita un alto grado de susceptibilidad al proceso de meteorización química, siendo estos factores desencadenantes en función de otras variables físicas, condiciones favorables para la formación de una Serpentinita, cubierta de manera ascendente por un horizonte de Saprolita y una Costra Laterítica. Temporalmente, la Laterita actúa como una capa protectora en la disminución y aporte de sedimentos, aunque

se observan costras agrietadas, producto de los esfuerzos dinámicos y la intervención por minería, activando el proceso de erosión, transporte y deposición de sedimentos, por la fuerza de arrastre del agua de escorrentía.

El uso de imágenes satelitales (ASTER y LANSAT 8) y el Sistema de Información Geográfico (ArcGis®), hicieron posible la elaboración de la base de datos correspondientes a los factores erosivos desencadenantes como la agresividad climática, y condicionantes como la erodabilidad del suelo, longitud e inclinación de las pendientes, cobertura vegetal, así como la generación de los mapas respectivos. Posteriormente, se integraron y geoprocesaron para la elaboración del Mapa de Susceptibilidad a la Erosión Hídrica. El comportamiento espacial de la erosión hídrica mostró, que las zonas de mayor susceptibilidad se concentran en condiciones de agresividad climática, en las laderas de las filas con inclinaciones pronunciadas, y en las áreas parcial y completamente descubiertas de vegetación, producto de las actividades antrópicas como la intervención minera actual. Asimismo, el control litológico y las propiedades de los suelos son determinantes, además de las características morfométricas intrínsecas de las subcuencas, por lo que se recomienda realizar estudios de susceptibilidad en las subcuencas de estos ríos, al menos cada 10 años, si los trabajos mineros y el urbanismo siguen creciendo aceleradamente, a los fines de conocer sus variaciones a lo largo del tiempo. Finalmente, se sugiere complementar con trabajos de campo más específicos, en lo litológico, morfométrico y georesistente, para un análisis más profundo de las relaciones entre factores desencadenantes y condicionantes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Consideraciones generales	1
1.2	Ubicación del área de estudio	2
1.3	Planteamiento del problema	4
1.4	Objetivos de la investigación	5
1.4.1	Objetivo general	5
1.4.2	Objetivos específicos.....	5
1.5	Justificación.....	6
1.6	Alcance.....	7
1.7	Metodología	8
1.8	Trabajos previos	9
2	MARCO TEÓRICO	12
2.1	Erosión	12
2.2	Clasificación de la erosión según su origen	13
2.3	Ciclo hidrológico.....	13
2.3.1	Componentes del ciclo hidrológico	14
2.3.2	Evapotranspiración	21
2.4	Cuenca hidrográfica	23
2.4.1	Propiedades de la cuenca.....	24
2.5	Erosión hídrica del suelo.....	33
2.6	Factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica.....	34
2.6.1	Precipitaciones.....	34
2.6.2	Erodabilidad del suelo	34
2.6.3	Longitud de la pendiente	35
2.6.4	Grado de la pendiente.....	35
2.6.5	Estado físico- químico del suelo.....	35
2.6.6	Vegetación:.....	35
2.7	Tipos de erosión	36
2.7.1	Erosión por salpicadura:	36
2.7.2	Erosión laminar:	36
2.7.3	Erosión por surcos:.....	37
2.7.4	Erosión por cárcavas:	38
2.8	Susceptibilidad	38
2.9	Estimación de la erosión hídrica	38
2.9.1	Uso de sistemas de información geográfica (SIG) e imágenes satelitales 39	
2.9.2	Factores para la evaluación de la susceptibilidad a la erosión hídrica ...	41
2.9.3	Análisis de decisión multicriterio.....	46
2.10	Influencia de la actividad minera en las variables geológicas	49
2.11	Procesos operativos mineros	50
2.12	Menas de Níquel	51
2.13	Características de la laterita níquelíferas.....	51

2.14	Clasificación de los depósitos lateríticos	51
	Depósitos de tipo silicato hidratado:	52
2.15	Mecanismos de formación y modificación	52
3	GEOLOGÍA REGIONAL	54
3.1	Generalidades regionales	54
3.2	Marco litológico	55
3.3	Perfil de meteorización del yacimiento Loma de Hierro	59
3.4	Marco estructural	61
3.5	Estructuras de deformación.....	63
	3.5.1 Foliación.....	63
	3.5.2 Plegamiento	63
	3.5.3 Fallamiento.....	65
3.6	Evolución tectono-estratigráfica	66
4	MARCO METODOLÓGICO	70
4.1	Generalidades.....	70
4.2	Etapa I: Compilación de información bibliográfica y cartográfica-geológica 70	
4.3	Etapa II: Trabajo de campo.....	71
4.4	Etapa III: Geomecánica de la roca y análisis petrográfico de muestras....	73
	4.4.1 Ensayo de resistencia al desgaste	73
	4.4.2 Análisis petrográfico	75
4.5	Etapa IV: Generación de mapas.....	76
4.6	Etapa V: Elaboración de mapas de susceptibilidad a la erosión hídrica a escala 1: 50.000.....	80
4.7	Etapa VI: Análisis inductivo para modelo de erosión de paisaje.....	83
5	GEOGRAFÍA FÍSICA	85
5.1	Relieve.....	85
	88	
5.2	Morfometría de las subcuencas.....	89
	5.2.1 Subcuenca Tiara	89
	5.2.2 Subcuenca Mesia	90
	5.2.3 Subcuenca Paito.....	90
	5.2.4 Subcuenca Cagua.....	91
	5.2.5 Tiempo de Concentración.....	92
	5.2.6 Equilibrio y maduración de las subcuencas.....	93
5.3	Red de drenaje.....	94
	5.3.1 Subcuenca Tiara	95
	5.3.2 Subcuenca Mesia	97
	5.3.3 Subcuenca Paito.....	100
	5.3.4 Subcuenca Cagua.....	101
5.4	Vegetación.....	102
	104	
5.5	Suelos	105
	5.5.1 Propiedades del suelo	107
5.6	Uso del suelo	109
	5.6.1 Tierras desnudas	110
	5.6.2 Afloramientos rocosos.....	111

5.6.3	Vegetación.....	111
5.6.4	Tejido urbano discontinuo.....	111
5.6.5	Zona industrial.....	112
5.6.6	Zona de extracción minera	112
5.6.7	Cultivos.....	112
5.6.8	Reservorio de agua	112
5.7	Características hidrometeorológicas	114
5.7.1	Precipitación.....	114
5.7.2	Precipitación media	117
	119	
5.7.3	Escorrentía superficial	120
5.7.4	Temperatura.....	134
5.7.5	Evapotranspiración potencial	138
	141	
5.7.6	Coeficiente de humedad	142
	145	
5.8	Geomorfología	146
6	GEOLOGÍA LOCAL	148
6.1	Generalidades.....	148
6.2	Unidad litológica.....	148
6.2.1	Sector I.....	148
6.2.2	Sector II	160
6.2.3	Sector III.....	171
6.2.4	Grado de alteración de la roca	179
6.3	Estimación del comportamiento geomecánico de la roca	182
6.4	Ambiente Morfodinámico.....	186
6.4.1	Procesos erosivos.....	187
6.5	Medidas implementadas para control de erosión	189
6.5.1	Lagunas de sedimentación.....	189
6.5.2	Gaviones	191
6.6	Análisis de susceptibilidad a la erosión por erosión hídrica	192
6.6.1	Mapa longitud de pendiente	192
6.6.2	Mapa erodabilidad del suelo.....	194
6.6.3	Mapa agresividad climática.....	197
6.6.4	Mapa cobertura vegetal	200
	201	
6.6.5	Asignación de pesos normalizados.....	202
6.6.6	Mapa de Susceptibilidad a la erosión hídrica	203
6.7	Validación del mapa de susceptibilidad a la erosión hídrica	204
6.7.1	Mapa factor de longitud de pendiente	204
6.7.2	Mapa índice de potencial de flujo	205
6.7.3	Mapa índice de humedad topográfica.....	205
6.7.4	Mapa índice normalizado de vegetación	208
7	INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN	210
7.1	Meteorización de la roca	210
7.2	Comportamiento geomecánico de la roca	212

7.3	Mapa de susceptibilidad a la erosión hídrica	212
7.4	Mapa potencial a la erosión hídrica	217
8	CONCLUSIONES	220
9	RECOMENDACIONES.....	226
10	BIBLIOGRAFÍA	227
	ANEXO I	234
	ANEXO II.....	243
	ANEXO III.....	251

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Imagen correspondiente a la ubicación del área de estudio.....	3
Figura 1.2. Diagrama de la metodología utilizada en el trabajo	8
Figura 2.1. Representación del proceso general de erosión.....	12
Figura 2.2. Esquema del Ciclo Hidrológico.....	14
Figura 2.3. Esquema representativo de la intensidad de la pluviosidad y su efecto en el escurrimiento e infiltración.....	15
Figura 2.4. Representación de la infiltración.	16
Figura 2.5. Ilustración de las fases de la Escorrentía	19
Figura 2.6. Representación de los hietogramas de precipitación	19
Figura 2.7. Representación evapotranspiración potencial, dependiente de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo.....	21
Figura 2.8. Ilustración delimitación de una cuenca.....	23
Figura 2.9. Conceptualización de las respuestas del caudal de las cuencas de acuerdo a sus geometrías.....	26
Figura 2.10. Ilustración morfología de las cuencas hidrográficas	30
Figura 2.11. Representación de los patrones fluviales más frecuentes	31
Figura 2.12. Representación de la longitud del cauce principal	31
Figura 2.13. Ilustración orden de los drenajes	32
Figura 2.14. Representación de la razón de bifurcación y su influencia sobre el escurrimiento.....	33
Figura 2.15. Esquema erosión del suelo causada por el agua	34
Figura 2.16. Esquema erosión por salpicadura, las gotas de lluvia arrancan y desplazan las partículas del suelo.....	36
Figura 2.17. Esquema erosión laminar.....	37
Figura 2.18. Representación de los elementos que intervienen en la erosión del suelo por surcos.....	37
Figura 2.19. Esquema del proceso de erosión por cárcavas.....	38
Figura 2.20. Perfiles esquemáticos de los principales tipos de depósitos lateríticos de NiCo	52
Figura 3.1. Representación subdivisión geográfica del norte de Venezuela.....	54
Figura 3.2. Corte vertical de los niveles de meteorización del yacimiento Loma de Hierro	60
Figura 3.3. Mapa y sección esquemática de la parte central de la Cordillera de la Costa.....	62
Figura 3.4. Esquema deformaciones Senonienses y paleógenas.....	63
Figura 3.5. Bosquejo de afloramientos en la Filita de Tucutunemo, se aprecian algunas de las deformaciones de la Napa Cauagua-El Tinaco.....	64
Figura 3.6. Corte del Esquisto de Tinapú y la Filita de Tucutunemo.	64
Figura 3.7. Representación de las estructuras mesoscópicas observada en la Filita de Paracotos	65
Figura 3.8. Representación del origen del terreno Tinaco-Tucutunemo desde el Albiense hasta el Paleoceno tardío.....	67
Figura 3.9. Representación del Hauteriviense (125 m.a.).....	68
Figura 3.10. Ilustración colisión de la Placa Caribe y la Placa Suramericana entre el Eoceno y el Oligoceno	69

Figura 4.1. Ilustración de los procedimientos del ensayo Slake Durability Test..	74
Figura 4.2. Esquema del equipo de ensayo Slake Durability Test.....	75
Figura 4.3. Representación de las variables cartografiadas mediante el SIG, a fin de evaluar las zonas con susceptibilidad a la erosión hídrica.	81
Figura 4.4. Representación mapa de susceptibilidad obtenido a partir del índice de Vegetación y los índices del terreno	82
Figura 5.1. Mapa con las unidades de relieve características de la zona de estudio.	88
Figura.5.2. Representación de las curvas hipsométricas de las subcuencas en función de la frecuencia de altitudes.....	94
Figura 5.3. Mapa con los patrones de drenajes característicos de las subcuencas Tiara, Mesia, Cagua y Paito.	96
Figura 5.4. Representación del mapa geológico del área de estudio	99
Figura 5.5. Imagen satelital con la combinación de las bandas (5,6,2).....	103
Figura 5.6. Mapa correspondiente a las unidades de vegetación del área de estudio.	104
Figura 5.7. Imagen satelital con la combinación de las bandas (5,4,3).....	106
Figura 5.8. Mapa con tipos de suelos encontrados en la zona de estudio.....	108
Figura 5.9. Imagen satelital con la combinación de las bandas (7,6,4).....	109
Figura 5.10. Mapa representativo de los usos del suelo en el área de estudio....	113
Figura 5.11. Histograma correspondiente a la precipitación media mensual multianual.....	115
Figura 5.12. Gráfica de la variación temporal de los valores totales mensuales de precipitación en la zona de estudio	115
Figura 5.13. Mapa correspondiente a la precipitación media anual.....	119
Figura 5.14. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para los espacios con escasa vegetación.	122
Figura 5.15. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para la vegetación herbazal.....	124
Figura 5.16. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para la vegetación cultivos.....	125
Figura 5.17. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el tejido urbano discontinuo.....	126
Figura 5.18. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para la vegetación sabana de montaña.	127
Figura 5.19. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para la zona de extracción minera.....	128
Figura 5.20. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para la vegetación de matorral.	130
Figura 5.21. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el material estéril.....	131
Figura 5.22. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para la vegetación de bosque nublado.	132
Figura 5.23. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para la zona industrial.	133
Figura 5.24. Histograma correspondiente a los valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para los afloramientos rocosos.....	134

Figura 5.25. Histograma correspondiente a la temperatura media mensual multianual.....	135
Figura 5.26. Gráfica de la variación temporal de los valores totales mensuales de temperatura en la región.....	135
Figura 5.27. Mapa de temperatura media anual (°C) para las subcuencas Tiara, Mesia, Paito y Cagua, en el período (1999-2017).....	137
Figura 5.28. Histograma correspondiente a la evapotranspiración potencial media mensual	138
Figura 5.29. Gráfico de evapotranspiración vs precipitación	140
Figura 5.30. Mapa de evapotranspiración potencial para las subcuencas Tiara, Mesia, Paito y Cagua, en el período (1999-2017).....	141
Figura 5.31. Histograma correspondiente al coeficiente de humedad media mensual multianual.....	142
Figura 5.32. Gráfico variación temporal de los valores totales mensuales del coeficiente de humedad en la región.....	144
Figura 5.33. Mapa correspondiente a la variación espacial del coeficiente de humedad para las subcuencas Tiara, Mesia, Paito y Cagua, en el período (1999-2017)	145
Figura 6.1. Fotografía afloramiento de peridotita ubicada en el nivel 1320 oeste del sector I.....	149
. 149	
Figura 6.2. Fotografía afloramiento de peridotita intensamente diaclasado y meteorizado, ubicado en el nivel 1320 oeste del sector I.....	150
Figura 6.3. Fotografía, horizonte saprolítico y la laterita del sector I.....	152
Figura 6.4. Representación Peridotita (harzburgita). Muestra M1-S1-1320.....	152
Figura 6.5. Representación Peridotita (harzburgita). Muestra M2-S1-1320.....	154
Figura 6.6. Representación petrográfica harzburgita. Muestra M2-S1-1320.....	155
Figura 6.7. Representación petrográfica harzburgita. Muestra M2-S1-1320.....	157
Figura 6.8. Representación serpentinita. Muestra M3-S1-1330	157
Figura 6.9. Representación petrográfica de serpentinita. Muestra M3-S1-1330	159
Figura 6.10. Fotografía de Serpentinita, ubicada en nivel 1240 este del sector II. Afloramiento fuertemente diaclasado	161
Figura 6.11. Fotografía afloramiento de Serpentinitas, ubicado en el nivel 1270 noreste en el sector II	162
Figura 6.12. Fotografía afloramiento de saprolita dominado por Serpentinitas, ubicado en nivel 1270 noreste del sector II.....	163
Figura 6.13. Representación serpentinita. Muestra M1-S2-1240	164
Figura 6.14. Representación petrográfica de serpentinita. Muestra M1-S2-1240.	166
Figura 6.15. Representación serpentinita. Muestra M2-S2-1270	166
Figura 6.16. Representación petrográfica de serpentinita. Muestra M2-S2-127.	168
Figura 6.17. Representación serpentinita. Muestra M3-S2-1270.	169
Figura 6.18. Representación petrográfica de serpentinita. Muestra M3-S2-1270.	171
Figura 6.19. Fotografía de afloramiento A: serpentinitas alteradas por la meteorización, con alto contenido de óxidos de Fe. B: muestras de garnierita encontradas en el afloramiento. Ubicado en el nivel 1180 este del sector II.	173

Figura 6.20. Fotografía de afloramiento A: serpentinitas con alto contenido de óxidos de Fe, muy intervenido por los trabajos mineros. B: recristalización de polimorfo de óxido de sílice hallado dentro de las diaclasas de la serpentinita. Ubicado en el nivel 1180 noreste, sector III	174
Figura 6.21. Representación de serpentinita. Muestra M2-S3-1180.....	174
Figura 6.22. Representación petrográfica de serpentinita. Muestra M2-S3-1180. 176	176
Figura 6.23. Representación serpentinita. Muestra M3-S3-1185	177
Figura 6.24. Representación petrográfica de serpentinita. Muestra M3-S3-1185. 179	179
Figura 6.25. Perfil de alteración.....	181
Figura 6.26. F Fotografía escorrentía superficial causada por las intensas lluvias presentadas en el mes de agosto de 2019. Ubicado en la zona Norte del sector II. 186	186
Figura 6.27. Fotografías formación de surcos en bermas, taludes y vías de acceso minero	187
Figura 6.28. Fotografías formación de cárcava, producto de la energía de las aguas de escorrentía, además de la falta de la cubierta vegetal debido a los trabajos mineros.....	188
Figura 6.29. Fotografías de lagunas de sedimentación.	190
Figura 6.30. Fotografía gaviones ubicados en el sector III.	191
Figura 6.31. Mapa de longitud de pendiente (LS)	193
Figura 6.32. Mapa de erosividad del suelo (Factor K).....	196
Figura 6.33. Mapa de agresividad climática.	199
Figura 6.34. Mapa de cobertura vegetal (Factor C)	201
Figura 6.35. Mapa de índice de potencia del flujo (SPI)	206
Figura 6.36. Mapa de índice de humedad topográfica (TWI).....	207
Figura 6.37. Mapa índice normalizado de vegetación (NDVI).....	209
Figura 7.1. Fotografías: a: Perfil de meteorización del yacimiento, se puede observar el horizonte de saprolita dominado por la serpentina y la limonita "laterita".	211
Figura 7.2. Mapa susceptibilidad a la erosión hídrica actual dentro de las subcuencas Tiara, Mesia, Paito y Cagua.....	216
Figura 7.3. Mapa erosión hídrica potencial en las subcuencas Tiara, Mesia, Paito, Cagua.....	219

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.3. Factores de corrección de la ETP estándar en función de la altitud de la región (Dunne y Leopold, 1978).....	23
Tabla 2.4. Valores de pendiente de una cuenca de acuerdo a las características cualitativas del relieve.....	25
Tabla 2.5. Valores de forma de acuerdo a las características cualitativas de la cuenca.....	27
Tabla 2.6. Rangos de las formas de las cuencas.	27
Tabla 2.7. Clasificación del índice de compacidad.....	28
Tabla 2.8. Clasificación del Índice de circularidad de Miller.	29
Tabla 2.9. Índice modificado de Fournier-Arnoldus.....	43
Tabla 2.10. Índices de erodabilidad del suelo propuestos por Hilborn.....	44
Tabla 2.11. Valores y características cualitativas de acuerdo a la escala de importancia relativa de los criterios de Saaty	47
Tabla 2.12. Valores de consistencia aleatoria de acuerdo al orden de la matriz. Saaty 48	
Tabla 2.13. Factores de formación en las lateritas de Ni	53
Tabla 3.1. Características cualitativas de la subdivisión de los sistemas montañosos por fajas y terrenos.	55
Tabla 3.2. Descripción de la unidad perteneciente a la faja Cauagua-El Tinaco. Terreno Tucutunemo.....	56
Tabla 3.3. Descripción de la unidad perteneciente a la faja Loma de Hierro. Terreno Loma de Hierro.	57
Tabla 3.4. Descripción de la unidad perteneciente a la faja Loma de Hierro. Terreno Loma de Hierro	58
Tabla 4.1. Descripción de las hojas cartográficas utilizadas.....	71
Tabla 4.2. Clasificación “Slake Durability Test (Ip)”	75
Tabla 5.1. Resultados de las características morfométricas de la subcuenca Tiara. 89	
Tabla 5.2. Resultados de las características morfométricas de la subcuenca Mesia. 90	
Tabla 5.3. Resultados de las características morfométricas de la subcuenca Paito. 91	
Tabla 5.4. Resultados de las características morfométricas de la subcuenca Cagua. 92	
Tabla 5.5. Tiempos de concentración, calculados a partir de la fórmula de Kirpich 92	
Tabla 5.6. Tiempos de concentración, calculados a partir de la fórmula de California Pulvert Practice	93
Tabla 5.7. Valores de longitudes de corrientes y densidad de drenaje de la subcuenca Tiara, con su razón de bifurcación.	95
Tabla 5.8. Valores de longitudes de corrientes y densidad de drenaje de la subcuenca Mesia, con su razón de bifurcación.	98
Tabla 5.9. Valores de longitudes de corrientes y densidad de drenaje de la subcuenca Paito, con su razón de bifurcación.....	100
Tabla 5.10. Valores de longitudes de corrientes y densidad de drenaje de la subcuenca Cagua, con su razón de bifurcación.....	101

Tabla 5.12. Datos correspondientes a las precipitaciones promedios mensuales y la precipitación anual años (1999-2017) de las estaciones ubicadas en las cercanías del área de estudio y el programa Larc-Power de la Nasa.	116
Tabla 5.13. Valores correspondientes a la precipitación media, mediante el método de las Isoyetas.	117
Tabla 5.15. Valores de umbral de escorrentía propios a los usos del suelo en la subcuenca Tiara.....	120
Tabla 5.16. Valores de umbral de escorrentía propios a los usos del suelo en la subcuenca Mesia.	121
Tabla 5.17. Valores de umbral de escorrentía propios a los usos del suelo en la subcuenca Cagua.....	121
Tabla 5.18. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción para el uso del suelo correspondiente a la vegetación escasa.....	122
Tabla 5.19. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la vegetación herbazal.....	123
Tabla 5.20. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el uso del suelo correspondiente a los cultivos.	124
Tabla 5.21. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el uso del suelo correspondiente al tejido urbano discontinuo.	125
Tabla 5.22. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la vegetación sabana de montaña.....	127
Tabla 5.23. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la zona de extracción minera.	128
Tabla 5.24. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la vegetación matorral.....	129
Tabla 5.25. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el uso del suelo correspondiente al material estéril.	130
Tabla 5.26. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la vegetación de bosque nublado.	131
Tabla 5.27. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la zona industrial.....	132
Tabla 5.28. Valores de precipitación neta (Pn) y abstracción, para el uso del suelo correspondiente a los afloramientos rocosos.....	133
Tabla 5.29. Valores de temperatura media anual (período 1999-2017) de las estaciones ubicadas en las cercanías del área de estudio y el programa Larc Power de la Nasa, calculados a partir del gradiente altotérmico (°C).....	136
Tabla 5.30. Valores de evapotranspiración potencial media anual (período 1999-2017) de las estaciones ubicadas en las cercanías del área de estudio y el programa Larc Power de la Nasa.....	139
Tabla 5.31. Valores correspondientes al coeficiente de humedad media anual (período 1999-2017) de las estaciones ubicadas en las cercanías del área de estudio y el programa Larc Power de la Nasa	143
Tabla 6.1. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Harzburgita. Muestra M1-S1-1320.	154
Tabla 6.2. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Harzburgita. Muestra M2-S1-1320.	156
Tabla 6.3. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M3-S1-1330.	159

Tabla 6.4. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M1-S2-1240.....	165
Tabla 6.5. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M2-S2-1270.....	168
Tabla 6.6. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M3-S2-1270.....	170
Tabla 6.8. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M3-S3-1185.....	178
Tabla 6.9. Resultados correspondientes al ensayo Slake-Durability Index, realizado en el laboratorio de Mecánicas de Rocas (UCV). Muestras M1-S1-1320.....	183
Tabla 6.10. Resultados correspondientes al ensayo Slake-Durability Index, realizado en el laboratorio de Mecánicas de Rocas (UCV). Muestras M1-S2-1240.	184
Tabla 6.11. Resultados correspondientes al ensayo Slake-Durability Index, realizado en el laboratorio de Mecánicas de Rocas (UCV). Muestras M3-S3-1185.	185
Tabla 6.12. Valores de erodabilidad de los suelos, en función a sus características, según Hilborn (2012).	194
Tabla 6.13. Índices de Fournier-Arnoldus obtenidos para las estaciones pluviométricas y registros climatológicos.....	198
Tabla 6.14. Jerarquización de cada factor evaluado de acuerdo a su nivel de importancia en el proceso de erosión hídrica.....	202
Tabla 6.15. Valores de pesos normalizados (W) obtenidos para cada factor.	202
Tabla 6.16. Cálculo de λ_{max} , para la obtención del valor de CI.	203

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En años recientes, la evolución de la consciencia humana ha permitido el reconocimiento de los efectos ecológicos adversos resultantes del uso minero del territorio. Según YOUNG (1992), en 1990, los paisajes mineros cubrieron más de medio millón de hectáreas en todo el mundo y son responsables de una mayor producción de sedimentos que: la construcción de carreteras pavimentadas, la construcción de viviendas y la agricultura. Éstas, en combinación, producen más sedimentos que los procesos naturales (HOOKE, 1994).

No obstante, la minería continúa siendo una actividad humana cuyo objetivo es el aprovechamiento de los materiales geológicos de la Tierra. Las diversas prácticas mineras requieren: eliminar vegetación, aumentar pendientes del terreno y, exponer rocas y suelos al desprendimiento y arrastre, en forma de sedimentos, hacia cauces naturales. Estos paisajes creados son más vulnerables a los procesos erosivos, a través de agentes dinámicos como el agua y el viento.

La erosión hídrica, puede generar grandes cantidades de sedimentos durante los intensos periodos de lluvia y ser transportados a los sistemas acuáticos cercanos, a través de la escorrentía de mina, el nivel de infiltración de la lluvia en la superficie, la longitud de la pendiente y la cantidad de vegetación. Además de los aspectos litológicos, como la presencia de materiales no consolidados o poco consolidados, que proveen la disponibilidad de materiales susceptibles a ser movilizados por el agua.

El presente Trabajo Especial de Grado tiene como propósito avanzar hacia un modelo predictivo de erosión del paisaje, a través de la integración de las variables geológicas e hidrológicas, en la mina a cielo abierto operada por División Níquel, de la Corporación Venezolana de Minería (CVM), desarrollada en el yacimiento

Loma de Hierro, en Tiara, estado Aragua. En este sentido se hace necesario determinar la susceptibilidad a la erosión (erodabilidad) y su distribución espacial, mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de imágenes satelitales (Teledetección), siendo las técnicas de geoprocésamiento herramientas eficaces para los estudios de este fenómeno. El interés final, es ayudar a controlar los sedimentos en suspensión hídrica, inducidos por la actividad minera, a los fines de minimizar los efectos en los cauces naturales y gestionar los riesgos socionaturales.

La unión entre el conjunto de información bibliográfica, el trabajo geológico de campo y el trabajo en laboratorio, permitirá mejorar el conocimiento de los parámetros geológicos en la zona de estudio, con la finalidad de evaluar la influencia de la erosión y así observar la variabilidad espacial y temporal del proceso.

1.2 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El yacimiento Loma de Hierro está localizado a 1.000 m.s.n.m (msnm), en la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa, aproximadamente a unos 87 kilómetros (Km) al suroeste de Caracas a 10°09' de latitud Norte y 67°08' de longitud Oeste, como se observa en la Figura 1.1, se encuentran limitando con los municipios Guaicaipuro y Santos Michelena, de los estados Miranda y Aragua, respectivamente. Se ubica entre las coordenadas planas (UTM): N 1.122.500, E 703.000 y N 1.124.000, E 704.500 sobre las Hojas Cartográficas 6746 I (SE-SO) y II (NO-NE), a escala 1:25.000.

El acceso a la mina se hace posible transitando los 19 kilómetros de la nueva vía a Tiara, que se encuentra en la progresiva 54 Km de la autopista Regional del Centro, en dirección a Valencia, municipio Guaicaipuro, estado Miranda.

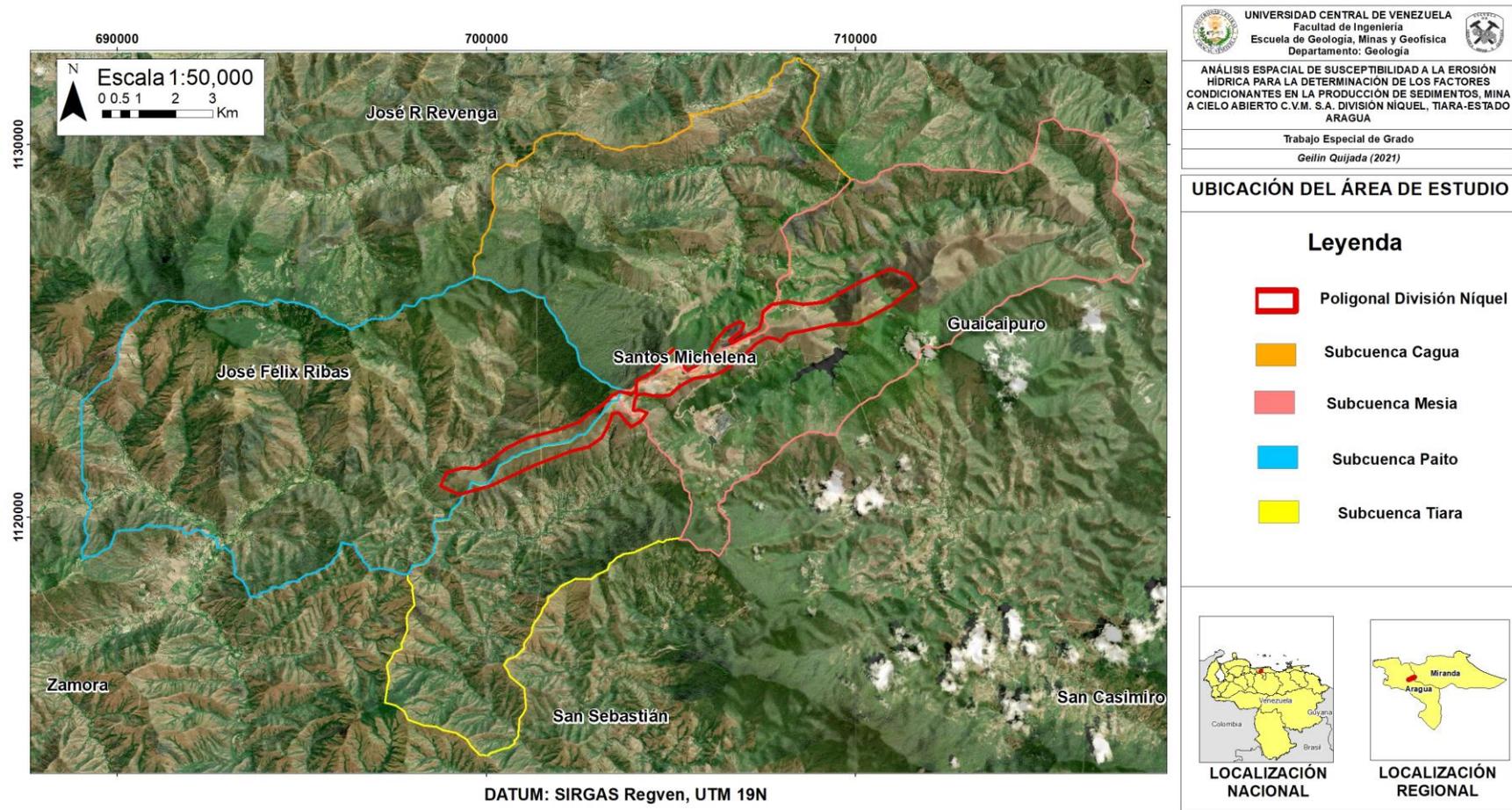


Figura 1.1. Imagen correspondiente a la ubicación del área de estudio.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La minería es una actividad compleja del sector económico primario, extractivo, debido a que el aprovechamiento de minerales constituye una alternativa para obtener rendimiento financiero y el uso social de materiales a partir de materia natural del subsuelo. Adicionalmente, ésta puede incidir en el desarrollo de la región geográfica donde se ubica el yacimiento mineral.

Sin embargo, esta actividad ocasiona daños ambientales, lo que resulta en una percepción pública negativa, por parte de una gran mayoría de la población. Uno de estos daños es la erosión del suelo que genera grandes cantidades de sedimentos en las fuentes hídricas, afectando a la fauna y la flora, y causando con el tiempo afectaciones directas en la vida humana.

Específicamente, en las minas a cielo abierto el principal elemento que ocasiona el arrastre de los sedimentos son las precipitaciones, ya que ocasionan la dispersión y transporte del suelo a causa del impacto de las gotas, siendo este proceso más marcado en las regiones del sistema climatológico de piso térmico lluvioso tropical.

En la empresa C.V.M. S.A. División-Níquel (en adelante, División Níquel), se han realizado investigaciones con métodos analíticos y de campo para estimar las tasas de erosión causadas por la excavación de lateritas níquelíferas. Se destaca a COVA (2018), quien aplicó el método experimental de Parcelas de Erosión con Clavos y el modelo RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Erosion*), evaluando la susceptibilidad en el proceso erosivo, con la finalidad de planificar y diseñar un sistema más adecuado para mejorar el rendimiento durante el uso minero del territorio. Sin embargo, en la mina no se han realizado estudios que integren el análisis de las variables geológicas e hidrológicas para estudiar el proceso erosivo. En este contexto se hace necesario realizar estudios que permitan conocer los parámetros hidrológicos y los factores que condicionan la ocurrencia de diversos procesos de degradación y el consecuente transporte de sedimentos.

Revisando la literatura técnica especializada, se resalta a SUÁREZ (2001), quien indica que entre los factores que afectan la susceptibilidad a la erosión de los taludes

y laderas está el clima como fuerza activa. Como fuerzas pasivas se tienen: las características del suelo (sistema suelo/roca), la morfología del terreno, la cobertura del suelo y los factores antrópicos.

Por esto, surge la necesidad de investigar algunas variables como la litología, hidrología y formas del relieve, las cuales permitan avanzar hacia un Modelo de Erosión del Paisaje (en inglés LEM, por *Landscape Erosion Model*) como herramienta en la ingeniería de control de sedimentos en suspensión hídrica.

La finalidad consiste en recomendar herramientas de gestión en la protección ambiental en minería a la operadora División Níquel, comprendiendo científicamente y profundamente a las variables hidrológicas y geológicas que inciden en el proceso erosivo local. Con esto, minimizar los efectos negativos en los cauces naturales del área geográfica aguas abajo de la mina y gestionar los riesgos siconaturales.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Integrar variables geológicas y geográficas en un Mapa de Susceptibilidad de Erosión Hídrica, como herramienta de gestión del riesgo siconatural, con fines de desarrollo de un modelo de paisaje de erosión en el control de sedimentos en minería a cielo abierto.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar las formas del relieve, con el fin de describir elementos del paisaje potencialmente erosivos.
- Integrar las características litológicas, con el objeto de conocer las áreas donde se están generando los mayores procesos de meteorización de la roca.
- Definir las características morfométricas de las subcuencas, con el objeto de establecer cuáles secciones están dominadas por la generación de escorrentía de saturación.

- Estudiar la influencia del clima, para conocer el impacto del ciclo hidrológico y su dinámica activa en el arrastre de los suelos y rocas por escorrentía de agua.
- Realizar ensayos petrográficos y de desgaste para definir las condiciones de alteración y las características georesistentes de la roca, a fin de determinar la resistencia al proceso de erosión hídrica.
- Integrar el conjunto de variables para la generación de un mapa de susceptibilidad, con el propósito de valorar los factores condicionantes en la producción de sedimentos.

1.5 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad existen modelos de evolución del paisaje que son una alternativa para predecir correctamente la forma del mismo, a partir de los procesos de erosión medidos, permitiendo observar la variabilidad espacial y temporal del proceso.

En las regiones del trópico las simulaciones de los modelos han simplificado a variables que influyen directamente en este fenómeno, ya que se necesitan incorporar otros parámetros para realizar un análisis de los datos de forma espacial y temporal, con la finalidad de que el modelo se aproxime cada vez más a la realidad.

Este trabajo presenta un estudio del estado actual de susceptibilidad a la erosión hídrica en División Níquel, a través del análisis de un conjunto de parámetros hidrológicos, factores como: cobertura vegetal, erodabilidad del suelo, longitud e inclinación de las pendientes, agresividad climática, además del grado de meteorización de la roca, actividades antrópicas desarrolladas, que condicionan la ocurrencia de procesos erosivos como la erosión hídrica y su consecuente transporte de sedimentos. Con énfasis en la evaluación y representación cartográfica de las áreas con mayor susceptibilidad a padecer esta problemática, se hace uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e imágenes satelitales, siendo herramientas potenciales para el análisis y seguimiento de este fenómeno en tiempo y espacio.

La adecuada integración de las condiciones físicas de la región de estudio y la determinación a priori de los procesos relevantes relacionados con la evolución del paisaje, permitirán mejorar el conocimiento de la hidrología, ayudando a disponer los sedimentos en suspensión, evitando influencias en los cauces de los ríos cercanos a la mina y la alteración de la calidad del agua utilizada en las actividades diarias de las comunidades aledañas a la C.V.M. S.A. División-Níquel.

1.6 ALCANCE

El alcance del Trabajo Especial de Grado consiste en el estudio de las variables físicas, como la precipitación, temperatura, evapotranspiración, coeficiente de humedad, escurrimiento, morfometría de cuencas, suelos, cobertura vegetal, uso actual del suelo, composición litológica, además de la estimación del comportamiento geomecánico de la roca frente al desgaste natural y el inducido por la minería.

Como se observa en la Figura 1.2 correspondiente al diagrama metodológico, el geoprocesamiento de estos datos permitirá generar un mapa de susceptibilidad, con el fin de sectorizar las áreas críticas al proceso de erosión hídrica y de esta manera aportar elementos para el análisis y diseño de estrategia y acciones en el control de sedimentos en suspensión hídrica a partir del laboreo a cielo abierto hacia los receptores naturales de agua, dentro de la vertiente.

Adicionalmente, es posible avanzar hacia un Modelo de Paisaje de Erosión integrando conocimientos obtenidos en otras canteras y minas a cielo abierto como herramienta de simulación predictiva.

1.7 METODOLOGÍA

A continuación, se detalla un flujograma con la metodología empleada.

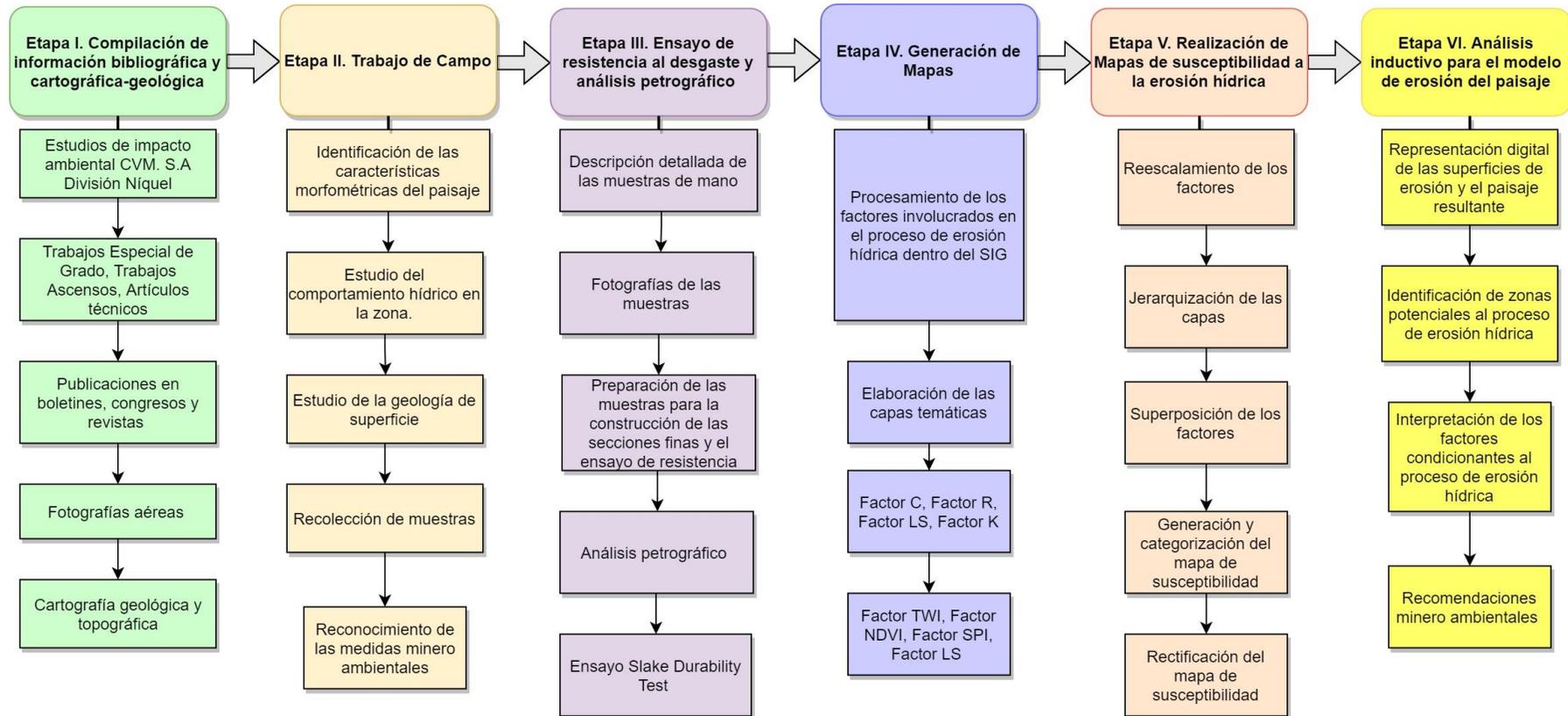


Figura 1.2. Diagrama de la metodología utilizada para elaborar el presente trabajo.

1.8 TRABAJOS PREVIOS

VAN ZANTEN (2004), en su Trabajo Especial de Grado (en adelante, TEG): “Diseño de manejo de aguas de mina, en el pit baqueta de la mina Paso Diablo, edo. Zulia, como aporte al desarrollo sustentable de la región”, propone la construcción de obras de drenaje para conducción de aguas de mina y retención de sólidos en suspensión hídrica, elaboró curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para el dimensionamiento de la canalización de aguas de escurrimiento, con la misión y visión de conservar el ambiente e insertar el concepto de sustentabilidad.

CABRERA & FERNÁNDEZ (2008) en su Trabajo: “Transporte y sedimentación en el Delta San Ignacio, Laguna de Tacarigua, estado Miranda, Venezuela”, estimaron el volumen de sedimentos transportados por la quebrada San Ignacio, cuantificando las variables como: cobertura vegetal, pendiente promedio de la cuenca y del cauce principal, precipitaciones máximas y lámina escurrida, mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y programas estadísticos, para facilitar la comprensión de las interrelaciones entre el conjunto de datos especializados.

BIRBE (2009), en su TEG: “Actualización geológica de la zona de explotación del yacimiento Loma de Hierro, estado Miranda”, realiza la descripción petrográfica y análisis químico de muestras de roca fresca, conformada por la unidad ígnea Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro, con el propósito de ampliar el conocimiento geológico de la zona de explotación.

OCHOA & REYES (2011), en su TEG: “Propuesta de los parámetros para el diseño de estabilidad de taludes y de los depósitos finales en minera Loma de Níquel, C.A. municipio Guaicaipuro, estado Miranda”, realizan un estudio para conocer los materiales que componen los taludes de explotación y los depósitos de estéril, a partir de ensayos de caracterización geomecánica correspondientes, con la finalidad de obtener los parámetros de estabilidad de taludes que permitan la seguridad de la planificación y operación mineras.

BASTEIRO & DELGADO (2011), en su TEG: “Evaluación de la agresividad de las precipitaciones en la cuenca del Arroyo El Pescado, provincia de Buenos Aires (Argentina), analizaron el patrón de distribución de las precipitaciones en la cuenca y la agresividad climática, mediante métodos geoestadístico. Muestran evidencias de necesidad de implementar programas integrados de manejos y conservación de suelos, usando la cuenca hidrográfica, a fin de revertir el incremento de erosión hídrica.

PORTUGUEZ (2015), en su TEG: “Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del río Sigüas utilizando geoinformática”, utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para el cálculo de las tasas de pérdida de suelo, mediante la aplicación del modelo USLE (Universal Soil Loss Equation), posibilitando la cartografía del estado erosivo de la cuenca, y la identificación de las áreas sensibles a la erosión.

CASTILLO, A. (2017), en su Trabajo de Ascenso: “Control de sedimentos en minería venezolana a cielo abierto”, realiza un estudio acerca del transporte de sedimentos en suspensión hídrica, en 6 minas a cielo abierto dentro del territorio venezolano. Presenta de forma detallada los factores que intervienen en la dinámica de erosión-sedimentación, a través de la energía para el rompimiento de fuerzas de enlace en los suelos. Muestra estimaciones de volúmenes de sedimentos en suspensión hídrica y recomendaciones de obra para la contención de sólidos transportados.

BASTIDAS (2018), en su TEG: “Propuesta de rediseño del manejo de agua de mina Colombia como aporte a la gestión integral de aguas, municipio El Callao, Estado Bolívar”, elaboró una propuesta de rediseño del sistema de drenaje de una estación de bombeo con bombas en paralelo, con la finalidad de extraer el flujo volumétrico proveniente del aforo de la inundación del agua de mina, para prevenir la afectación del recurso hídrico y ser reciclada como agua industrial en la planta de procesamiento mineral.

COVA (2018), en su TEG: “Propuesta de un sistema de control integral de sólidos en suspensión hídrica, mina a cielo abierto C.V.M. S.A. División-Níquel, Tiara – Estado Aragua”, efectuó mediante el método experimental de Parcelas de Erosión con Clavos y la aplicación del modelo RUSLE, la evaluación de la susceptibilidad

en el proceso erosivo, con la finalidad de planificar y diseñar un sistema más adecuado para mejorar el rendimiento durante el uso minero del territorio, con la visión de recuperar la cobertura vegetal y dar cierre a la mina.

BÁEZ (2018), en su TEG: “Análisis geomorfológico y tectónico para la determinación de los factores condicionantes en la producción de sedimentos de la subcuenca hidrográfica del río Salado”, analizó la influencia de los procesos de erosión superficial (geología y clima) y la tectónica activa (ocurrencia de sismos, presencia de ríos con trayectorias que forman ángulos rectos, fuertes pendientes) en la producción y acarreo de importantes volúmenes de sedimentos de la subcuenca hidrográfica del río Salado.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 EROSIÓN

La erosión del suelo es definida como un proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos (ELLISON, 1947).

Según CONSTANTINESCO (1976), la erosión del suelo se refiere a la eliminación, transporte y pérdida neta del mismo.

SUÁREZ (1998) explica que la erosión comprende los procesos de desprendimiento, transporte y depósito de las partículas del suelo o roca, a causa de agentes naturales y antrópicos, como se observa en la Figura 2.1.

La Comisión de las Comunidades Europeas (2002), definen a la erosión como un fenómeno geológico natural, el cual es originado por el desprendimiento de partículas del suelo debido a la acción del agua o el viento, por ende, son depositadas en otro espacio siendo este último proceso conocido como sedimentación.

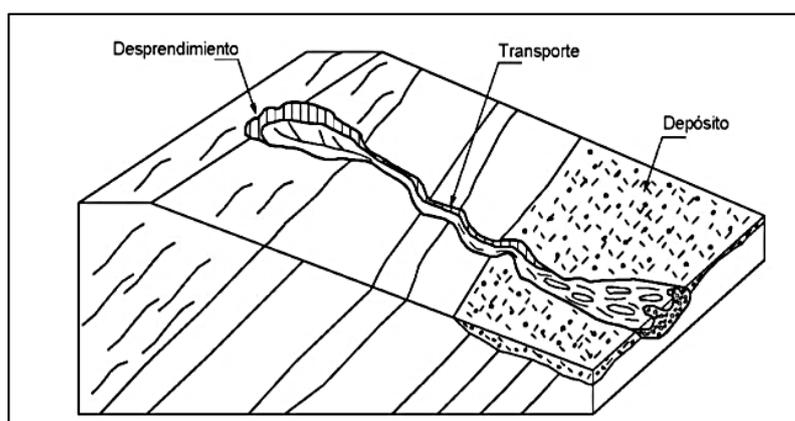


Figura 2.1. Representación del proceso general de erosión. Tomado de SUÁREZ (2001).

2.2 CLASIFICACIÓN DE LA EROSIÓN SEGÚN SU ORIGEN

El proceso de erosión se presenta de diversas formas. Si es clasificada según su origen, es definida como erosión natural y erosión antrópica. En este sentido, la erosión natural se caracteriza por poseer lentas tasas de erosión, en las cuales el ser humano no es capaz de distinguir los cambios topográficos que ocurren. De esta manera, los valles, cuencas y playas han sido creados bajo distintos procesos erosivos, siendo este tipo de erosión natural denominada como erosión geológica. Las zonas de alta pendiente, con suelos erosionables, escasa cobertura vegetal y lluvias significativas, son las más susceptibles a las pérdidas de suelo por erosión.

Por otro lado, la erosión antrópica es inducida por la acción del ser humano. Como, por ejemplo, la tala de un bosque, un incendio forestal, una construcción, la minería, lo cual provoca la alteración en el ciclo hidrológico, afectando las capas del suelo y la capacidad de infiltración (GARCÍA-CHEVESICH, 2008).

Como diversos autores han ido reconociendo a lo largo de estas décadas, el proceso de erosión es cada día uno de los factores más importantes en la contaminación de los volúmenes de agua, como afirma SUÁREZ (2001).

2.3 CICLO HIDROLÓGICO

FATTORELLI Y FERNANDEZ (2011) definen al ciclo hidrológico como, la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida, como se observa en el esquema de la Figura 2.2.

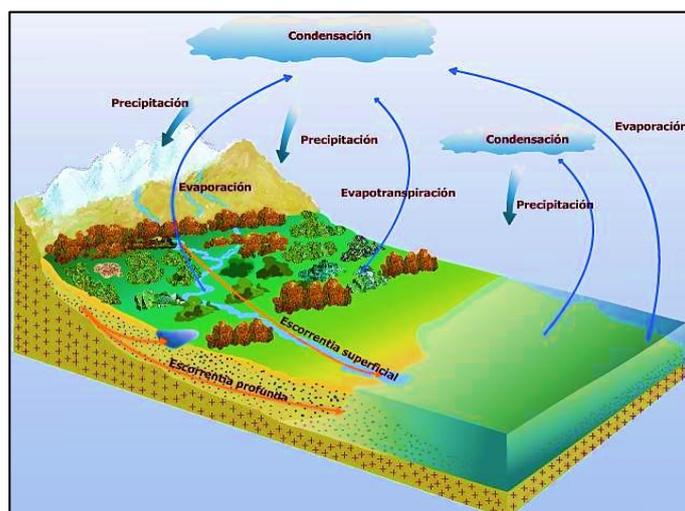


Figura 2.2. Esquema del Ciclo Hidrológico. Tomado Hernández, D. (2015).

2.3.1 Componentes del Ciclo Hidrológico

2.3.1.1 Precipitación

Es la caída de agua producto de la condensación del vapor de agua en las nubes, precipitando en forma líquida (lluvias) o sólida (nieve) para posteriormente escurrir o infiltrarse en el suelo.

La distribución de las lluvias va a depender de las condiciones topográficas de la zona a estudiar, es así como en las cadenas montañosas el ascenso del aire y las nubes, al pasar sobre las montañas generan precipitaciones orográficas a gran escala y magnitud, mientras que en las topografías llanas las precipitaciones son más bajas.

Las características más relevantes de las precipitaciones son: intensidad, duración y frecuencia (FAO, 1997). En la Figura 2.3 se observa, como en cuanto mayor sea la intensidad y la duración de una tormenta, más grande será el impacto de las gotas de lluvia y el volumen de escorrentía y consecuentemente existirá una mayor erosión del suelo (YAPUR, 2010).

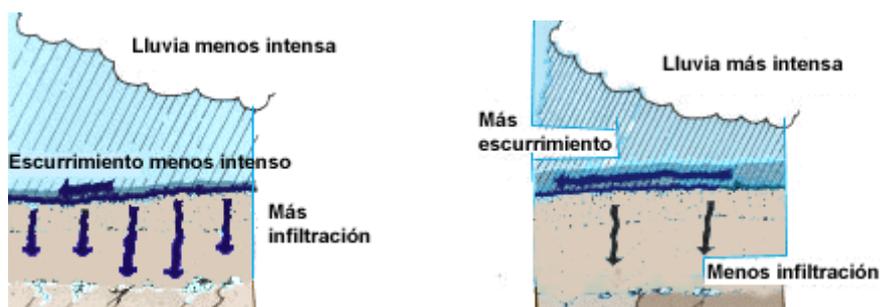


Figura 2.3. Esquema representativo de la intensidad de la pluviosidad y su efecto en el escurrimiento e infiltración. Tomado: FAO.

2.3.1.2 Análisis de las precipitaciones

El análisis de las precipitaciones en un determinado lugar se hace a través del estudio y tratamiento de series de datos, para:

1. Determinar periodos lluviosos y periodos secos, además de sus características
2. Calcular la precipitación media por área.
3. Observar la ocurrencia de grandes intensidades de lluvia.

Uno de los métodos utilizados para estimar la cantidad de precipitación que podría concentrarse en un sistema hidrogeológico, dentro de un área en particular es:

Isoyetas: consiste en la elaboración de isolíneas a partir de las estaciones pluviométricas dentro y fuera del área, donde estas isolíneas muestran lluvias de igual magnitud a lo largo de toda la línea. Posteriormente, dichas isolíneas son intersectadas con la zona de estudio, para finalmente calcular el área dibujada entre las isolíneas y los límites de la zona. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación (1)

$$P_{med} = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n \frac{P_{i-1} + P_i}{2} A_i \quad (1)$$

Donde:

P_{med} = precipitación media

A_t = área de la zona de estudio

P_i = altura de la precipitación de las isoyetas i

A_i = área parcial comprendida entre las isoyetas P_{i-1} y P_i

n = número de áreas parciales

2.3.1.3 Infiltración

Velocidad con la que el agua penetra en el suelo a través de su superficie, expresado en mm/h (DOMENICO Y SCHWARTZ, 1998). La capacidad de infiltración va a depender de las propiedades del suelo (permeabilidad, estructura, materia orgánica), el uso de suelo y la pendiente del terreno.

Siendo el valor del umbral de escorrentía dependiente de dichas características, y se encuentra tabulado en tablas convencionales, como la descrita por FERRER, F. J. (1991) y se indican en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2:

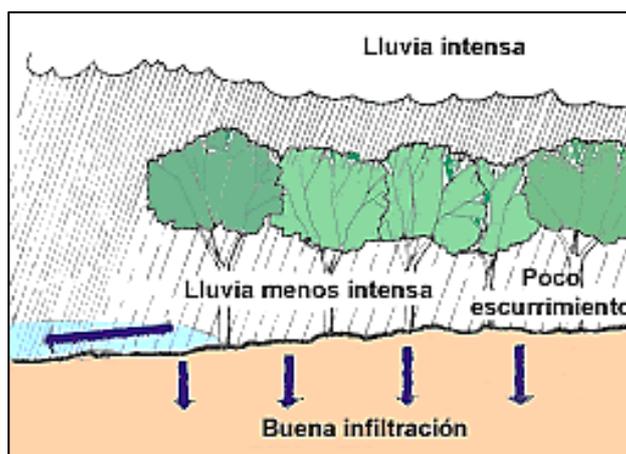


Figura 2.4. Representación de la infiltración. Se puede observar en las zonas con cobertura vegetal mayor infiltración, respecto a la descubierta. Tomado FAO.

Tabla 2.1. Valores iniciales del umbral de escorrentía. Tomado: Sánchez, J. (2017). Cálculo de precipitación neta mediante el método S.C.S.

Uso de suelo	[1]	Pen- diente (%)	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Tejido urbano continuo			1	1	1	1
Tejido urbano discontinuo, urbanizaciones, aeropuertos			24	14	8	6
Zonas industriales y comerciales			6	4	3	3
Granjas agrícolas			24	14	8	6
Zonas industriales			12	7	5	4
Grandes superficies de equipamiento y servicios			6	4	3	3
Autopistas, Redes viarias, ferroviarias			1	1	1	1
Complejos ferroviarios			12	7	5	4
Zonas de extracción minera			16	9	6	5
Escombreras y vertederos			20	11	8	6
Zonas de construcción			24	14	8	6
Zonas verdes urbanas			53	23	14	10
Instalaciones deportivas y recreativas, campos de golf			79	32	18	13
Resto de instalaciones deportivas y recreativas			53	23	14	10
Tierras de labor en secano (cereales)	R	≥ 3	29	17	10	8
	N	≥ 3	32	19	12	10
	R/N	< 3	34	21	14	12
Tierras de labor en secano (hortalizas)	R	≥ 3	23	13	8	6
	N	≥ 3	25	16	11	8
	R/N	< 3	29	19	14	11
Tierras abandonadas		≥ 3	16	10	7	5
		< 3	20	14	11	8
Terrenos regados permanentemente, cultivos herbáceos en regadío	R	≥ 3	37	20	12	9
	N	≥ 3	42	23	14	11
	R/N	< 3	47	25	16	13
Arrozales			47	25	16	13
Viñedos		≥ 3	62	28	15	10
		< 3	75	34	19	14
Frutales en secano		≥ 3	62	28	15	10
		< 3	75	34	19	14
Frutales en regadío		≥ 3	80	34	19	14
		< 3	95	42	22	15
Olivares		≥ 3	62	28	15	10
		< 3	75	34	19	14
Prados y praderas, prados arbolados		≥ 3	70	33	18	13
		< 3	120	55	22	14
Pastos en tierras abandonadas		≥ 3	24	14	8	6
		< 3	58	25	12	7
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en secano		≥ 3	39	20	12	8
		< 3	66	29	15	10
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en regadío		≥ 3	75	33	18	14
		< 3	106	48	22	15
Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en secano	R	≥ 3	26	15	9	6
	N	≥ 3	28	17	11	8
	R/N	< 3	30	19	13	10
Mosaico de cultivos permanentes en secano		≥ 3	62	28	15	10
		< 3	75	34	19	14

[1] R: Denota cultivo según la línea de máxima pendiente
N: Denota cultivo según las curvas de nivel

Tabla 2.2. Valores iniciales del umbral de escorrentía. Tomado: Sánchez, J. (2017). Cálculo de precipitación neta mediante el método S.C.S.

Uso de suelo	[1]	Pen- diente (%)	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en secano		≥ 3	39	20	12	8
		< 3	66	29	15	10
Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en regadío	R	≥ 3	37	20	12	9
	N	≥ 3	42	23	14	11
	R/N	< 3	47	25	16	13
Mosaico de cultivos permanentes en regadío		≥ 3	80	34	19	14
		< 3	95	42	22	15
Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en regadío		≥ 3	75	33	18	14
		< 3	106	48	22	15
Mosaico de cultivos mixtos en secano y regadío	R	≥ 3	31	17	10	8
	N	≥ 3	34	20	13	10
	R/N	< 3	37	22	14	11
Mosaico de prados o praderas con espacios significativos de vegetación natural y seminatural		≥ 3	70	33	18	13
		< 3	120	55	22	14
Sistemas agroforestales		≥ 3	53	23	14	9
		< 3	80	35	17	10
Pastizales naturales. Pastizales, praderas o cultivos agrícolas con arbolado adhesionado		≥ 3	53	23	14	9
		< 3	80	35	17	10
Frondosas, Perennifolias, Caducifolias y marcescentes			90	47	31	23
Otras frondosas de plantación		≥ 3	79	34	19	14
		< 3	94	42	22	15
Bosques de ribera			76	34	22	16
Bosques de coníferas, bosque mixto. Laurisilva			90	47	31	23
		≥ 3	70	33	18	13
Prados alpinos, Pastizales supraforestales		< 3	120	55	22	14
		≥ 3	70	33	18	13
Formaciones herbáceas de llanuras aluviales inundadas y llanuras costeras, tierras bajas		< 3	120	55	22	14
		≥ 3	24	14	8	6
Pastizales mediterráneos		< 3	57	25	12	7
		≥ 3	53	23	14	9
Otros pastizales templado oceánicos		< 3	79	35	17	10
			76	34	22	16
Landas y matorrales mesófilas, Landas y matorrales en climas húmedos. Vegetación mesófila			60	24	14	10
Fayal-brezaal macaronésico, vegetación esclerófila			60	24	14	10
Matorrales subarborescentes o arbustivos muy poco densos			40	17	8	5
Matorrales xerófilos macaronésicos, Claras de bosques			60	24	14	10
Zonas empantanadas fijas o en transición			75	34	22	16
Matorral boscoso			152	152	152	152
Playas y dunas			15	8	6	4
Ramblas con poca o sin vegetación		≥ 3	2	2	2	2
Afloramientos rocosos y canchales		< 3	4	4	4	4
		≥ 3	24	14	8	6
Espacios con vegetación escasa, Xeroestepa subdesértica		< 3	58	25	12	7
			15	8	6	4
Cárcavas y zonas en proceso de erosión, zonas quemadas			2	2	2	2
Humedales y zonas pantanosas			2	2	2	2
Marismas			2	2	2	2

[1] R: Denota cultivo según la línea de máxima pendiente
N: Denota cultivo según las curvas de nivel

2.3.1.4 Escorrentía

Es la proporción de lluvia que fluye sobre la superficie de terreno SUÁREZ (2001). La escorrentía se divide en cuatro sub partes como se observa en la Figura 2.5, descritas a continuación:

- Escorrentía superficial: es aquella agua que escurre y forma parte de los ríos, y fluye a partir de un camino hasta concentrarse finalmente en otro cuerpo de agua superficial (ríos, quebradas, lagunas, mar).

- Interflujo: se refiere a la cantidad de agua que se infiltra en las partes más superficiales del suelo, pero no forma parte del sistema subterráneo. Éste puede ser absorbido por la cobertura vegetal, evapotranspirado, o como humedad del suelo.
- Canales de precipitación: agua que cae en forma de lluvia, y se concentra directamente en las masas de agua.
- Flujo subterráneo o flujo base: es toda el agua que logra infiltrarse a profundidad y forma parte del sistema subterráneo.

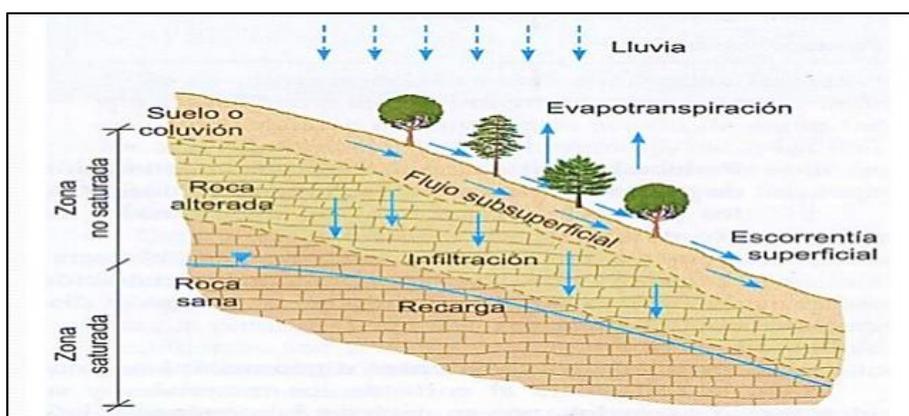


Figura 2.5. Ilustración de las fases de la Escorrentía. Tomado de: Quiñones, A. (2017).

Hietograma: para la cuantificación de la intensidad de la lluvia en un evento pluviométrico según su duración se utilizan los Hietogramas. Como se observa en la Figura 2.6, este es un gráfico de barras que representa la variación de altura de

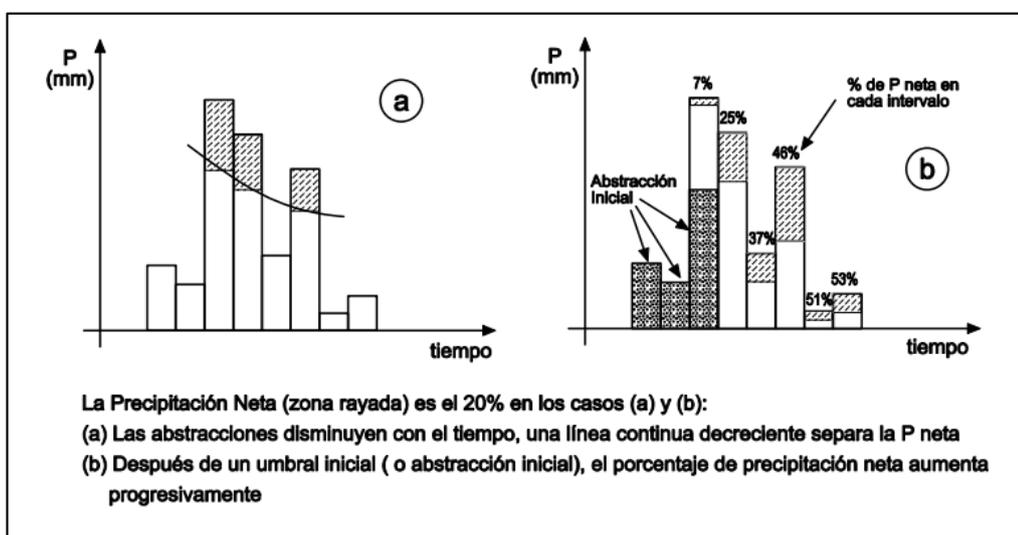


Figura 2.6. Representación de los hietogramas de precipitación. Tomado: Sánchez, J. (2017).

precipitación o intensidad de lluvia en función de un intervalo de tiempo previamente seleccionado.

En este sentido, los Hietogramas se realizan para estimar qué parte de la precipitación contribuye al flujo superficial y cuánta se infiltra en el suelo. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación (2):

$$P_n = \frac{(P - P_o)^2}{P + 4P_o} \quad (2)$$

Donde:

P_n = Precipitación Neta

P = Precipitación total registrada

P_o = Abstracción inicial o Umbral de Escorrentía

Inicialmente, se deben consultar las tablas para el cálculo de la Abstracción Inicial, las cuales vienen dadas por valores de CN (curve number o abstracción inicial) o en valores de Umbral de Escorrentía (P_o), como se muestra en la Tablas 2.1 y 2.2. Posteriormente se calcula la Precipitación Acumulada (ΣP) con base a los valores de Precipitación total registradas en campo.

Si ΣP_i (Precipitación Acumulada por hora) es menor a la Abstracción Inicial (P_o) ya calculada, entonces la Precipitación Neta Acumulada (ΣP_n) por hora es 0. Pero, si la Precipitación Acumulada para el tiempo i es mayor a la Abstracción Inicial, se calcula la Precipitación Neta con la Ecuación 2, aplicada para la precipitación acumulada.

Para obtener los valores de Precipitación Neta (P_n), por período de tiempo, se resta el valor de la Precipitación Neta Acumulada el valor anterior. Mientras que, para el cálculo de las Abstracciones, se resta el valor de la precipitación medida en campo y la Precipitación Neta Acumulada.

2.3.2 Evapotranspiración

Pérdida de agua constituida por la evaporación de la humedad del suelo y transpiración de los cultivos (Sighal et al., 2010). Se reconocen dos tipos en el proceso de evapotranspiración: Potencial y Real.

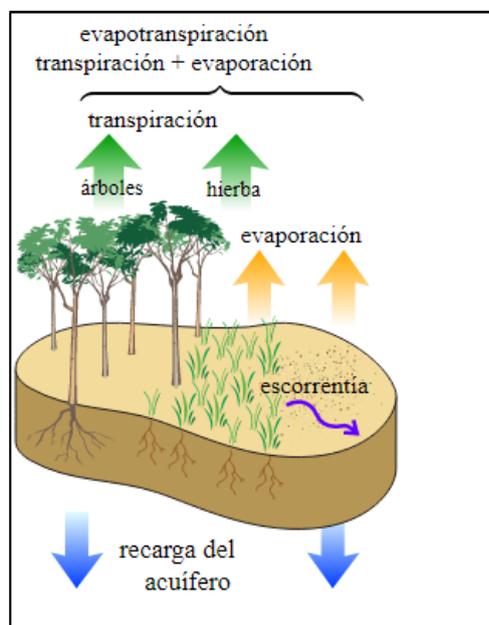


Figura 2.7. Representación evapotranspiración potencial, dependiente de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo. Tomado de: Stefan Scheller (2017).

La Evapotranspiración Potencial (ETP) es la máxima cantidad posible de agua perdida en el suelo, por evaporación y transpiración, en el supuesto caso que estuviera saturado. Para la determinación de este parámetro, se utilizan los cálculos de Thornthwaite, basados en la temperatura media, y una corrección de acuerdo a la duración astronómica del día y el número de días del mes.

De acuerdo a Thorntwaite (1948), la evapotranspiración es proporcional a la temperatura afectada por un coeficiente exponencial "a", como se observa en la ecuación (3).

$$ETP_m = 16 * \left(\frac{10T}{l}\right)^a \quad (3)$$

Donde:

ETP_m : Evapotranspiración mensual, sin ajustar, en mm (mm/mes)

ι = Índice de calor anual

T_m = temperatura media mensual en °C

a = coeficiente exponencial

El Índice de calor anual (ι), se calcula a partir de la ecuación (4), como la suma de todos los índices de calor mensual, mientras que la constante “a”, se determina en función del índice de calor anual mediante la ecuación (5).

$$\iota = \sum^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad (4)$$

Donde:

ι = Índice de Calor Anual

T_m = temperatura media mensual en °C

$$a = 675x(\iota - 10^{-3})^3 - 77,1x(\iota - 10^{-3})^2 + 1792x(\iota - 10^{-5}) + 0,493 \quad (5)$$

Donde:

ι = Índice de calor anual

a = constante del índice de calor

Según Thornthwaite para el cálculo de la ETP para un mes determinado, primeramente, se corrige la ETP sin ajustar, a través del factor de corrección (L) descrito en la Tabla 2.3, la cual considera el número de día del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud de la región de estudio. Este factor de corrección (L) se introduce en la ecuación (6) como el índice de iluminación mensual en unidades de doce (12) horas, que deberá multiplicar a la ETP_m sin ajustar, para obtener la ETP corregida s (mm/mes).

$$ETP \text{ (mm)}/\text{mes} = ETP_m \times L \quad (6)$$

Donde:

ETP_m = Evapotranspiración Mensual, sin ajustar, en mm (mm/mes)

L = factor de corrección del número de días del mes (Nd_i) y la duración astronómica del día N_i (horas de sol).

Tabla 2.3. Factores de corrección de la ETP estándar en función de la altitud de la región (Dunne y Leopold, 1978).

Latitud	MES DEL AÑO											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
60°N	0,54	0,67	0,97	1,19	1,33	1,56	1,55	1,33	1,07	0,84	0,58	0,48
50°N	0,71	0,84	0,98	1,14	1,28	1,35	1,33	1,21	1,06	0,90	0,76	0,68
40°N	0,80	0,89	0,99	1,10	1,20	1,25	1,23	1,15	1,04	0,93	0,83	0,78
30°N	0,87	0,93	1,00	1,07	1,14	1,17	1,16	1,11	1,03	0,96	0,89	0,85
20°N	0,92	0,96	1,00	1,05	1,09	1,11	1,10	1,07	1,02	0,98	0,93	0,91
10°N	0,97	0,98	1,00	1,00	1,05	1,06	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,96
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10°S	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,96	0,97	0,97	1,00	1,03	1,05	1,06
20°S	1,10	1,07	1,02	0,98	0,93	0,91	0,92	0,92	1,00	1,05	1,09	1,11
30°S	1,16	1,11	1,03	0,96	0,89	0,85	0,87	0,87	1,00	1,07	1,14	1,17
40°S	1,23	1,15	1,04	0,93	0,83	0,78	0,80	0,80	0,99	1,1	1,2	1,25
50°S	1,33	1,19	1,05	0,89	0,75	0,68	0,70	0,70	0,97	1,13	1,27	1,36

2.4 CUENCA HIDROGRÁFICA

Es una superficie de terrenos rodeado por una divisoria (parte-aguas) en donde al agua proveniente de la precipitación, se concentra y pasa por un punto determinado del cauce principal que la drena, como se observa en la Figura 2.8. Siendo el parte-aguas la máxima altura, llamada así porque divide las aguas de precipitación en dos dirigiéndola hacia una u otra red de drenaje (RUIZ, 2001).

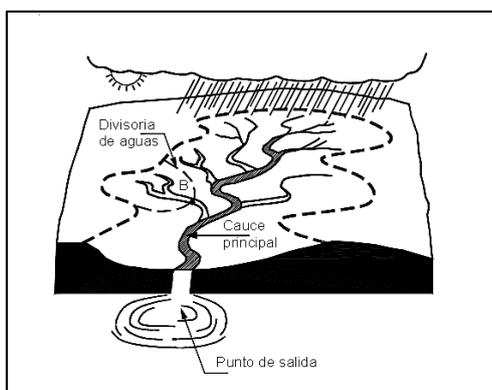


Figura 2.8. Ilustración delimitación de una cuenca. Tomado de: Suárez, J. (2001).

2.4.1 Propiedades de la cuenca

Área: es la superficie circunscrita por la divisoria de agua hasta un punto de una corriente; el área se determina a partir de mapas topográficos y se mide en hectáreas o kilómetros cuadrados.

Perímetro: se corresponde con la longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria de agua, y define los límites de la cuenca. Se mide en metros o kilómetros.

Pendiente Media de la Cuenca: es la media ponderada de las pendientes correspondientes a superficies elementales en las cuales la pendiente se puede considerar constante (GUILLARTE, 1978). La pendiente media se calcula a través de la ecuación (7).

$$S = \sum_{i=1}^m \frac{n_i s_i}{n} \quad (7)$$

Donde:

S= Pendiente media de la cuenca

m= número de intervalos

n_i = número de ocurrencia para cada intervalo

s_i = pendiente promedio del intervalo

n = número de ocurrencia total

Pérez 1979, definió las características del terreno de acuerdo a los órdenes de magnitud de los valores de pendiente obtenidos. En la Tabla 2.4 se observan dichas formas del relieve.

Tabla 2.4. Valores de pendiente de una cuenca de acuerdo a las características cualitativas del relieve (Pérez, 1979).

Pendiente media (%)	Terrenos
0 - 2	Llano
2 - 5	Suave
5 - 10	Accidentado medio
10 - 15	Accidentado
15 - 25	Fuertemente accidentado
25 - 50	Escarpado
>50	Muy Escarpado

Pendiente media del río principal: es definida como la inclinación respecto a la horizontal con la cual escurre el agua (Peña, 2015). Se calcula a través de la siguiente ecuación (8), siendo la diferencia total de altura del río entre su longitud.

$$S = \frac{\text{Diferencia de alturas}}{\text{longitud del río}} \times 100 \quad (8)$$

Forma de la Cuenca: la forma de la cuenca rige principalmente la tasa, a la cual el agua es suministrada al cauce principal, desde su nacimiento hasta su desembocadura. A través de su análisis se puede determinar en gran parte la magnitud de los problemas de erosión, socavación y de avalancha. Gravelius (1964), propuso los siguientes índices para expresar las formas de las cuencas, como se observa en la Figura 2.9.

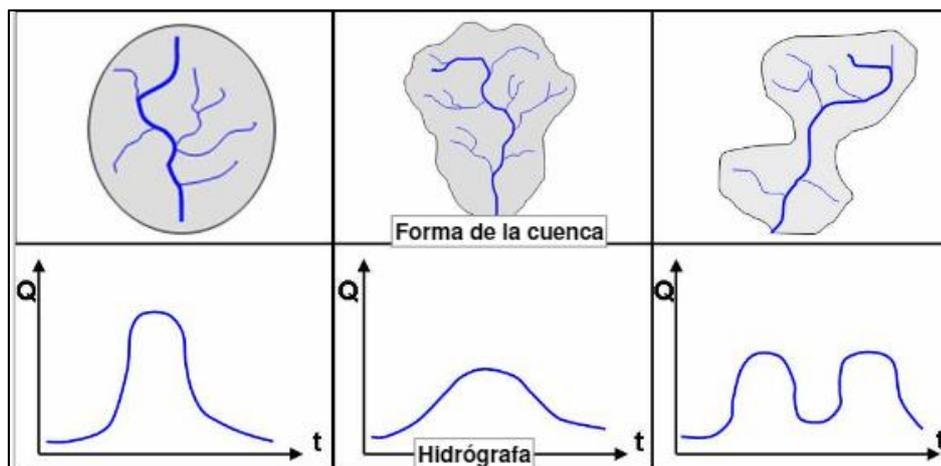


Figura 2.9. Conceptualización de las respuestas del caudal de las cuencas de acuerdo a sus geometrías. Duarte, V (2017).

Factor de Forma: se define como la relación que existe entre el área de la cuenca y su longitud. Mediante este factor, se explica la elongación de una cuenca y su tendencia respecto a las crecientes, es decir, una cuenca con un factor de forma, bajo es menos probable que ocurra una lluvia intensa simultáneamente sobre toda su extensión que, en un área de igual tamaño, pero con factor mayor (RUIZ, 2001). Éste se calcula a través de la siguiente ecuación (9) :

$$F_f = \frac{A}{L^2} \quad (9)$$

Donde:

F_f = Factor de Forma

A = área de la cuenca (Km^2)

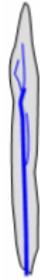
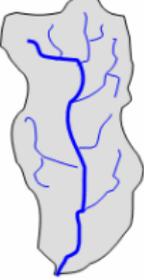
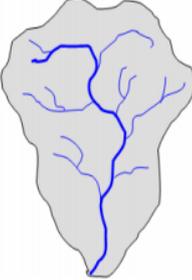
L = longitud de la cuenca (Km)

Pérez 1979, definió las formas de la cuenca cualitativamente de acuerdo a los órdenes de magnitud de los valores obtenidos en el factor de forma. Descritas en la Tabla 2.5 donde se observan dichas formas del relieve.

Tabla 2.5. Valores de forma de acuerdo a las características cualitativas de la cuenca. (Pérez, 1979).

Valores Aproximados	Formas de la Cuenca
< 0,22	Muy alargada
0,22 - 0,30	Alargada
0,30 - 0,37	Ligeramente alargada
0,37 - 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 - 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 - 0,80	Ensanchada
0,80 - 1,20	Muy ensanchada
> 1,20	Rodeando el desagüe

Tabla 2.6. Rangos de las formas de las cuencas. Modificado. Duarte, V (2017).

	Estrecha	Alargada	Amplia	Ancha
Factor de forma				
Producción sostenida de caudales	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto
Potencial a crecientes	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto

Índice o Coeficiente de Compactibilidad: Gravelius planteó la comparación a través de un círculo, definiendo el coeficiente de compactibilidad como la relación que existe entre el perímetro de la cuenca al perímetro de un círculo cuya área sea igual a la de la cuenca hidrográfica. Este coeficiente es indicativo del grado de irregularidad de la cuenca, donde el valor ($K_c=1$) es para una cuenca circular, con menor tiempo de concentración, y por lo tanto mayor rapidez en la concentración de

los escurrimientos superficiales, siendo mayores las posibilidades de violencia en sus crecidas. Por otro lado, los valores ($K_c > 1$) corresponden a formas irregulares y, por ende, dichas irregularidades generan retraso en la concentración de las aguas superficiales. Éste se calcula a través de la siguiente ecuación (10).

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (10)$$

Donde:

K_c : Coeficiente de Compactibilidad

P: perímetro de la cuenca

A: superficie de la cuenca hidrográfica

Tabla 2.7. Clasificación del Índice de Compacidad. Gaspari (2012).

K_c	Clasificación
1 a 1,25	Casi redonda a oval redonda
1,25 a 1,5	Oval redonda a oval-oblonga
1,5 a 1,75	Oval oblonga a rectangular-oblonga
>1,75	Rectangular

Índice de Circularidad de Miller: está definido como la relación entre el perímetro de la cuenca y el área de la cuenca hidrográfica. Este varía entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 1 son indicativos de morfologías ensanchadas o redondeadas, mientras que un coeficiente de circularidad cercano a 0, a cuencas con formas alargadas o rectangulares, como se observa en la Tabla 2.8. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación (11):

$$I_c = \frac{(4\pi A)}{P^2} \quad (11)$$

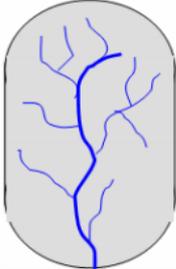
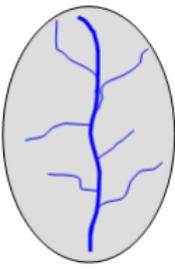
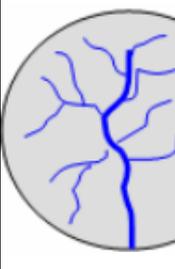
Donde:

I_c : Índice de Circularidad de Miller

A: área de la cuenca hidrográfica

P: perímetro de la cuenca

Tabla 2.8. Clasificación del Índice de Circularidad de Miller. Duarte, V (2017).

Índice de circularidad de Miller	0 – 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 0,75	0,75 – 1
	Oblonga	Ovalada	Oval	Circular
				
Producción sostenida de caudales	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto
Potencial a crecientes	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto

Tiempo de concentración: se define como el tiempo que tardaría en llegar una gota de lluvia desde el punto más lejano de la cuenca hidrográfica hasta el nivel base de la misma. La razón por la cual se calcula el tiempo de concentración es para determinar el potencial de crecientes en función de sus características. Existen diversas ecuaciones para calcular estos tiempos como la propuesta por Kirpich (1942), ecuación (12), o el Método de California Pulvert Practice (1942), ecuación (13), con los cuales se consideran: la longitud del cauce principal de la cuenca y la diferencia entre las cotas, máxima y mínima, de la misma.

$$T_c = 0,066 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,77} \quad (12)$$

Donde:

Tc: Tiempo de Concentración en horas

L: longitud del cauce principal (Km)

S: pendiente promedio del cauce

$$T_c = \left(0,87 \frac{L^3}{H}\right)^{0,385} \quad (13)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración en horas

L: longitud del cauce principal (Km)

H: diferencia entre la cota mayor y la cota menor de la cuenca

Curva Hipsométrica: indica el porcentaje de área drenada variando con la altura de la cuenca hidrográfica. Expresa el potencial evolutivo de la cuenca como se observa en la Figura 2.10, y se construye por medio de un gráfico representando en el eje de las abscisas los valores de la superficie drenada en (km²) o porcentaje, y en la ordenada la altura relativa.

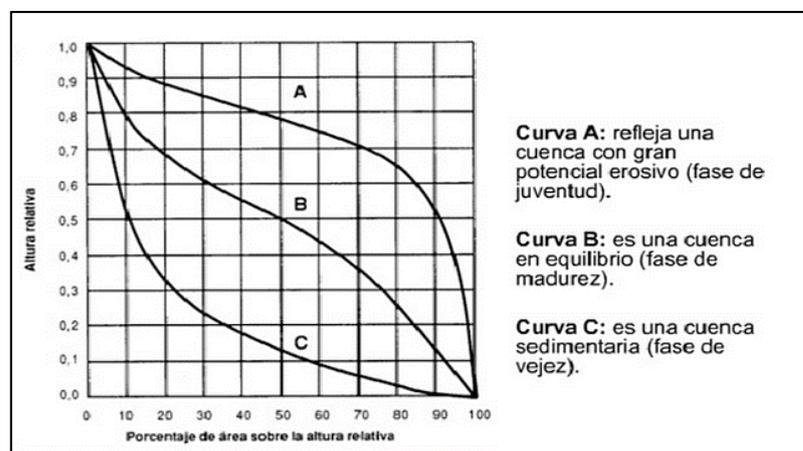


Figura 2.10. Ilustración morfología de las cuencas hidrográficas. Strahler (1964).

Densidad de Drenaje: se define como el número de corrientes que existe en un sistema de drenaje. La densidad del sistema de drenaje se calcula con la ecuación (14), por medio de la relación, entre la suma total de las longitudes de todos los tributarios y el área de la cuenca (SUÁREZ, 2001).

$$Dd = \frac{\sum L}{A}, \quad \sum L = L1 + L2 + \dots Ln \quad (14)$$

Donde:

Dd: Densidad de drenaje

$\sum L$: sumatorio total de las longitudes de los tributarios

A: área de la cuenca hidrográfica

Patrones Fluviales: los patrones o arreglos fluviales es una característica importante de las cuencas hidrográficas, éstos están asociados a los efectos combinados del clima y la geología en la topografía de las regiones, donde dicha interrelación influye sobre la cuenca y evoluciona, formando un patrón erosivo definido por una red de canales y ríos (RUÍZ, 2001). En la Figura 2.11 se presentan los patrones de drenajes, donde los más comunes son: el dendrítico, subdendrítico, paralelo, subparalelo, rectangular.

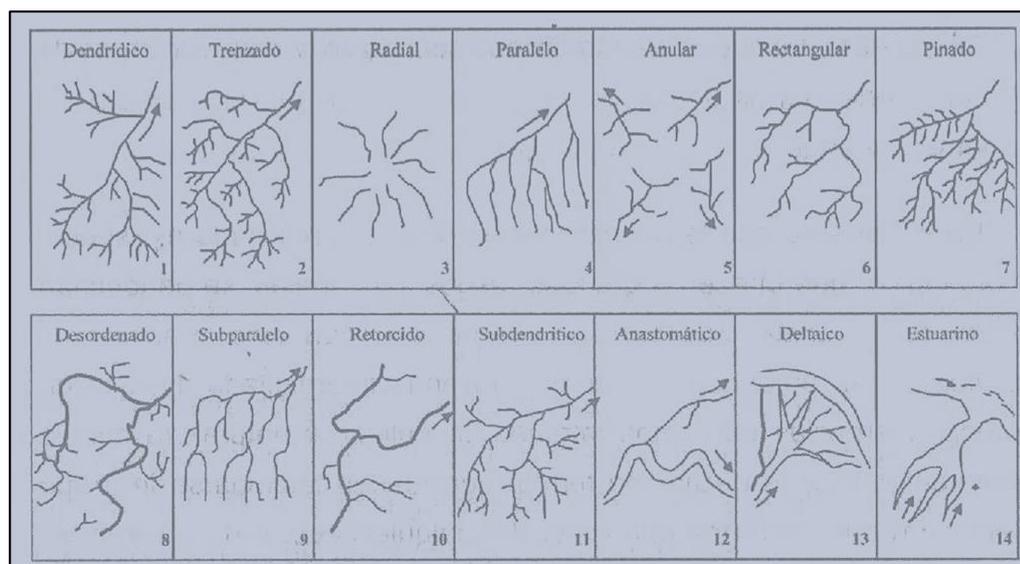


Figura 2.11. Representación de los patrones fluviales más frecuentes. Pérez H. (1977) y Pérez (1979).

Longitud del cauce principal: se define como la longitud del cauce principal desde su nacimiento hasta el cierre de la cuenca, como se representa en la Figura 2.12. Se mide en metros o en kilómetros.



Figura 2.12. Representación de la longitud del cauce principal. Tomado de: Báez, C. (2008).

Orden de los drenajes: Horton (1945) propuso la clasificación de los drenajes de acuerdo al número de orden de un río, como una medida de la derivación del cauce principal en una cuenca.

Como se indica en la Figura 2.13, los tributarios más pequeños que no tengan otro afluente (desde su cabecera hasta juntarse con otra corriente) se denominan con el número de orden 1; cuando se unen dos corrientes de orden 1, se conforma un segmento de canal de orden 2; donde se juntan dos de orden 2 se conforma un segmento de orden 3 y así progresivamente.

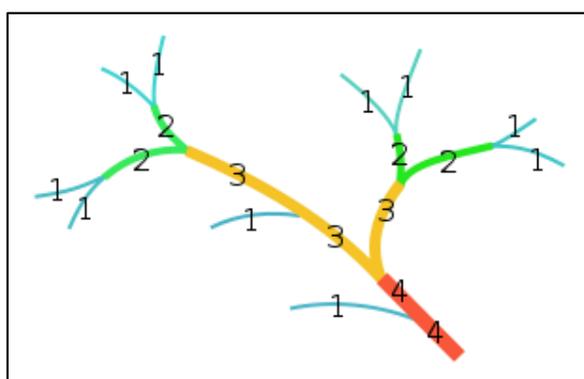


Figura 2.13. Ilustración orden de los drenajes. Horton (1945) y Strahler (1952).

Razón de Bifurcación: Horton (1945) sugirió jerarquizar los cauces de acuerdo al grado de desarrollo de la red fluvial de la cuenca hidrográfica, donde se tiene medida y además se conoce el número de cauce de un orden específico. Este concepto fue introducido originalmente por Horton, pero más tarde fue mejorado por Strahler en 1964. Dicha la relación de bifurcación, se puede obtener a través de la siguiente ecuación (15):

$$Rb = \frac{Nu}{Nu + 1} \quad (15)$$

Donde:

Rb: Razón de Bifurcación

Nu: número de orden de cada cauce

Para inferir posibles crecidas a través de la Razón de Bifurcación, se calcula el Rb promedio. Donde los valores bajos se asocian a cuencas muy bien drenadas y

por lo tanto tiempos de concentración menores y por ende la concentración de las aguas, será más rápida, pudiendo generar crecidas más violentas. En la Figura 2.14 se puede observar como el valor bajo de bifurcación produce picos altos de caudal, mientras que un valor bajo de bifurcación produce caudales bajos pero extendidos.

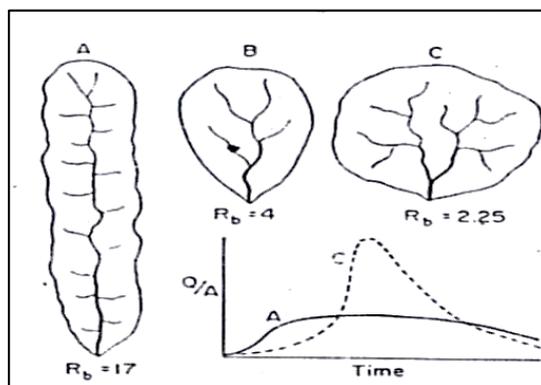


Figura 2.14. Representación de la razón de bifurcación y su influencia sobre el escurrimiento. Guilarte (1978).

2.5 EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO:

MINTEGUI Y LÓPEZ (1990) definen este tipo de erosión como el proceso de disgregación de las partículas del suelo por la acción del agua, el cual culmina con el depósito de los materiales transportados por la corriente en áreas de sedimentación.

Las precipitaciones ocasionan la dispersión y transporte del suelo a causa del impacto de las gotas de lluvia conjuntamente con el escurrimiento superficial del agua ocasionando erosión hídrica. Esta acción separa partículas de los agregados del suelo, a distancias de 150 cm del punto de impacto y las levanta a alturas de 60 cm (PEÑA, 1992).

Los procesos de erosión hídrica están estrechamente relacionados con las rutas que sigue el agua en su paso a través de la cobertura vegetal y su movimiento sobre la superficie del suelo (MORGAN, 1997).

En la Figura 2.15 se observa las características de erosión del suelo causado por las precipitaciones. El impacto de la gota de lluvia sobre el suelo desnudo (a), genera que sus agregados sean desintegrados en partículas minúsculas (b), que tapan

los poros formando una selladura superficial (c), provocando el escurrimiento superficial del agua de lluvia. El agua que escurre carga partículas de suelo que son depositadas en lugares más bajos cuando la velocidad de escurrimiento es reducida (d). (Derpsch, et al. 1991).

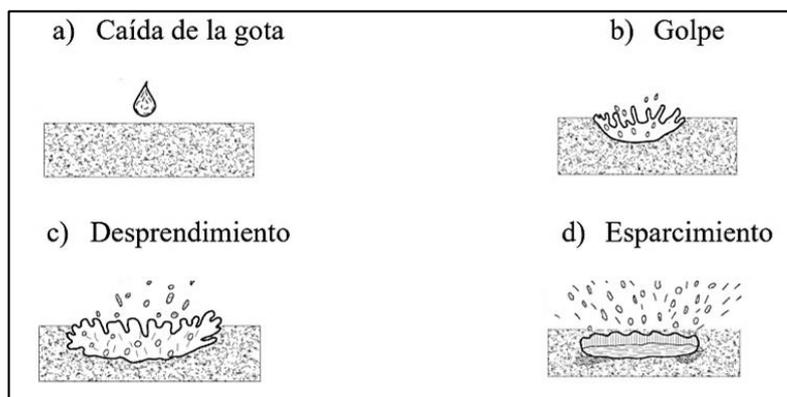


Figura 2.15. Esquema erosión del suelo causada por el agua. Tomado de Suárez (2001).

2.6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE EROSIÓN HÍDRICA:

En el proceso de erosión hídrica actúan: los parámetros geológicos geotécnicos, las precipitaciones (intensidad y energía cinética), el suelo (permeabilidad, estructura, materia orgánica), el relieve (grado y longitud de la pendiente); y como factores pasivos: el suelo (estado físico –químico) y la vegetación (protección por cobertura).

2.6.1 Precipitaciones:

Las características más relevantes de las precipitaciones son: intensidad, duración y frecuencia (FAO, 1997). Cuanto mayor sea la intensidad y la duración de una tormenta, más grande será el impacto de las gotas de lluvia y el volumen de escoorrentía y consecuentemente existirá una mayor erosión del suelo (YAPUR, 2010).

2.6.2 Erodabilidad del Suelo:

La erodabilidad está relacionada con las siguientes propiedades del suelo: capacidad de infiltración, capacidad de retención de agua y permeabilidad. Por otro

lado, la dispersión, salpicadura y escurrimiento están asociadas a la resistencia del suelo (YAPUR, 2010).

2.6.3 Longitud de la Pendiente

Si la longitud de la pendiente es mayor, el espesor de la lámina de escurrimiento o carga hidráulica aumenta (YAPUR, 2010).

En determinadas condiciones la variación del largo de la pendiente puede causar mayor efecto sobre las pérdidas de suelo que los cambios en su grado de inclinación (Mancilla, 1995).

2.6.4 Grado de la Pendiente

El grado de la pendiente influye en la salpicadura de las gotas de lluvias, en el desprendimiento de las partículas de suelo, en el aumento de la velocidad de escurrimiento de la lámina de agua y en la menor capacidad de infiltración del suelo (YAPUR, 2010).

En cuanto a la forma de la pendiente, ésta también juega un rol importante, ya que terrenos con gradientes cóncavas o convexas no tienen similar comportamiento, aunque la pendiente promedio sea la misma (MANCILLA, 1995).

2.6.5 Estado físico- químico del Suelo

Condiciones físicas: Profundidad, porosidad, permeabilidad, pedregosidad, estructura, capacidad de retención de agua.

Condiciones Químicas: Materia orgánica (MORGAN, 1997).

2.6.6 Vegetación:

La cobertura vegetal disipa la energía de las gotas, aumenta la infiltración, reduce la humedad del suelo por transpiración; favorece la infiltración en las precipitaciones siguientes (YAPUR, 2010). El agua caída se escurre lentamente hasta la superficie del suelo donde infiltra con rapidez, pues la cobertura impide el taponamiento de los poros (Derpsch, 2004).

2.7 TIPOS DE EROSIÓN

De acuerdo con Ayala Carcedo y otros (1995), en el caso de la minería se reconoce a la erosión hídrica como la más importante y la de efectos más perjudiciales. Según la forma de manifestarse la erosión hídrica puede ser:

- Erosión por salpicadura.
- Erosión laminar.
- Erosión por surcos.
- Erosión por cárcavas.

2.7.1 Erosión por salpicadura:

Consiste en el arranque y desplazamiento de partículas del suelo por impacto de las gotas de lluvia (SUDAS, 2006). En la Figura 2.16 se observa que la erosión por salpicadura, depende en gran parte de la energía cinética con que impactan las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, para de esta forma poder desplazar partículas de material sin consolidar. Asimismo, de la resistencia específica del suelo, es decir de la estabilidad de la estructura, la textura, contenido de materia orgánica, cobertura vegetal, etc.

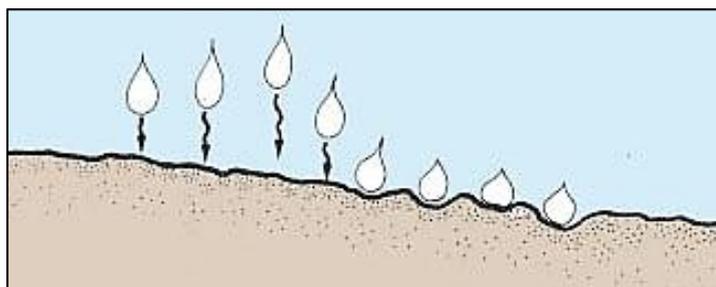


Figura 2.16. Esquema erosión por salpicadura, las gotas de lluvia arrancan y desplazan las partículas del suelo. Tomado de FAO (2008).

2.7.2 Erosión laminar:

La erosión en láminas es la remoción de las capas del suelo, esta es causada por la combinación del efecto de las gotas de lluvia y la escorrentía superficial. Como se observa en la Figura 2.17, este tipo de erosión arrastra únicamente la capa

superior del suelo, y se propicia en suelos localizados en condiciones de fuerte pendiente, sin vegetación adecuada y con bajo contenido de materia orgánica (SUÁREZ, 1980).

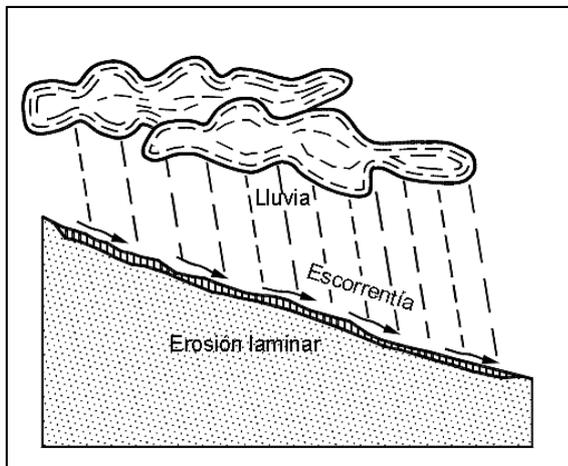


Figura 2.17. Esquema erosión laminar. Tomado de Suárez (2001).

2.7.3 Erosión por surcos:

Ocurre cuando, producto de pequeñas irregularidades en la pendiente del terreno (Figura 2.18), la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para hacer cortes y formar surcos (SUÁREZ 1980, citado por FARFÁN, 2002). Las partículas desprendidas son transportadas por una combinación de suspensión, saltación y rodamiento.

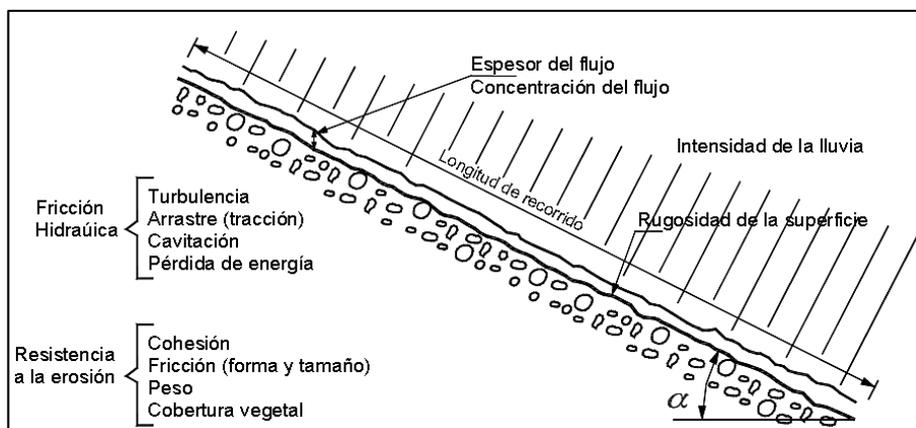


Figura 2.18. Representación de los elementos que intervienen en la erosión del suelo por surcos. Tomado de Suárez (2001).

2.7.4 Erosión por cárcavas:

La erosión en cárcavas es un fenómeno que aparece cuando hay una mayor concentración y volumen en el escurrimiento y las irregularidades del terreno permiten la unión de varios surcos, formándose zanjas de gran tamaño conocidas como cárcavas (YAPUR, 2010), dicha representación gráfica se observa en la Figura 2.19. Adicionalmente la dinámica de las cárcavas no se limita a procesos de escorrentía, sino a flujos subsuperficiales (SURIYAPRASIT, 2008; VRIELING, 2007).

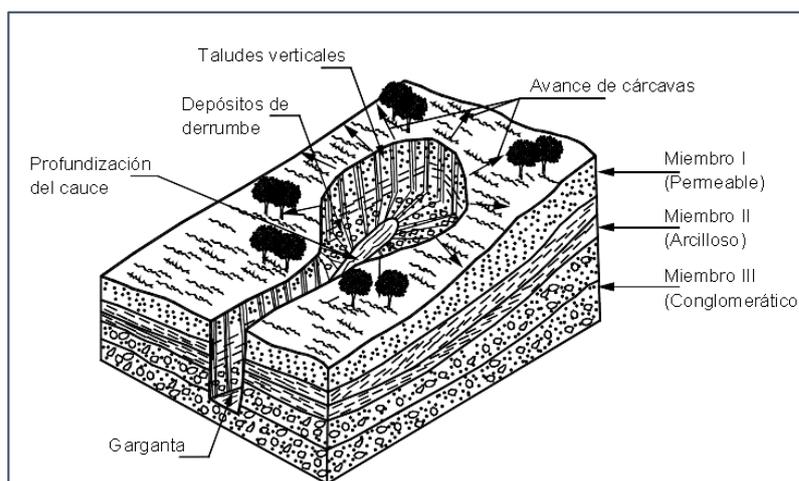


Figura 2.19. Esquema del proceso de erosión por cárcavas. Tomado de Suárez (2001).

2.8 SUSCEPTIBILIDAD

Según Villacorta et al., 2012, se define como la tendencia o propensión de una región a ser afectada o hallarse bajo la influencia de un proceso determinado, en este caso la erosión hídrica. La estimación y evaluación de la susceptibilidad se basa en la correlación de los factores (intrínsecos) que contribuyen o apoyen el proceso de identificación y calificación de la erosión hídrica.

2.9 ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA

Existe una amplia gama de métodos que permiten la evaluación cualitativa o cuantitativa de la erosión hídrica. Según García (2006), la modelización trata de dar respuesta a todos aquellos aspectos técnicos que facilitan el conocimiento de los diferentes parámetros e interrelaciones implicados, para posteriormente tratar de

reproducir el sistema en el cual se desarrollan los procesos y explicar el comportamiento global en una cuenca hidrográfica.

Entre los métodos para la estimación y análisis de la erosión hídrica se destacan: uso de parcelas en campo, técnicas de teledetección, observaciones y mediciones directas, uso de softwares como los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El primer método consiste en la simulación de los procesos de erosión, a través del uso de parcelas en campo, donde se evalúan los parámetros de pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal y precipitación. El segundo método se basa en la observación y determinación del proceso erosivo, mediante el uso de imágenes satelitales (Landsat y Spot). El tercero utiliza los métodos de cuantificación directa, mediante el empleo de estacas y/o levantamiento de perfiles altamente detallados de la topografía (Martínez-Casasnovas et al., 2001), o el uso de simuladores portátiles de lluvia con la finalidad de estimar sedimentos. El cuarto método consiste en el uso de software de computación como los sistemas de información geográfica (SIG), los cuales son una herramienta de gran potencialidad para la evaluación cualitativa de la erosión, debido a que recogen y traducen toda la información espacio-temporal con base a teorías y criterios científicos.

2.9.1 Uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e Imágenes Satelitales

El quehacer científico ha pasado de procedimientos manuales, laboriosos, de orden analógico y sobre papel, a procesamientos rápidos y digitales, debido a los avances tecnológicos (Camargo et al., 2014).

En los últimos 30 años, se han realizado diversos estudios para evaluar la erosión hídrica, mediante la interpretación de imágenes satelitales. Éstas permiten la evaluación a una escala de mayor detalle, porque generalmente cuentan con una mejor resolución espacial (Loureiro y Ferreiras, 2014).

Las imágenes satelitales (Landsat y Spot), han sido importante apoyo cualitativo y cuantitativo en el desarrollo de investigaciones y análisis del proceso de erosión

hídrica. Este insumo permite visualizar y hacer seguimiento de dicho proceso en tiempo y espacio (Camargo et al., 2017).

Los productos de la tecnología geoespacial y de teledetección, como las imágenes satelitales, ofrecen información sobre el estado y distribución de las cubiertas del suelo a una resolución temporal, espectral y espacial satisfactoria para muchos estudios multitemporales a diferentes escalas, lo cual ha permitido cartografiar eficazmente zonas afectadas (Castañeda del Álamo et al., 2015; Latham et al., 2015).

Por otra parte, los sistemas de información geográfica (SIG) permiten el análisis más preciso de la superficie terrestre, lo que facilita la identificación e interpretación de los principales agentes que contribuyen en la alteración del paisaje, reduciendo así la cantidad de información incierta que posibilita una gestión ambiental eficiente (Loureiro y Ferreiras, 2014).

La implementación de los SIG es cada vez mayor para el análisis y estimación del proceso de erosión hídrica, debido al potencial uso de los Modelos Digitales de Terreno (MDT), definidos como conjuntos ordenados de puntos de datos muestreados que constituyen la distribución espacial de diversos tipos de información sobre el terreno (Liet et al., 2005). Estos permiten calcular parámetros como el grado de la pendiente del área que favorece al proceso de activación de la erosión, la orientación del terreno, la curvatura, la delimitación de las cuencas, etc.

Los SIG han permitido analizar, evaluar, y representar mediante métodos multicriterios el proceso de erosión hídrica, pudiendo estimar su susceptibilidad y distribución espacial e intensidad. Por esta razón, los empleos de estos métodos son importantes bases para la evaluación, control y predicción de la erosión de los suelos (Wang et al., 2013).

Para la zonificación de la erosión hídrica mediante los SIG, es muy importante la integración de los datos relacionados con las condiciones climáticas, los estudios de suelos, la geología, las condiciones del relieve, la cobertura vegetal, y el uso actual de la tierra. Dicha aproximación se basa en la superposición de datos cartográficos para la clasificación y calificación del proceso de erosión hídrica en una

zona determinada; donde la calificación de la susceptibilidad se da en rangos desde muy alta hasta muy baja, o desde ligera hasta muy severa. Aun así, se debe considerar que los límites de susceptibilidad señalados son referenciales y no valores absolutos.

2.9.2 Factores para la evaluación de la susceptibilidad a la erosión hídrica

Para la evaluación cuantitativa y cualitativa de la susceptibilidad a la erosión hídrica se estiman factores que inciden directamente en el proceso de erosión, y posteriormente son interrelacionados mediante un SIG, generando como salida un mapa de susceptibilidad a la erosión hídrica. Éstos factores son descritos a continuación:

Factor Topográfico (LS): los efectos combinados de la longitud de la pendiente (L) y el grado de inclinación de la pendiente (S) son también conocidos como el factor topográfico (LS) y caracterizan el tipo de relieve en que tendrán lugar los procesos de pérdida de suelo debido a la inclinación, longitud, además de proporcionar información sobre la forma de la pendiente (Souza, 2003).

El factor LS se obtiene mediante el uso de los Modelos Digitales de Terreno (MDT). Siendo el factor L, longitud de la pendiente definida como la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición o donde la escorrentía fluye a un canal definido (Foster et al., 1977, citado por Barrios y Quiñonez, 2000), viene expresada por la siguiente ecuación (16):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^m \quad (16)$$

Donde:

Λ : longitud de la pendiente (m)

m es el exponente de la longitud de la pendiente, calculado con la modificación hecha por Foster et al., (1977) a través de la ecuación (17).

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (17)$$

Donde:

β : ángulo medio de la pendiente a nivel de subcuadrícula en la dirección de mayor pendiente del (MDT). Este valor se calcula de acuerdo a la ecuación (18), formulada por McCool et al., (1989), para regiones susceptibles a la erosión:

$$\beta = \frac{\frac{\sin\theta}{0,0896}}{3(\sin\theta)^{0,8} + 0,56} \quad (18)$$

Donde:

θ : ángulo de la pendiente.

El valor de la longitud de la pendiente (λ) se obtiene a través de la metodología propuesta por Flores et al., (2013).

Donde:

x : es el tamaño del pixel del MDT, siendo el modelo digital del terreno capaz de representar los cambios topográficos de la zona, además de estar relacionado con las condiciones hidrológicas superficiales.

$$\lambda = \frac{x}{\cos\theta} \quad (19)$$

El factor S , es el de gradiente de la pendiente, que define el efecto de la inclinación de la pendiente sobre la pérdida de suelo por unidad de área, y se expresa por las ecuaciones (20) y (21):

$$S = 10,8 \sin\theta + 0,03, \text{ para } S < 9\% \quad (20)$$

$$S = 16,8 \sin\theta - 0,50, \text{ si } S \geq 9\% \quad (21)$$

Siendo:

S : pendiente en %

Factor Agresividad Climática (R): Representa la agresividad climática contenida en la energía de las gotas de lluvias. Fournier (1960) definió el Índice de Fournier (IF), y posteriormente fue modificado por Arnoldus (1978). Éste se calcula por medio de la ecuación (22):

$$FI = \sum \left(\frac{p_i^2}{p} \right); \text{sumatoria desde } i = 1 \text{ hasta } i = 12 \quad (22)$$

Donde:

FI= Índice de Fournier-Arnoldus (mm)

p_i = Precipitación del mes i (mm)

p = Precipitación anual (mm)

Fournier-Arnoldus 1978, clasificó los índices de acuerdo a los rangos de erosividad de las precipitaciones. En la Tabla 2.9, se observan dichos rangos:

Tabla 2.9. Índice Modificado de Fournier-Arnoldus (1978).

Índice de Fournier-Arnoldus	Clasificación	Rango de Erosividad
1	Muy bajo	<60
2	Bajo	60-80
3	Moderado	80-100
4	Alto	100-120
5	Muy Alto	>120

Factor Erodabilidad del Suelo (K): se define como la resistencia del suelo al desprendimiento y transporte por lluvia y escorrentía. Dicha erodabilidad del suelo se mide como la tasa de pérdida promedio en toneladas / hectárea (toneladas / acre). K es una medida de susceptibilidad, que depende principalmente de la textura del suelo, pero también contribuyen la estructura, la materia orgánica y la permeabilidad.

HILBORN (2012), estableció unos índices de erodabilidad de acuerdo a la relación que existe entre el contenido de materia orgánica y la textura del suelo. Como se observa en los valores descritos a continuación en la Tabla 2.10:

Tabla 2.10. Índices de erodabilidad del suelo propuestos por Hilborn (2012).

Clase Textural	Factor K		
	toneladas / hectárea (toneladas /acre)		
	MO promedio	Menos del 2% de MO	Más del 2% de MO
Arcilla	0,49 (0,22)	0,54 (0,24)	0,47 (0,21)
Franco arcilloso	0,67 (0,30)	0,74 (0,33)	0,63 (0,28)
Franco arenoso grueso	0,16 (0,07)	-	0,16 (0,07)
Arena fina	0,18 (0,08)	0,20 (0,09)	0,13 (0,06)
Franco arenoso fino	0,40 (0,18)	0,49 (0,22)	0,38 (0,17)
Arcilla pesada	0,38 (0,17)	0,43 (0,19)	0,34 (0,15)
Marga	0,67 (0,30)	0,76 (0,34)	0,58 (0,26)
Arena arcillosa fina	0,25 (0,11)	0,34 (0,15)	0,20 (0,09)
Arena arcillosa	0,09 (0,04)	0,11 (0,55)	0,09 (0,04)
Arena franca muy fina	0,87 (0,39)	0,99 (0,44)	0,56 (0,25)
Arena	0,04 (0,02)	0,07 (0,03)	0,02 (0,01)
Franco arcilloso arenoso	0,45 (0,20)	-	0,45 (0,20)
Franco arenoso	0,29 (0,13)	0,31 (0,14)	0,27 (0,12)
Franco limoso	0,85 (0,38)	0,92 (0,41)	0,83 (0,37)
Arcilla limosa	0,58 (0,26)	0,61 (0,27)	0,58 (0,26)
Franco arcilloso limoso	0,72 (0,32)	0,79 (0,35)	0,67 (0,30)
Arena muy fina	0,96 (0,43)	1,03 (0,46)	0,83 (0,37)
Franco arenoso muy fino	0,79 (0,35)	0,92 (0,41)	0,74 (0,33)

Factor Cobertura Vegetal (C): es la capacidad de la vegetación para amortiguar el efecto de desprendimiento de partículas del suelo por las gotas de lluvia e impedir el arrastre de sedimentos con el escurrimiento superficial (Wischmeier y Smith, 1978).

El factor C se puede obtener por medio del uso de imágenes satelitales derivadas del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Se trata de un indicador numérico que se utiliza para identificar la vegetación, por medio de las bandas visibles y cercanas al infrarrojo que la cubierta vegetal emite o refleja. Mediante la ecuación (23), el algoritmo del NDVI resta los valores de reflectancia del infrarrojo cercano y del visible/rojo, y los divide por la suma del infrarrojo cercano y el visible.

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (23)$$

Donde:

NIR: Reflectancia cercana de la banda infrarroja

VIS: Reflectancia de la banda infrarroja visible

Sulistyo (2011) interrelacionó el NDVI y el factor C según una aproximación lineal descrita en la ecuación (24):

$$C = 0,6 - 0,77 \times NDVI \quad (24)$$

Donde:

La cobertura vegetal con tendencia a 100%, es decir, el NDVI tendiente a valores cercanos a 1, característico de los bosques densos y siempre verdes, el Factor C será muy bajo (tiende a 0). Mientras que, los valores de NDVI cercanos a 0, el Factor C será alto.

Índice de Potencial de Flujo (SPI): según Wilson y Lorang (2000) el índice SPI es la medida del poder erosivo de la corriente; éste predice las líneas de flujo del agua. Valores altos de estos índices generalmente se corresponden con zonas montañosas, empinadas o de alta pendiente donde su incremento crea una mayor incisión o “corte” en el lecho y por tanto eleva los valores. Valores bajos se asocian a zonas de baja pendiente como a amplias llanuras aluviales, llanuras de inundación o áreas de lenta subsidencia (Finnegan et al., 2007). Dicho índice se calcula mediante la ecuación (25), presentada a continuación:

$$SPI = (\alpha * cellsize) * \tan(\beta) \quad (25)$$

Donde:

α : acumulación de flujo (flow accumulation)

β : Pendiente en radianes

Índice de Humedad Topográfica (TWI): el índice TWI permite identificar a las zonas en donde existe exceso de saturación de agua; los valores altos indican suelos con alta humedad y los valores bajos a los suelos menos húmedos. La TWI refleja las múltiples influencias del terreno en los procesos de escorrentía por exceso de saturación y está estrechamente relacionada con la clasificación del material

sedimentario en suspensión (Sharma, 2010). Éste se calcula mediante la ecuación (26).

$$TWI = \ln \left(\frac{(\alpha + 1) * cellsize}{\tan(\beta) + C} \right) \quad (26)$$

Donde:

α : acumulación de flujo (*flow accumulation*)

β : Pendiente en radianes

C: 0,001

2.9.3 Análisis de Decisión Multicriterio

La Matriz de Jerarquización Analítica (MJA) o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) es un instrumento, desarrollado por Saaty (1990), para la evaluación y selección de alternativas catalogada como multicriterio compensatorio. Éste se basa en el desarrollo de prioridades que, a su vez son derivadas a partir de una evaluación de pares de concordancia o Pairwise, llamados así debido a que sólo se permite el análisis de relación de un par de criterios a la vez. Luego de identificar los pares de criterios, éstos son cualificados y cuantificados mediante ciertos parámetros (Huang et al., 2003).

El instrumento requiere que quien tome las decisiones (decisor o decisor), proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, después, especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio (Hurtano et al., 2005).

En este análisis, la matriz A, se construye a partir de la comparación de los diferentes criterios, utilizando una escala subyacente con valores de 1 a 9, para calificar a cada parámetro de acuerdo al nivel de importancia concedida por el investigador a la relación de los dos pares analizados.

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

Saaty (1994), propone la siguiente escala de importancia relativa, para distinguir las preferencias entre dos alternativas:

Tabla 2.11. Valores y características cualitativas de acuerdo a la escala de importancia relativa de los criterios de Saaty (1994).

Escala numérica	Escala verbal
1	Ambos criterios o elementos son de igual importancia
3	Débil o moderada importancia de uno sobre el otro
5	Importancia esencial o fuerte de un criterio sobre el otro
7	Importancia demostrada de un criterio sobre otro
9	Importancia absoluta de un criterio sobre otro
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente y extremadamente preferible

Estos valores de pares inteligentes son luego ingresados a la matriz A, convirtiendo esta evaluación subjetiva en un conjunto de pesos lineales (W) (Malczewski, 1996). Los pesos relativos son el vector característico de la matriz.

Para el cálculo primero se normaliza la matriz A, resultando así la matriz A'.

$$A' = \begin{pmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{13}}{\sum a_{i3}} \\ \frac{a_{21}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{23}}{\sum a_{i3}} \\ \frac{a_{31}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{32}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{33}}{\sum a_{i3}} \end{pmatrix}$$

Seguidamente se calcula el promedio de cada fila de la matriz A', obteniendo así la matriz W de los pesos lineales o relativos.

$$W = \begin{pmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} + \frac{a_{13}}{\sum a_{i3}} \\ \frac{a_{21}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{22}}{\sum a_{i2}} + \frac{a_{23}}{\sum a_{i3}} \\ \frac{a_{31}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{32}}{\sum a_{i2}} + \frac{a_{33}}{\sum a_{i3}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix}$$

Para verificar la validez de los pesos normalizados para cada matriz A de comparaciones, es necesario calcular la Relación de Consistencia (CR) de acuerdo con la ecuación (27).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (27)$$

Donde:

RI es un índice aleatorio de consistencia que depende directamente del orden de la matriz (Saaty, 1980).

Tabla 2.12. Valores de Consistencia Aleatoria de acuerdo al orden de la matriz. Saaty (1980).

Tamaño de la Matriz n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consistencia Aleatoria RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

CI es el Índice de Consistencia, el cual es una medida de la consistencia de la matriz de comparaciones a pares. Se obtiene a través del máximo valor propio de la matriz de comparaciones. En casos de que exista inconsistencia en los juicios el valor propio tiende a ser mayor que el rango de la matriz. Éste se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (28)$$

Donde:

λ_{max} : es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares.

n: es el número de criterios.

Según Saaty 1980, el valor de CR debe ser menor que 0,10 para que los pesos normalizados sean consistentes; en caso contrario, deben ser verificados para evitar incoherencias.

2.10 INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD MINERA EN LAS VARIABLES GEOLÓGICAS

La minería a cielo abierto tiene gran incidencia en los impactos geológicos y ambientales. Las prácticas mineras incluyen actividades como eliminación de la capa vegetal, arranque-carga y acarreo de mineral, comercializable y estéril, arranque mediante perforación y voladura, construcción de escombreras y pilas de almacenamiento, modificación de pendientes de laderas, alteración de cauces y cambio de flujos, lo cual hace que los paisajes resultantes sean más susceptibles a movimientos en masa, erosión, deslaves, inundaciones y otros riesgos geomórficos.

Actualmente, la importancia de la minería continúa aumentando, y con ello el uso de tecnologías modernas, y de mayor capacidad, las cuales se utilizan para eliminar la sobrecarga y escarificar las superficies, acelerando enormemente el ritmo de extracción, en función de parámetros locales como: la topografía y la geología.

Cientos de nuevas formas de terreno pueden ser creadas en muy poco tiempo a través de la eliminación de grandes cantidades de sobrecarga, resultando en formas de terrenos con pendientes pronunciadas, que son potencialmente peligrosas ya que implican consecuencias ambientales asociadas a problemas hidrológicos (NYSSSEN Y VERMEERSCH, 2010).

Las características hidrológicas son igualmente susceptibles a cambios provocados por las actividades mineras en la superficie, ya que, al ser vertidas la carga minera en los ríos, reducen la capacidad del cauce (KATPATAL Y PATIL, 2010). Las condiciones litológicas también son susceptibles a la actividad minera, debido a que, al ser removida la capa vegetal, los procesos de meteorización y erosión transforman químicamente y eliminan físicamente los materiales expuestos. Permitiendo que aquellos poco consolidados, sean llevados con facilidad por los agentes de transportes, como el agua y el aire.

El análisis de las variables geológicas es de suma importancia en la sostenibilidad del desarrollo, particularmente, enfrentado con problemas potenciales causados por la minería, como lo es el transporte de sedimentos en suspensión hídrica a partir de los procesos inducidos por las operaciones mineras. Reconocer la importancia de estas variables juega un papel significativo, debido a que se centra en la gestión y protección del agua y en la modificación del paisaje, procurando la disminución de la escorrentía concentrada, con alta energía de desgaste de rocas y suelos, y por ende, del volumen de sedimentos contaminantes.

2.11 PROCESOS OPERATIVOS MINEROS

A lo largo de las fases de desarrollo y explotación de un proyecto minero, ciertas operaciones fundamentales son realizadas para liberar y transportar el material minado. La etapa de extracción minera se puede definir como una sucesión de fases u operaciones mineras que conforman el ciclo de producción.

La minería a cielo abierto tiende a remover grandes extensiones de tierra y causan un aumento significativo en el volumen de sedimentos. Dichos problemas de erosión ocurren en los frentes de arranque, en las vías de acarreo, vertederos de residuos, superficies descubiertas de la capa superior del suelo, pendientes pronunciadas, rampas y vías de transporte.

El transporte de mina (Acarreo), forma parte de las operaciones unitarias que engloban el ciclo operativo minero, esta acción implica el uso de vehículos pesados y se generan áreas con mayor potencial de escorrentía. Dicha perturbación generalmente hace que la tierra se compacte, provocando una reducción en la infiltración, lo cual aumenta la carga de sedimentos finos aguas abajo.

El aumento de las actividades mineras irá a la par con el crecimiento de la población, y con ello el aceleramiento de la erosión y la producción de sedimentos en las áreas minadas. La gestión de ese crecimiento y la búsqueda de soluciones sostenibles para esos problemas se han descrito como "los grandes desafíos de este siglo" (TAROLLI Y SOFÍA, 2016).

Cada vez se reconocen más los impactos que ocasiona la minería, por lo que la comprensión y búsqueda de mejores soluciones posibles de recuperación de tierras, en particular en los sitios que han sido objeto de movimientos a gran escala, resultan uno de esos desafíos.

2.12 MENAS DE NÍQUEL

Un depósito mineral es una materia útil cuya concentración es alta para generar un beneficio económico. Por otra parte, las menas corresponden al mineral o minerales de interés económico, éstas se clasifican en oxidadas y sulfuradas.

El níquel (Ni) es un metal cuya combinación con otros metales, como el hierro y el cobalto, forman diversos minerales como: la garnierita, millerita, pirrotina y pentlandita. Éste puede presentarse en distintas formas en la naturaleza: en depósitos de sulfuro (por la elevada afinidad que existe entre este elemento y el azufre) en lateritas niquelíferas, y en lavas komatíticas.

Con referencia a la mena del yacimiento de Loma de Hierro, se clasifica como laterita niquelífera.

2.13 CARACTERÍSTICAS DE LA LATERITA NIQUELÍFERA

La laterita niquelífera se forma en zonas de relieve horizontal sobre rocas ígneas básicas o ultrabásicas, ricas en minerales ferromagnesianos (FREYSSINET et al., 2005). Los minerales que constituyen la laterita niquelífera son, generalmente, hidróxidos y óxidos de hierro (goethita, lepidocrocita, hematites), a menudo acompañados de sílice, y de hidróxidos, óxidos de aluminio y manganeso (GOLIGHTLY, 1981).

2.14 CLASIFICACIÓN DE LOS DEPÓSITOS LATERÍTICOS

De acuerdo con la mineralogía de la mena predominante, los depósitos lateríticos de Ni-Co se clasifican en tres (3) grandes tipos (Gleeson et al., 2003), éstos se observan en la Figura 2.20, y se describen a continuación:

Depósitos de tipo silicato hidratado: la mena está conformada por silicatos hidratados de Mg-Ni (serpentina niquelífera y garnieritas); la mineralización se halla en la parte inferior de la saprolita.

Depósitos de tipo óxido: el Ni está asociado con la goethita principalmente. También suele hallarse con el Co y Ni los cuales se asocian a óxidos de Mn.

Depósitos de tipo arcilla: la sílice se encuentra parcialmente lixiviada del perfil de meteorización. El níquel se concentra en esmectitas (nontronitas y saponitas), en las partes altas e intermedias de la saprolita y en la parte inferior del horizonte limonítico.

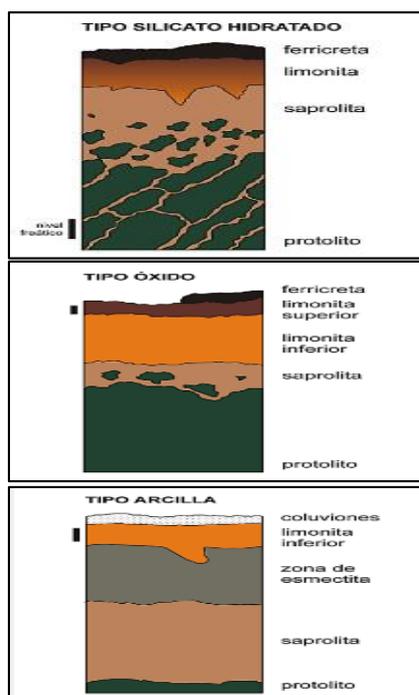


Figura 2.20. Perfiles esquemáticos de los principales tipos de depósitos lateríticos de NiCo. Modificado de BRAND et al. (1998), GLEESON et al. (2003), FREYSSINET et al. (2005).

2.15 MECANISMOS DE FORMACIÓN Y MODIFICACIÓN

Las lateritas de Ni tipo silicatos hidratados es la tipología de lateritas niquelíferas en la zona de estudio.

Los principales factores que controlan las características de las lateritas niquelíferas son: el clima, el relieve, el drenaje, entre otros. Estos fueron descritos por TRECASSES (1975) en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Factores de formación en las lateritas de Ni. Tomado de Trescases (1975).

Características	Lateritas tipo silicatos hidratados
Clima	Sabana húmeda-selva
Relieve	Moderado
Drenaje	Buen drenaje
Tectónica	Favorecido por levantamiento
Estructura primaria	Favorecido por el aumento de la erosión y enriquecimiento de Ni a lo largo de fracturas abiertas
Litología primaria (sólo en rocas ultramáficas ricas en olivino)	Peridotita>Dunita

CAPÍTULO III

3 GEOLOGÍA REGIONAL

3.1 GENERALIDADES REGIONALES

La Cordillera de la Costa desde un punto de vista geográfico, se divide en las serranías del Litoral y del Interior y las montañas de Aroa - Bobare – Yumare, constituidas por terrenos geológicos que se encuentran acrecionados entre sí al norte de la Placa Suramericana, como se observa en la Figura 3.1.

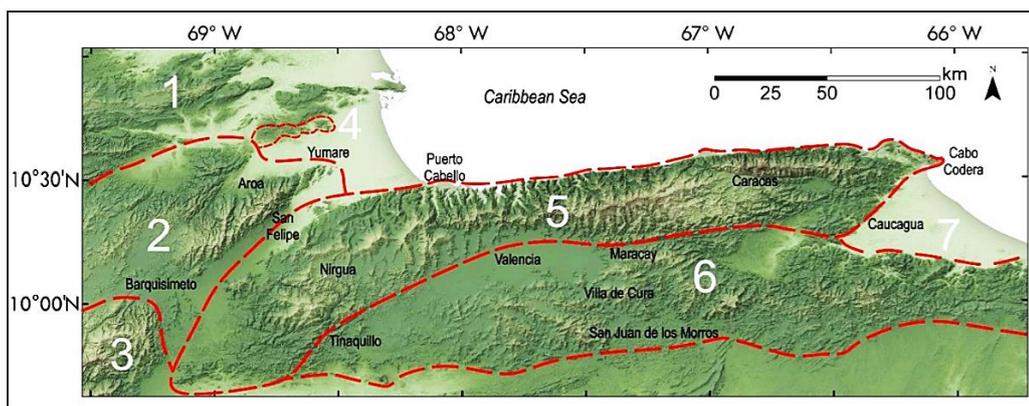


Figura 3.1. Representación subdivisión geográfica del norte de Venezuela utilizada en URBANI (2015): 1: Falcón, 2: Serranías de Bobare y Aroa. 3: Parte noreste de los Ande de Mérida con rocas de dominio Caribe, 4: Macizos de Yumare, 5: Serranía del Litoral, 6: Serranías del Interior, 7: Barlovento.

Entre el Terciario y el Paleógeno, la Placa Caribe que se mueve relativamente hacia el este y la Placa Suramericana con movimiento relativo hacia el oeste, desarrollan los mayores efectos por su interacción, ya que se ejercen grandes esfuerzos compresivos en forma oblicua en dirección al sureste-noroeste. La deformación de los sistemas montañosos del norte del país es debida a este mecanismo, el cual ocasiona que unidades de distintas edades y formadas en diferentes ambientes, en espacio y tiempo, pudieran combinarse a través de fallas inversas y transcurrentes. En este proceso ocurre un evento particular que permite a terrenos formados dentro de la Placa Caribe, a una distancia aproximadamente de mil kilómetros al oeste, ser emplazados al norte del continente suramericano. Por esta razón, son añadidos terrenos como los de Loma de Hierro y Villa de Cura, que ocupan gran parte de la Serranía del Interior (URBANI, 2012).

Diversos autores han estudiado la génesis de estas estructuras, como BELL (1968), STEPHAN (1982), URBANI & OSTOS (1989) subdividen la Cordillera de la

Costa usando los conceptos de fajas, terrenos y napas. La nomenclatura utilizada, se resume en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características cualitativas de la subdivisión de los sistemas montañosos por fajas y terrenos. Tomado y modificado URBANI (2015)

Menéndez (1966), fajas	Sthephan (1982), napas	Beck (1986), napas	Urbani & Ostos (1989), fajas	Este Trabajo	
				Fajas	Terrenos
Cordillera de la Costa	Margarita- Costera	Margarita- Costera	Costera	Costera (sep- tentrional)	Tacagua
					Carayaca
	Cordillera de la Costa	Cordillera de la Costa	Ávila	Ávila (central)	Ávila
					Nirgua
			Caracas	Caracas (meri- dional)	Los Cristales
					Las Mercedes
				Las Brisas	
Caucagua- El Tinaco	Caucagua-El Tinaco	Caucagua- El Tinaco	Caucagua- El Tinaco	Caucagua-El Tinaco	Tinaco
					Cachinche
					Tucutunemo
					Tácata
					Tacagua (Caucagua)
Paracotos	Paracotos	Loma de Hierro	Loma de Hierro	Loma de Hierro	Paracotos
					Loma de Hierro
Villa de Cura	Villa de Cura	Villa de Cura	Villa de Cura	Villa de Cura	Villa de Cura
					San Sebastián

3.2 MARCO LITOLÓGICO

Dentro del área de estudio afloran dos tipos litológicos, con edades que van desde Paleozoico Tardío hasta el Cretácico. Las unidades fueron definidas de

acuerdo a las descripciones hechas previamente por autores, presentadas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Descripción de la unidad perteneciente a la faja Caucagua-El Tinaco. Terreno Tucutunemo.

FAJA CAUCAGUA-EL TINACO	TERRENO TUCUTUNEMO	Unidad	Filita de Tucutunemo
		Edad	Paleozoico Tardío
		Ubicación/ Localidad Tipo	Según GONZÁLEZ (1972), este terreno se extiende de este a oeste, desde la región de los Teques-Cúa en el estado Miranda, hasta la región de Tinaquillo en el estado Cojedes, atravesando parte de los estados Aragua y Guárico. Su localidad se encuentra ubicada en el río Tucutunemo y colinas adyacentes al este de Villa de Cura, estado Aragua.
		Litología	SHAGAM (1965), señala que consiste principalmente en filitas carbonáceas arenosas que varían a meta areniscas y limolitas cuarzo feldespáticas, encontrándose también cantidades menores de areniscas de grano grueso (asperones) y conglomerados cuarzo-calcáreos. GONZÁLEZ de Juana <i>et al.</i> , 1980, las filitas son azules, carbonáceas y comúnmente varían a facies arenosas; presentan mica blanca de origen metamórfico y gran desarrollo de texturas y estructuras metamórficas.
		Contactos	Dentro del mapa geológico de BECK (1985, 1986) se observan contactos de fallas (tanto de ángulo alto como de corrimiento) con las unidades constituyentes de su Napa de Loma de Hierro, mientras que pueden ser tanto estratigráficos como tectónicos, con otras unidades de la Napa de Caucagua - El Tinaco.
		Correlación	MENÉNDEZ (1966) correlaciona la parte inferior (Miembro Los Naranjos) con las metavolcánicas de Las Placitas, Aragüita, Rocas de Conoropa y Pilancónes. El resto de la unidad, se considera parcialmente equivalente a las formaciones Urape y Muruguata. Navarro <i>et al.</i> , 1988, son de la opinión que la Formación Tucutunemo es equivalente a la Formación Paracotos, al norte del Arco Magmático de Tiara y a las formaciones Garrapata y Escorzonera, al sur del mismo.

Tabla 3.3. Descripción de la unidad perteneciente a la faja Loma de Hierro. Terreno Loma de Hierro.

FAJA LOMA DE HIERRO	TERRENO LOMA DE HIERRO	Unidad	Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro
		Edad	Cretácico
		Ubicación/Localidad Tipo	Se extiende unos 21 km, desde unos 4 km al oeste del poblado de Tiara, estado Aragua, hasta las proximidades de Tácata, estado Miranda, con una anchura variable entre 1 a 5 km. Mientras que su localidad tipo se encuentra en la Fila de Loma de Hierro, ubicada 20 km al sur de Tejerías, estados Aragua y Miranda.
		Litología	GRATEROL (1972) señala que el complejo peridotita-gabro se compone de peridotita serpentizada, troctolita y gabro asociado a basalto. La serpentización es más intensa hacia los bordes del bloque; su borde norte está formado por rocas intermedias entre peridotitas y gabro, como son troctolita y gabro olivinífero serpentizado y rodingita, producto de la alteración del gabro. La peridotita es principalmente una harzburgita de grano grueso con olivino y enstantita de color negro a verdoso, de acuerdo al grado de serpentización.
		Contactos	De acuerdo a BECK (1985), el contacto septentrional entre el cuerpo de rocas ultramáficas con los terrenos de Tucutunemo, es de fallas de ángulo alto y de corrimiento, por otro lado, el contacto meridional con el cuerpo de gabros masivos es estratigráfico. El contacto entre el gabro y las rocas de la Metalava de Tiara es estratigráfico y de fallas de ángulo alto.
		Correlación	Beck (1985, p. 250; 1986) lo correlaciona con las rocas ofiolíticas de la zona de Siquisique, Lara, y de la isla de Margarita, estado Nueva Esparta (descritas por Stephan et al., 1980 y Chevalier et al., 1985, respectivamente).

Tabla 3.4. Descripción de la unidad perteneciente a la faja Loma de Hierro. Terreno Loma de Hierro.

FAJA LOMA DE HIERRO	TERRENO LOMA DE HIERRO	Unidad	Metalava de Tiara
		Edad	Cretácico
		Ubicación/Localidad Tipo	Se extiende desde los estados Aragua, Carabobo, Guárico y Miranda. La localidad tipo se ubica en Cerros de Tiara al sur de La Victoria, estado Aragua. SMITH (1952) señala que la sección excede los 600 metros de espesor. SHAGAM (1960) menciona 400 metros como mínimo. PIBURN (1968) sugirió un espesor de 500 metros.
		Litología	Se compone de partes iguales de piroxeno (augita) y plagioclasa, posee textura ofítica y presenta alteración hidrotermal. A veces incluye serpentina pseudomorfa y pequeñas cantidades de clorita. La roca es de aspecto macizo, aunque a veces presenta bandeamiento debido a la presencia de sills de gabro; también existe una roca basáltica densa, de grano fino a medio, de color gris claro y textura sub-ofítica que descansa sobre el gabro. PIBURN (1968) subdividió la unidad en dos (2) miembros: el inferior, caracterizado por conglomerados volcánicos de grano grueso con escasas intercalaciones tobáceas, y el superior, compuesto de tobas líticas, flujos sin estructuras, y ftanita discontinua.
		Contactos	SHAGAM (1960) y KONIGSMARK (1965), consideran las volcánicas de Tiara en contacto discordante sobre el Grupo Villa de Cura, e igualmente por debajo de la Formación Guárico. PIBURN (1968) señaló que la unidad es concordante con la Formación Santa Isabel en la región de Guárico.
		Correlación	SMITH (1952) correlaciona la formación con el Grupo Guayuta en el oriente y con la Formación La Luna en el occidente de Venezuela. MACLACHLAN et al., 1960, señalaron que varios afloramientos asignados por SMITH (1952) a esta formación corresponden realmente al Miembro Los Naranjos de la Formación Tucunemo.

3.3 PERFIL DE METEORIZACIÓN DEL YACIMIENTO LOMA DE HIERRO

Según Bellizzia 1967; Lavié 1967, el perfil de meteorización del yacimiento Loma de Hierro se encuentra constituido por tres (3) niveles, siendo diferenciados por sus características físicas y químicas. Los mismos se describen a continuación:

Nivel 1. Laterita ferruginosa: Es la cobertura de la mena niquelífera, está constituida por un manto de suelo arcilloso, de color rojizo, poroso y permeable, con peso específico relativamente elevado por el alto contenido de hierro (35-45%), y níquel con un peso específico bajo de (0,4-0,8%), la humedad media es de 24,77%. Con respecto a la mineralogía, los óxidos e hidróxidos de hierro son limonita-goethita, y hematita hacia las zonas más superficiales en forma de concreciones.

Entre el nivel 1 y el nivel 2, se encuentra una zona de transición, diferenciándose de la laterita ferruginosa debido a su color amarillento, un menor peso específico y elevada humedad (13-52%). Es una capa porosa casi impermeable, con un menor porcentaje de oxihidróxidos de hierro (35-40%) y mayor porcentaje de níquel (0,8-1%); también se halla enriquecida por oxihidróxidos de manganeso-cobalto.

Nivel 2. Laterita niquelífera (saproлита): Es una roca saprolita altamente meteorizada, que constituye una masa de arcilla, porosa, de bajo peso específico, color pardo amarillento, contenido medio de oxihidróxidos de hierro (25-35%) y humedad media (20-30%). En ésta todavía se encuentran estructuras de la roca original, además de serpentinas (lizardita, antigorita y crisotilo).

Este nivel se caracteriza por grietas y fracturas, lo cual hace que la roca presente una alta permeabilidad, permitiendo así la concentración de la mena niquelífera (garnierita) en forma de vetas y laminaciones, con un tenor de níquel de (1-2%).

Entre la laterita niquelífera y la roca basal se halla una zona de transición, con porcentajes menores de oxihidróxidos de hierro (20-25%) y de níquel (0,5-

0,8%). Por otro lado, la humedad presenta un porcentaje bajo (10-15%) y se encuentran abundantes nódulos.

Nivel 3. Roca basal: Este nivel presenta un grado bajo de humedad (menor al 10%), baja porosidad y un peso específico elevado. El tipo litológico que se halla son: las peridotitas, rocas plutónicas ultramáficas (sin cuarzo y feldespatos). Las mismas se encuentran constituidas por: piroxenos, olivino y anfíboles, además de menores cantidades de ilmenita, cromita y magnetita. El color varía entre verde amarillento y gris, y en ciertas partes se localizan fracturas en la roca, las mismas están rellenas por garnierita y ópalo.

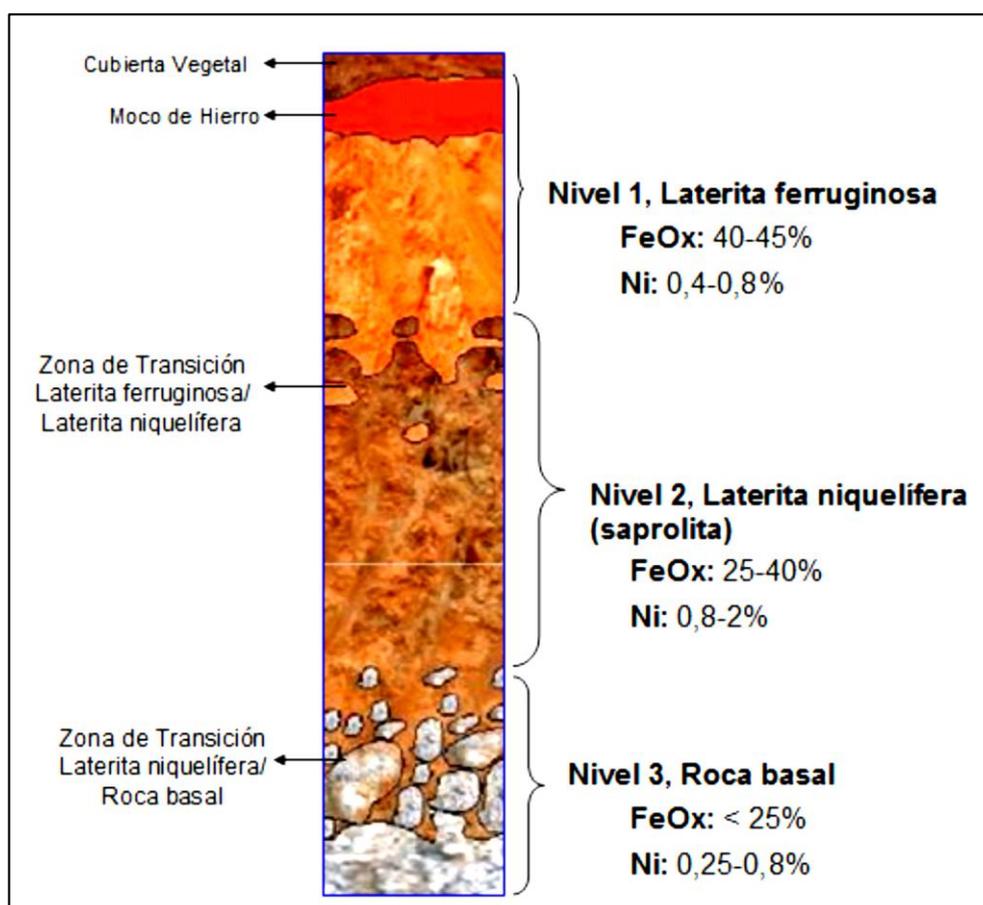


Figura 3.2. Corte vertical de los niveles de meteorización del yacimiento Loma de Hierro.

3.4 MARCO ESTRUCTURAL

La interacción entre las placas Caribe y Suramérica comprende una amplia zona de deformación que afectó toda la parte norte de Venezuela. Este efecto norte-sur comenzó en el Cretácico, a partir de una expansión que permitió la formación del proto-Caribe, así como un arco de islas entre la Cordillera de la Costa y el cratón Guayana. La introducción de la placa Caribe en los bloques continentales norte y suramericano, originó plegamientos, cabalgamientos, así como la depositación de las secuencias que conforman la Serranía del Interior, finalizando con el emplazamiento de fajas cuyas características litológicas corresponden al arco volcánico, meta-sedimentos y sedimentos del Mioceno.

MENÉNDEZ (1966) fue el primero en clasificar las rocas ígneas y metamórficas del centro norte del país, las mismas fueron agrupadas en cuatro fajas tectónicas: Faja de la Cordillera de la Costa, Faja Caucagua-El Tinaco, Faja de Paracotos y por último, la Faja Villa de Cura. Dichas fajas se encuentran separadas principalmente por fallas transcurrentes dextrales post-Oligocenas, siendo acopladas durante el Cretácico Tardío y el Paleoceno por el ciclo tectónico ocurrido en estos periodos.

BELL (1968), divide el territorio en cinco (5) fajas y definió otras tres (3) en la zona piemontina del sur, constituidas únicamente por rocas sedimentarias. GONZÁLEZ SILVA (1972) expone que existieron dos (2) eventos tectónicos de reacomodo, además del mencionado por MENÉNDEZ (1966).

BECK (1985), es uno de los autores que mejor describe la estructura a nivel regional. Este autor, además estudia las características de la Serranía del Interior e introduce la definición de “Napas de Aragua”, siendo éstas agrupadas como: la napa Caucagua-El Tinaco, la napa de Loma de Hierro y la napa de Villa de Cura.

URBANI & OSTOS (1989) confirmaron, a través de los mapas geológicos a escala 1:25.000 de la región de Caracas, los estudios realizados por MENÉNDEZ (1966), e incluyen en su investigación dos (2) fajas adicionales de norte a sur: Faja

Ávila de rocas metaígneas y Faja Caracas con rocas de protolito sedimentario, siendo éstas depositadas en el margen pasivo dentro de la Placa Suramericana.

URBANI (2015), concluyó que la Cordillera de la Costa puede ser dividida en seis (6) fajas tectónicas con características geocronológicamente distintivas.

De acuerdo al sistema de clasificación propuesto por URBANI (2015), las litologías aflorantes en el área de estudio se encuentran en las siguientes fajas, descritas y observadas en la Figura 3.3:

➤ **Faja Caucagua-El Tinaco:**

- Terreno Tucutunemo:
 - Filita Tucutunemo

➤ **Faja Loma de Hierro:**

- Terreno Loma de Hierro
 - Metalava de Tiara

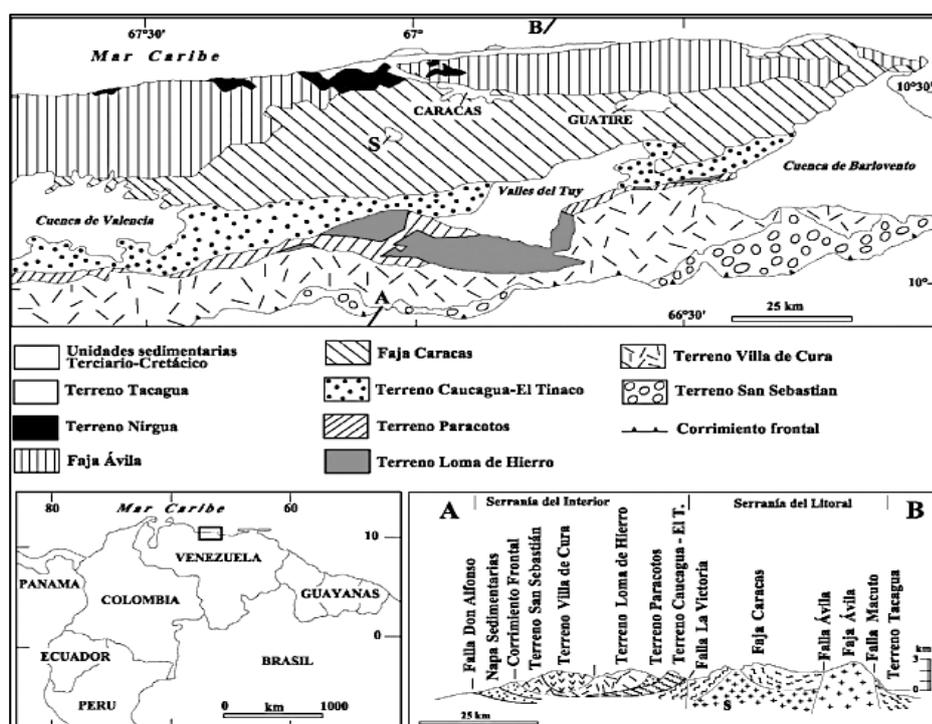


Figura 3.3. Mapa y sección esquemática de la parte central de la Cordillera de la Costa. Simplificado a partir de Hackley et al. 2006 y la sección principalmente de Beck 1986. S: Gneis de Sebastopol, basamento Paleozoico de la Faja Caracas.

3.5 ESTRUCTURAS DE DEFORMACIÓN

3.5.1 Foliación

Faja Caucagua-El Tinaco:

SEIDERS (1962), señala que mayoritariamente la foliación es paralela a la estratificación. Regionalmente el paralelismo se mantiene, pero existen excepciones a nivel local, ya que la orientación de la foliación es variable.

BECK (1985), explica que en el Gneis de La Aguadita hubo tres (3) períodos de deformación, mientras que para el Esquisto de Tinapú y el Metaconglomerado de Charallave solo uno, por lo que infiere una discordancia entre estas y el Gneis de La Aguadita.

Faja Loma de Hierro:

BECK (1985), señala una foliación poco desarrollada en la Filita de Paracotos, mientras que para la Metalava de Tiara indica que corresponde a una foliación aparente de “flujo”, como se observa en la Figura 3.4.

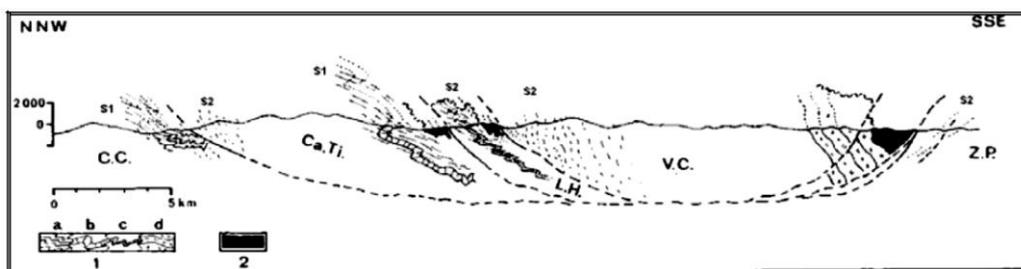


Figura 3.4. Esquema de deformaciones Senonienses y paleógenas: posición esquemática de las Napas sobre un corte transversal. Leyenda: V.C: Napa Villa de Cura, Ca. Ti: Napa Cauagua – El Tinaco, L.H: Napa de Loma de Hierro, Z.P: Flysch Paleógeno. Tomado de BECK (1985).

3.5.2 Plegamiento

Faja Caucagua-El Tinaco:

BECK (1985), señala en los afloramientos del Esquisto de Tinapú y la Filita Tucutunemo, la presencia de pliegues tipo échelon, o Kink, con amplitudes aproximadamente desde 20 cm hasta 1m. Sus planos axiales tienen dirección N50°-70°, o

son verticales y ondulados, o muestran una inclinación marcada (60° - 80°) hacia el norte o el sur. Estos se pueden observar en la Figura 3.5.

También hace mención de pliegues hectométricos y métricos, abiertos a isoclinales (Figura 3.6), con ejes cuya orientación es de N10E y N45E. Estos plegamientos afectan directamente al Esquito de Tinapú y la Filita de Tucutunemo.

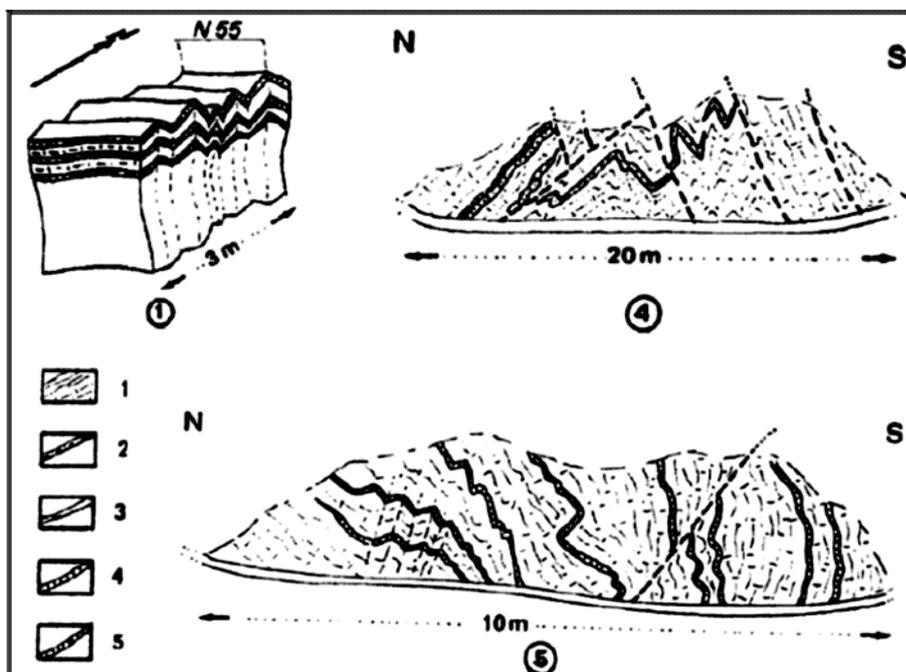


Figura 3.5. Bosquejo de afloramientos en la Filita de Tucutunemo, se aprecian algunas de las deformaciones de la Napa Caucaagua-El Tinaco. Tomado de BECK (1985).

Leyenda: 1. Esquito y esquistos carbonaticos; 2. Cuarcita micácea; 3. Cuarcita; 4. Már-mol recrystalizado; 5. Már-mol cuarzoso y metagrauvaca.

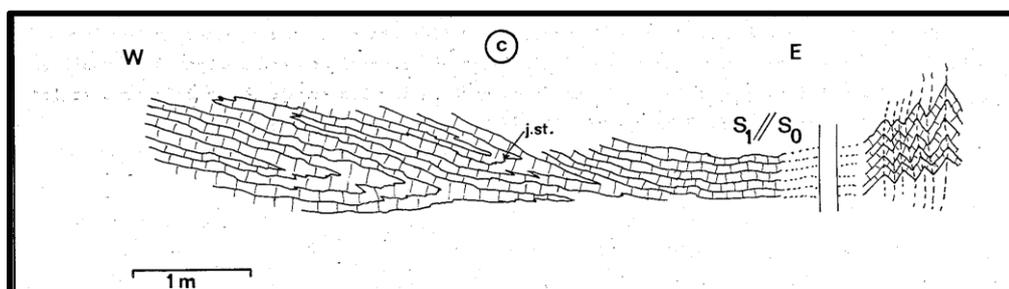


Figura 3.6. Corte del Esquisto de Tinapú y la Filita de Tucutunemo, se logra apreciar los pliegues a gran escala. Tomado de BECK (1985). Leyenda: ca: Már-mol recrystalizado negro de grano fino; cag: Már-mol recrystalizado arenoso y grauvaquico; cas: Esquito carbonatico; ml: Már-mol limoso en laminita; mv: Metalava básicas; s: esquito y filita; ss: Esquito sericítico; sv: Metatoba.

Faja Loma de Hierro:

BECK (1985), menciona la presencia de pliegues subisoclinales (Figura 3.7), pliegues con mayor amplitud y pliegues tipo Kink rectos en la Filita de Paracotos.

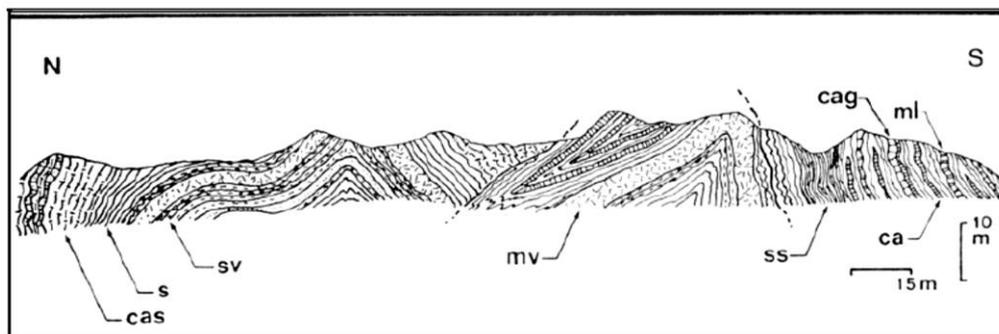


Figura 3.7. Representación de las estructuras mesoscópicas observada en la Filita de Paracotos. Leyenda: ca: calizas cristalinas negras de grano fino, cag: calizas cristalinas de color grisáceo, cas: calcáreo, ml: caliza limosa en laminitas, ms: mica esquistos, mv: metalavas básicas, ss: esquistos sericíticos, s: esquistos y filitas. Tomado de Beck (1985).

3.5.3 Fallamiento

Faja Caucagua-El Tinaco:

Según BECK (1985), existen fallas compresivas en dirección (N75° y E-O), o con inmersión N45° a N60°. Por otro lado, ocurren transiciones entre fallas subverticales (N155°-160° y N-135°-140°) y fallas ligeramente inclinadas de dirección vecina, esto se relaciona con repeticiones de fases de compresión aproximadamente normales, con fallas subverticales preexistentes.

También señala la presencia de fallas inversas, observadas en el interior de la faja, éstas se presentan en dirección N60°-65° con inclinaciones generalmente pronunciadas tanto, hacia el Sur como hacia el Norte, y la dirección N45° con una inclinación dominante hacia el Norte. Por otro lado, la dirección N90° con inclinaciones de 25° a 55° hacia el Sur; siendo aproximadamente paralela al contacto basal de la faja.

Faja Loma de Hierro:

Según SEIDERS (1962), señala que en el borde septentrional de esta Faja hay una falla, cuyo carácter es menos sinuoso que la falla de Agua Fría. Debido a la orientación casi E-O, MENÉNDEZ (1962) la interpreta como una falla normal.

BECK (1985) menciona que la Faja se encuentra en contacto de falla de corrimiento con la Faja Villa de Cura, con rumbo N60°-80°E, y buzamiento al norte y sur, respectivamente. También señala la presencia de fallas con trazas de rumbo N20°-40°E.

Existe una falla en la zona sur de la Faja Loma de Hierro, ésta se extiende unos 18 km, con orientación N55°-65°E, desde el sector Las Piedras, cerca de Topo Cujial, al sur de Santa Teresa; se encuentra limitando la Faja de Villa de Cura y Loma de Hierro y es desplazada dextral y sinistralmente por fallas de rumbo N30°-45°O (ORTA ORTIZ, 2003).

3.6 EVOLUCIÓN TÉCTONO-ESTRATIGRÁFICA

El área de estudio se encuentra ubicada en la Serranía del Interior, abarcando a dos (2) fajas tectónicas: La Faja Caucagua-El Tinaco y La Faja de Loma de Hierro. Éstas a su vez son divididas en terrenos, de los cuales se estudiaron la evolución Tectono-Estratigráfica de Tinaco-Tucutunemo y Loma de Hierro.

Las fajas Caucagua-El Tinaco y Loma de Hierro descansan apiladas en el flanco sur del anticlinorio de la Cordillera de la Costa, o en el borde sur de la zona de la Cordillera de la Costa (BECK, 1985).

La Faja Caucagua-El Tinaco, representada por el Terreno Tinaco-Tucutunemo del Neoproterozoico-Cretácico Tardío, considerándose al Gneis de La Aguadita (Neoproterozoico) y el Esquisto de Tinapú (Paleozoico) como basamento, son denominadas el Complejo El Tinaco (RENZ & SHORT 1960, MENÉNDEZ 1965).

El Terreno Tinaco-Tucutunemo es un bloque de manto subcontinental (la peridotita de Tinaquillo), el cual formó parte de la Placa de Farallón, ubicada en el noreste de la placa suramericana, antes de la separación entre Suramérica y Norteamérica. PINDELL *et al.* (2005), planteó un modelo explicativo en el cual propone que los márgenes continentales americanos de la placa Caribe se formaron en el Jurásico, debido a la ruptura de Pangea y, originalmente, se enfrentaron a la ruta marítima de Proto-Caribe, en donde el suelo marino fue el resultado de la separación de América del Norte y del Sur, luego estos márgenes fueron anulados diacrónicamente por el arco de islas y complejos oceánicos alóctonos que se encontraban en la placa del Caribe y su complejo de acreción.

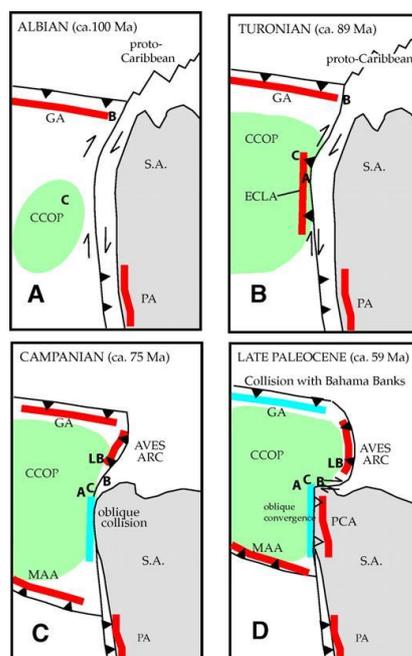


Figura 3.8. Representación del origen del terreno Tinaco-Tucutunemo desde el Albiense hasta el Paleoceno tardío. Tomado de WRIGHT & WYLD (2011) en URBANI (2012).

La Filita Tucutunemo del Pérmico, se halla en la parte centro-oriental de la Faja Caucagua-El Tinaco, ésta es una unidad de gran extensión que suprayace a las unidades más antiguas del Terreno Tinaco-Tucutunemo, presenta microfauna del Paleozoico tardío y niveles de rocas basálticas (BENJAMINI ET AL., 1986).

El terreno Loma de Hierro es un bloque litósfera oceánica, que presenta unidades ultramáficas (dunita, harzburgita), gabro y basalto. GIRARD *et al.* (1982) encuentra afinidad de Dorsal Medio Oceánica en el Metabasalto de Tiara, mientras que BECK

(1986) propone que la unidad de Río Guare es la cobertura sedimentaria de las rocas ígneas. Adrew Kerr (2008) determinó una edad de 295 Ma a una muestra de gabro, considerando así que la ofiolita tiene relación con una corteza oceánica originada por la apertura del océano Iapetus en el Paleozoico, en vez de haberse formado en el proto-Caribe (URBANI 2012).

En el Neocomiense, ocurre la colisión del arco de islas contra el oeste-noroeste de Suramérica, lo cual provoca que los cinturones tectónicos sean transportados y deformados (OSTOS, 1990).

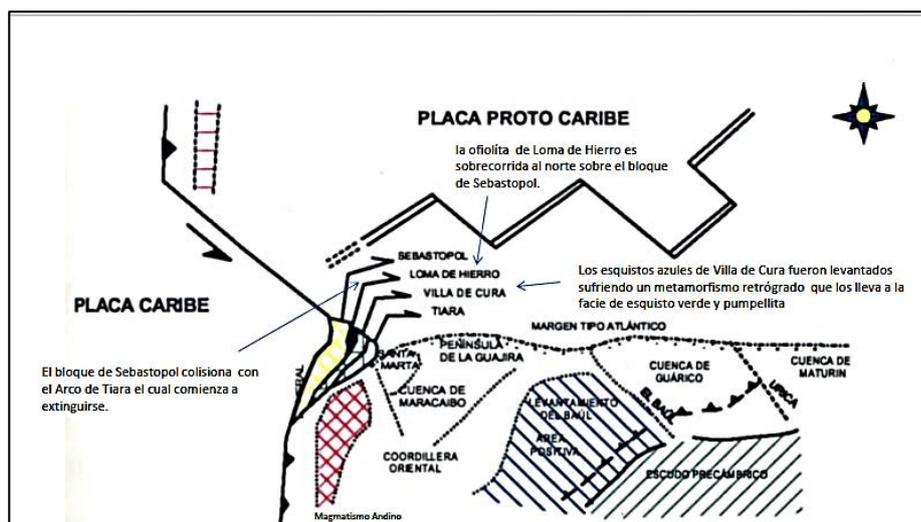


Figura 3.9. Representación del Hauteriviense (125 m.a). Tomado y modificado de OSTOS (1990).

Durante el Cretácico Tardío continúa la sedimentación de unidades de margen pasivo. Las rocas metavolcanosedimentarias se depositan sobre la Ofiolita de Loma de Hierro y el Terreno Paracotos, constituido por la Filita de Paracotos (depósitos turbidíticos).

Hacia el Paleoceno-Eoceno, la placa Caribe comienza a moverse hacia el este, ya que la interacción entre la placa Caribe contra Norteamérica se frena al encontrarse contra el banco de las Bahamas y Cuba. Debido a esto, en el norte del país comienza una interacción de manera oblicua.

En el Eoceno, la placa suramericana y el Caribe tienen mayor interacción, lo cual hace que, en la Cordillera de la Costa la corteza oceánica Proto-Caribe se consuma, debido a la subducción presente en el norte y sur. Esto permitió que los materiales, que se encuentran en el Arco se fueran acercando al continente Suramericano.

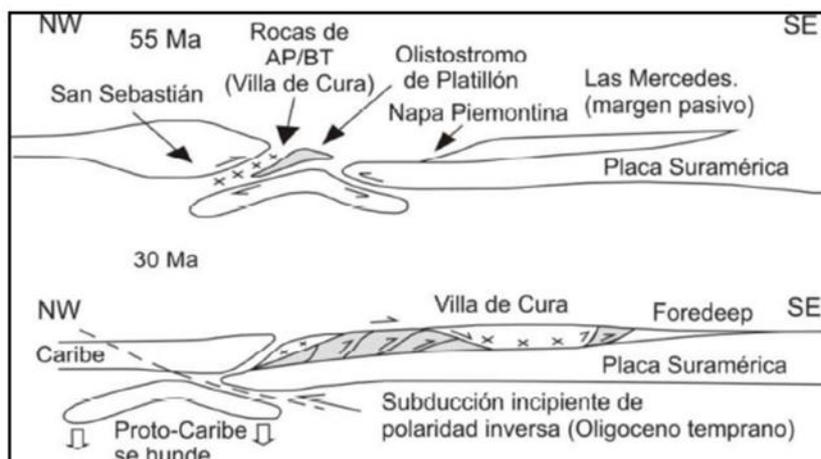


Figura 3.10. Ilustración colisión de la Placa Caribe y la Placa Suramericana entre el Eoceno y el Oligoceno. Adaptado de PINDELL et al. (2005).

A fines del Eoceno sigue el avance de los terrenos que conforman hoy la Serranía del Interior. Los levantamientos hacia el norte y la interacción de la Placa Caribe hacen que el terreno El Tinaco-Tucutunemo sea emplazado sobre los terrenos Agua Blanca y Las Mercedes.

Durante el Oligoceno y el Mioceno, los efectos entre las placas se hacen más notorios en la Cordillera de la Costa. En el Arco, (las rocas ígneas, volcánicas y sedimentarias, las que se encontraban en condiciones someras y las del complejo de subducción) son emplazadas completamente en el margen pasivo de Suramérica.

En el Mioceno, los terrenos sufren una etapa de reacomodo tectónico, debido a los levantamientos presentados al oeste de la Cordillera de los Andes, y que continuaron en el Plioceno, generándose importantes esfuerzos que permiten el desarrollo de sistemas de fallas dextrales de ángulo alto (ej.: fallas de Oca-Ancón, San Sebastián, Macuto, El Pilar, La Victoria).

CAPÍTULO III

4 MARCO METODOLÓGICO

4.1 GENERALIDADES

En este capítulo, se describe la metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo, cuyo objetivo de investigación es analizar la incidencia de las variables geológicas en el transporte de sedimentos en suspensión hídrica, en la mina de División Níquel, desarrollada en Tiara, estado Aragua. También, tiene como finalidad avanzar hacia un modelo de paisaje de erosión, como herramienta de planificación para minimizar los efectos ambientales negativos en los cauces naturales y gestionar los riesgos siconaturales.

Se realizó una serie de procedimientos con el fin de evaluar el problema planteado, a través de cinco (5) etapas, en las cuales fueron integradas las técnicas de: observación, recolección y análisis de datos de campo e integración con resultados de laboratorio y oficina, haciendo énfasis en la solución del problema de control de sedimentos en suspensión hídrica, en el orden siguiente:

Etapa I: Compilación de información bibliográfica y cartográfica-geológica

Etapa II: Trabajo de campo

Etapa III: Ensayo de resistencia al desgaste y análisis petrográfico de muestras

Etapa IV: Generación de mapas temáticos, uso de Sistema de Información Geográfica (SIG ArcGis®).

Etapa V: Elaboración de mapas de susceptibilidad a la erosión hídrica, a escala 1: 50.000, con uso de Sistema de Información Geográfica (SIG ArcGis®).

Etapa VI: Análisis inductivo para modelo de erosión de paisaje.

4.2 ETAPA I: COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CARTOGRÁFICA-GEOLÓGICA

La primera etapa de desarrollo de la investigación consistió en recopilar, y analizar el material bibliográfico, constituido por estudios de impacto ambiental, suministrados por la empresa C.V.M S. A. División Níquel (en adelante, División Níquel). Asimismo, se obtuvieron datos a través de Trabajos Especiales de Grado

(TEGs), Trabajos de Ascenso, fotografías aéreas, artículos técnicos, publicaciones en boletines, congresos y revistas, todas éstas disponibles en la biblioteca de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Con respecto a la cartografía geológica, como base de la investigación se utilizaron cuatro (4) hojas a escala 1:25.000 del Atlas de la Cordillera de la Costa (URBANI & RODRÍGUEZ, 2003):

Tabla 4.1. Descripción de las hojas cartográficas utilizadas. Tomado de: Atlas de la Cordillera de la Costa. Urbani & Rodríguez (2003).

Número de Hoja	Nombre del mapa geológico
6746-I-SE	Tácata
6746-I-SO	Morocopo
6746-II-NO	El Pao de Zárata
6746-II-NE	Altagracia de la Montaña

Asimismo, se emplearon los mapas topográficos a escala 1:25.000, correspondientes a la zona de estudio, adquiridos en el Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional, actual Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB).

- Hojas 6746: I (SE-SO) y II (NO-NE).

Por otro lado, se descargaron imágenes LANDSAT 8 y un modelo digital de elevación DEM 30 m de la misión STRM, a través del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

4.3 ETAPA II: TRABAJO DE CAMPO

En la segunda etapa, se realizó el reconocimiento geológico de la zona, con la finalidad de obtener los datos y muestras necesarias en la investigación. Para ello,

se llevaron a cabo varias salidas de campo en División-Níquel, donde fueron ubicados los puntos de interés en las áreas afectadas por los procesos de erosión hídrica, considerando los tres (3) sectores actuales de extracción mineral (I, II y III), para así obtener datos a saber, cómo:

- Identificación de las características morfométricas del paisaje, previas a las modificaciones actuales resultantes de las labores mineras, lo cual permitió establecer las zonas con alto potencial erosivo.
- Recolección de muestras de mano de litologías frescas y meteorizadas, que fueron estudiadas con el objeto de describir sus componentes minerales, además de conocer las áreas donde se están generando los mayores procesos de transformación química de la roca, provocando la alteración y pérdida de cohesión de la misma.
- Estudio del comportamiento fluvial y pluvial de la zona, donde se verificó que la componente hídrica es uno de los factores más importantes en el proceso de erosión, debido a que provoca una intensa meteorización y disección de los suelos, generando la remoción y transporte de las partículas, a través de las aguas de escorrentía.
- Identificación de la presencia o ausencia de vegetación y del desarrollo de suelos, lo cual permitió establecer las áreas desprotegidas de la capa vegetal, además de los suelos que se hallan con mayores problemas y ocurrencia de fenómenos de erosión.
- Reconocimiento de las medidas minero ambientales implementadas dentro de la mina, para la mitigación de los procesos erosivos, las cuales fueron estudiadas con el fin de describir las condiciones actuales de retención y contención de sedimentos generados por la extracción mineral.
- Conservación de las muestras para los ensayos de laboratorio, a las cuales se le realizó el análisis físico y resistente al desgaste, e integración de resultados con las observaciones realizadas en campo.

4.4 ETAPA III: GEOMECÁNICA DE LA ROCA Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO DE MUESTRAS

La tercera etapa del trabajo consistió en la realización de un ensayo de resistencia al desgaste y estudio petrográfico a las muestras recolectadas durante la etapa de campo, para establecer la relación que existe entre el grado de alteración y descomposición de la roca, y su resistencia al proceso de erosión hídrica en la producción de sedimentos en suspensión.

4.4.1 Ensayo de resistencia al desgaste

Con base en las observaciones hechas durante el trabajo de campo, se seleccionaron tres (3) muestras correspondientes a los sectores I, II, III, y posteriormente, se les realizaron los ensayos en el Laboratorio de Mecánica de Rocas, adscrito a la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para definir la resistencia de las rocas y sus características texturales. Dichas propiedades permitieron establecer cuán susceptibles son éstas, o al menos su representación, al proceso de erosión hídrica y, por lo tanto, a la generación de sedimentos en suspensión proveniente de la mina. Los ensayos son descritos a continuación:

4.4.1.1 Slake Durability Test

El ensayo se realizó para determinar la durabilidad al desmoronamiento de rocas blandas. Según Franklin & Chandra (1977), el procedimiento consiste en la preparación de una muestra representativa de material rocoso emplazada en 10 fragmentos de tamaño regular; cada fragmento debe pesar entre 40 y 60 g, respectivamente, alcanzando un peso total entre 450 y 550 g. Posteriormente, se coloca la muestra dentro de un tambor cilíndrico cuya superficie lateral es una malla rígida de 2 mm de abertura, se seca a 105°C y se registra el peso A. Luego, el tambor se dispone de forma horizontal dentro de un recipiente con agua a 20°C, hasta un nivel de 20 mm por debajo del eje del tambor. El tambor se gira, 20 r.p.m., durante un período de 10 minutos (1° ciclo). Una vez culminado este ciclo, se retira el tambor y, se colocan éste más la muestra en una estufa a 105°C. Una vez seca, se determina el peso B. Este ciclo se repite (2° ciclo), para obtener el peso C. Por último, se limpia el tambor y se toma su peso D.

Los resultados se dan a partir del índice de durabilidad (ld) de los diferentes ciclos y, éste se obtiene a partir de las masas secas determinadas, antes y después de cada ciclo, con el uso de las ecuaciones (29) y (30), más adelante. La Figura 4.1 esquematiza el procedimiento de este ensayo, ciclo a ciclo.

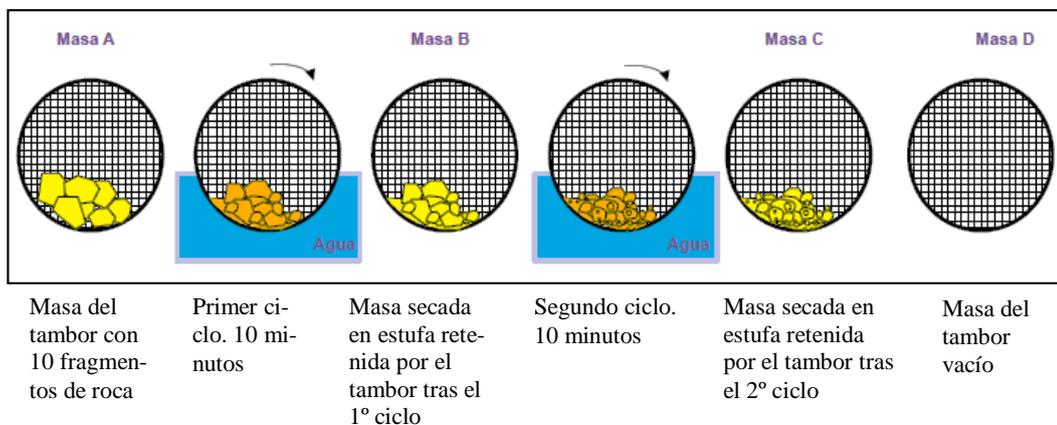


Figura 4.1. Ilustración de los procedimientos del ensayo Slake Durability Test. Tomado y modificado Tomado de: Ensayos geotécnicos de suelos y rocas. Universidades de Alicante y de La Laguna. TOMÁS, R., SANTAMARTA, J.C., CANO, M. HERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ, L.E., GARCÍA-BÁRBARA, J. (2013).

Los índices de durabilidad correspondientes al primer ciclo (ld_1) y segundo ciclo (ld_2) se calculan a través de las ecuaciones (29) y (30) como:

$$ld_1 = \frac{B - D}{A - D} \quad (29)$$

$$ld_2 = \frac{C - D}{A - D} \quad (30)$$

La Figura 4.2 presenta el esquema del equipo de ensayo Slake Durability Test (SDT o Franklin & Chandra, 1972) para caracterizar la durabilidad de la roca. La Tabla 4.2 presenta los valores del índice de Clasificación “Slake Durability Test (lp)”, de acuerdo con Goodman (1980).

Tabla 4.2. Clasificación “Slake Durability Test (Ip)- (Goodman, 1980)

Grupo	% Retenido después del primer ciclo (Peso seco)	% Retenido después del segundo ciclo (Peso seco)
Muy Alta	>99	>99
Alta	98-99	96-98
Moderada	95-98	86-95
Media	85-95	61-85
Baja	60-85	31-60
Muy Baja	<60	<30

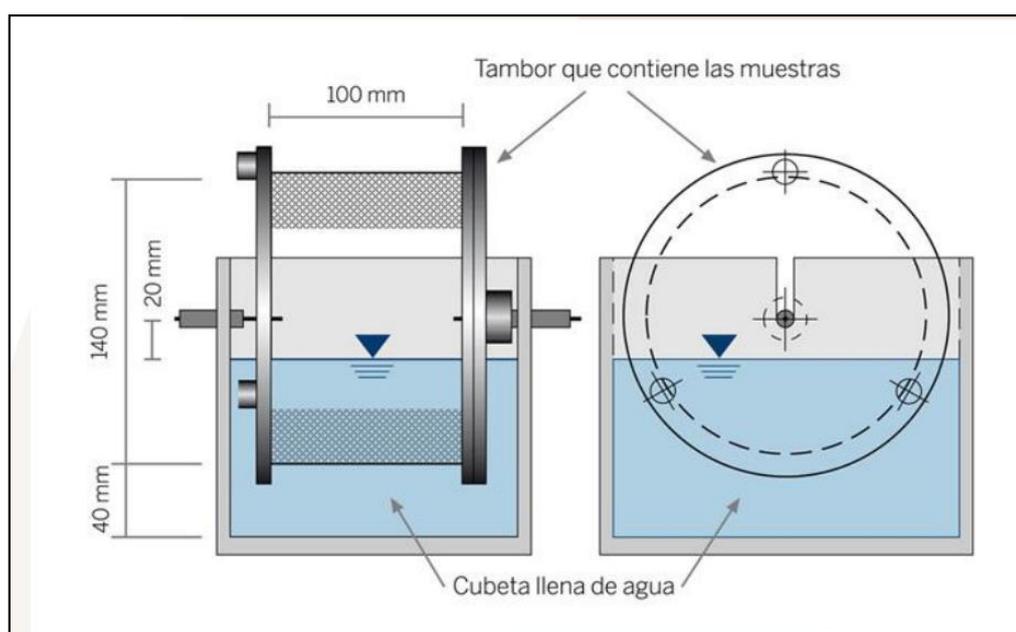


Figura 4.2. Esquema del equipo de ensayo Slake Durability Test (SDT o Franklin & Chandra, 1972) para caracterizar la durabilidad de la roca.

4.4.2 Análisis petrográfico

El análisis de las secciones finas fue realizado sobre ocho (8) muestras recolectadas de roca fresca y meteorizada. Las mismas fueron descritas a partir de muestras de mano, verificando y complementando aquella elaborada en campo, apreciándose mejor las características litológicas y, adicionalmente, se les tomaron fotografías con su respectiva escala gráfica. Posteriormente, se prepararon las secciones finas en el “Laboratorio de Preparación de Secciones Finas, Departamento

de Geología – UCV”, y posteriormente fueron analizadas en el “Laboratorio de Petrografía Ígneo-Metamórfica, Departamento de Geología – UCV”, por medio del microscopio de luz polarizada.

El estudio petrográfico, tuvo como objeto determinar el grado de alteración y su susceptibilidad a la meteorización asociados a la presencia de minerales. Además, se apreciaron los principales minerales constituyentes de la roca, el porcentaje areal en la sección fina y los rasgos texturales de la misma.

4.5 ETAPA IV: GENERACIÓN DE MAPAS

La cuarta etapa consistió en la evaluación de las características del área de estudio, de acuerdo a la información disponible, haciendo usos de imágenes satelitales y un Sistema de Información Geográfica (SIG), para el manejo de la información espacial.

Para la generación del Mapa Geológico, se utilizaron las hojas del Atlas de la Cordillera de la Costa, en formato raster, a escala 1:25.000 y, posteriormente, se procesaron a través del SIG ArcGis versión 10.3, donde toda la información fue procesada con el Datum REGVEN 19N. El procedimiento consistió en vectorizar la información correspondiente a: unidades litológicas, contactos litológicos, fallas, etcétera. Los topónimos se obtuvieron mediante los mapas topográficos del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, a escala 1:25.000.

En cuanto a la determinación y estudio de los parámetros morfométricos para la elaboración del mapa con parámetros morfométricos de subcuencas, se emplearon: el modelo de elevación digital ASTER (por, Satélite *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) y el sistema de información geográfico (SIG) programado comercialmente en ArcGis versión 10.3, con los cuales se generó la red de drenaje y, posteriormente, se delimitó el área de las subcuencas locales: Mesia, Tiara, Cagua y Paito. Aplicando la teoría descrita en la sección 2.4.1 en el marco teórico, se calcularon los principales rasgos y características de las subcuencas como: área, perímetro, longitud del cauce principal, pendiente media de la

cuenca, pendiente media del río principal, factor de forma, índice de Gravelius, índice de Miller, tiempos de concentración, densidad de drenajes, curva hipsométrica y frecuencia de altitudes.

Por otro lado, para la elaboración de los mapas de vegetación, suelos y uso de suelos, se utilizó imagen satelital correspondiente al sensor LANDSAT 8, para realizar un análisis multivariado, por medio de la clasificación supervisada. Ésta permitió clasificar el raster a través de los valores de cada pixel, creando puntos y asignándoles el nombre correspondiente a cada clase. Seguidamente, se generó la firma espectral (descripción estadística de las clases que derivaron de las muestras identificadas en el raster de entrada) mediante la herramienta “*Create Signatures*” del SIG (ArcGis 10.3), para luego crear una imagen raster reclasificada, a partir de la herramienta “*Maximum Likelihood Classification*”.

En lo relativo a la elaboración del Mapa de Precipitación, esto fue posible mediante la obtención de los datos de lluvias mensuales, registradas en 6 estaciones, a lo largo del período 2010-2019, suministrados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), además de otros datos obtenidos en los registros de la estación de Loma de Níquel, entre 1998 y 2016, proporcionados por la Empresa, y los registros de lluvias descargados del programa Larc-Power de la NASA, en el periodo (1999-2017). Se realizó el Mapa de Precipitación Media Anual mediante el método de las Isoyetas, para estimar la cantidad de precipitación acumulada en el sistema hidrológico, a través de la exportación y procesamiento hacia el SIG. Seguidamente se generaron las isolíneas a partir de las estaciones pluviométricas, y finalmente, se calculó el área dibujada entre las isolíneas y los límites de la zona de estudio a partir de la ecuación (1).

Para la realización del Mapa de Temperatura, primero se obtuvieron los datos de temperaturas registrados en la estación “NASA”, mediante el programa Larc-Power. Dicha estación se tomó como base para los cálculos de los datos de temperaturas de las estaciones estudiadas (Tiara, Loma de Níquel, San Francisco de Pao, San Diego de los Altos, La Urbina Quebrada Seca, El Cortijo, San Sebastián de los Reyes), siendo estos valores obtenidos a partir del gradiente altotérmico del territo-

rio venezolano. Con los datos de temperatura de las estaciones, se estableció la variación espacial, mediante la exportación y procesamiento hacia el ArcGis, y posteriormente se generó el mapa a partir de la herramienta Spline, la cual utiliza un método de interpolación para estimar los valores a partir de una función matemática, que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (Franke R, 1982).

En cuanto a la Evapotranspiración Potencial (ETP), los valores se estimaron a partir de la ecuación (3) de Thornthwaite, con su correspondiente corrección del mes ecuación (6) para cada estación meteorológica. Posteriormente, estos fueron procesados mediante el software ArcGis, e interpolados con la herramienta Spline para la generación del Mapa de Evapotranspiración Potencial (ETP).

Por otra parte, el mapa correspondiente al Coeficiente de Humedad del Suelo, se realizó a partir de los valores obtenidos entre las precipitaciones y la evapotranspiración potencial, siendo posteriormente interpolados mediante la herramienta Spline en el software de ArcGis.

Capas temáticas:

Se realizó la integración y el procesamiento de las formas del relieve y de los factores litológicos, vegetativos e hidrológicos, que inducen e inciden en la generación del proceso erosivo. Estos factores constituyen las variables a ser cartografiadas mediante el software, a fin de evaluar las zonas susceptibles a la erosión hídrica y transporte de sólidos en suspensión.

Lo anterior requiere la determinación de factores y subfactores, como se describen por separado:

Factor LS: a través del manejo de la imagen (ASTER) y el uso de la herramienta “*raster calculator*” en el SIG, se determinaron los subfactores de longitud de pendiente (L) a través de las ecuaciones (16) (17) (18) (19), y el grado de inclinación de la pendiente (S) mediante las ecuaciones (20) (21) y, posteriormente, en conjunto, se estimaron los valores del Factor Topográfico (LS) a través de la multiplicación de los raster resultantes (L) y (S).

Factor K: se procesaron los datos de tipo de suelo en la zona de estudio y su potencial de erodabilidad, a través de los valores tabulados por HILBORN (2012) presentados en la Tabla 2.10, los cuales dependen directamente de las propiedades del suelo, es decir, del contenido de materia orgánica y de la clase textural.

Factor R: se procedió de manera similar que con el Mapa de Precipitación Media Anual, pero en este caso, los datos procesados son aquellos calculados a través de la ecuación (22) del índice modificado de Fournier-Arnoldus. Una vez obtenido el mapa se reclasificó de acuerdo a los índices, presentados en la Tabla 2.9.

Factor C: mediante el procesamiento de la imagen satelital del sensor LANDSAT 8, se obtuvo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI); para el cálculo se utilizó la información de la banda 4 (VIS= Rojo Visible) y 5 (NIR= Infrarrojo Cercano) y, posteriormente, se aplicó la ecuación (23) a través de la herramienta “*Raster Calculator*”, del software ArcGis. Finalmente, se aplicó la ecuación (24) de SULISTYO (2011), para la generación del mapa de cobertura vegetal.

Índice de Potencial de Flujo (SPI): se utilizó la imagen del satélite ASTER y con el SIG se halló la variable (α) a través de la herramienta “*Flow Accumulation*”, para obtener la acumulación de flujo de las cuencas y, seguidamente, se determinó la pendiente, en radianes, de la zona, a través de la herramienta “*Slope*”, siendo ésta la variable (β). Una vez generadas las dos (2) variables, se calculó el Índice de Potencial de Flujo, mediante la ecuación (25).

Índice de Humedad Topográfica (TWI): a través del procesamiento de la imagen del satélite ASTER y el SIG, se consiguió la acumulación de flujo de las subcuencas mediante la herramienta “*Flow Accumulation*”, la cual representa la variable (α) y, posteriormente, se determinó la pendiente, en radianes, de la zona, siendo ésta la variable (β), a través de la herramienta “*Slope*”. Por último, se calculó el Índice de Humedad TWI, mediante el uso la ecuación (26).

Índice NDVI: Se procesó la imagen del satélite LANDSAT 8 mediante el SIG, y a través de la información de las bandas 4 (VIS= Rojo Visible) y la banda 5 (NIR= Infrarrojo Cercano), y finalmente se calculó el índice NDVI a través de la aplicación de la ecuación (23).

4.6 ETAPA V: ELABORACIÓN DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN HÍDRICA A ESCALA 1: 50.000

Con relación al Mapa de Susceptibilidad a la Erosión Hídrica, este se generó a partir de los factores (LS, R, K, C). Debido a que los valores presentados en los mapas generados tienen distintas unidades de medidas y diferentes significados, éstos se reescalaron para poder estandarizar sus valores a una misma unidad, y de esta manera poder compararlos. En este caso de estudio, éstos fueron reescalados por el método de Valor Máximo, que consiste en dividir los valores de cada mapa por su máximo valor a encontrar (Castellanos *et al.*, 2005; Jiang and Eastman, 2000; Malczewski, 1999).

En este sentido, el mapa del Factor LS presenta valores entre 0° y $65,86^\circ$, aplicando este método, se dividió el mapa entre su valor máximo ($65,86^\circ$), obteniéndose un mapa normalizado, cuyos valores oscilan entre 0 y 1, siendo que: 0, representa la más baja susceptibilidad, mientras que 1 representa la más alta susceptibilidad en el proceso de erosión hídrica.

La determinación de la jerarquía de las capas, se realizó mediante la Matriz de Jerarquización Analítica, SAATY (1980), descrita en la Tabla 2.11, la cual se basa en una escala de comparación de 1 a 9, de acuerdo al nivel de importancia de los pares (variables) comparados, integrando los factores descritos en la sección de capas temáticas. Posteriormente, se calculó el peso normalizado (W), el cual fue corroborado a través de la Relación de Consistencia (CR), con la ecuación (27); y el Índice de Consistencia (CI) con la ecuación (28).

Finalmente, las capas fueron superpuestas, tal como se muestra en la Figura 4.3 con su peso relativo correspondiente, de acuerdo a su propensión a generar procesos de erosión hídrica, a través de la ecuación (31), mediante el álgebra de mapa de la herramienta “*Raster Calculator*”, de ArcGis. Por último, el raster de salida se reclasificó en cuatro (4) categorías, que indica la susceptibilidad al proceso de erosión hídrica.

$$\text{Susceptibilidad} = 0,50 (LS) + 0,09 (R) + 0,16(K) + 0,25(C) \quad (31)$$

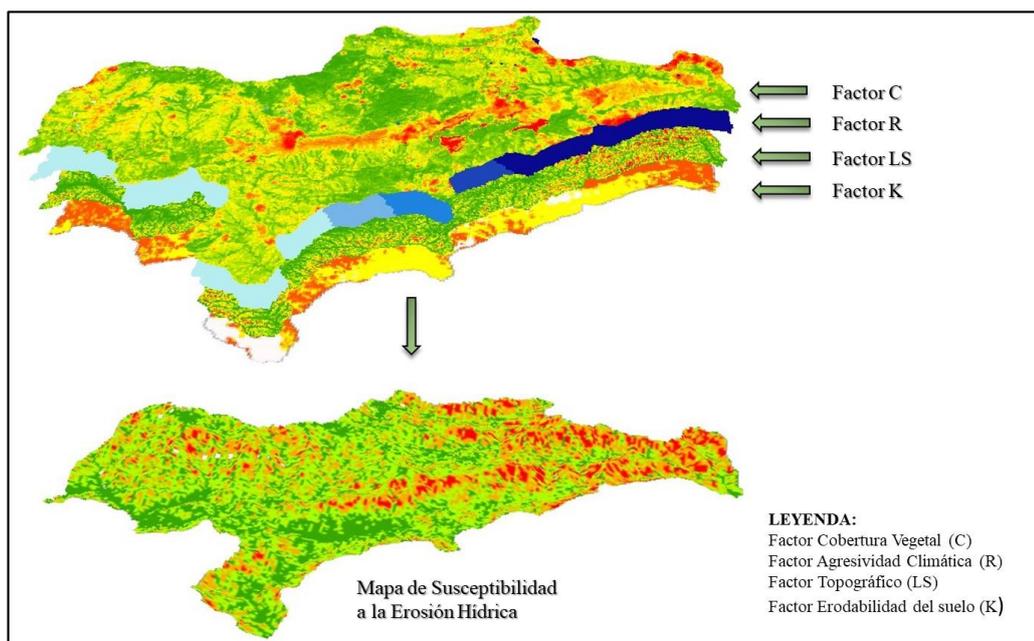


Figura 4.3. Representación de las variables cartografiadas mediante el SIG, a fin de evaluar las zonas con susceptibilidad a la erosión hídrica.

Como muestra la Figura 4.4, para la Rectificación del Mapa de Susceptibilidad a la Erosión Hídrica, se trabajó con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), y los Índices del Terreno, es decir, el Factor Topográfico (LS); el Índice Potencial de flujo (SPI) y el Índice de Humedad Topográfica (TWI). Los índices se escalaron nuevamente a valores entre 0 y 255, a través de la ecuación (32), introducida en la herramienta “*Raster Calculator*”, donde el valor mínimo indica “Baja Erosión” y el valor máximo “Alta Erosión”.

$$\text{Raster reescalado} = [(\text{índice} - \text{Valor mínimo del índice}) * (\text{Valor de escala máxima} - \text{Valor de la escala mínima}) / \text{Valor máximo del índice} - \text{Valor mínimo del índice}] + \text{Valor de escala mínima.} \quad (32)$$

El siguiente paso consistió en la combinación de los índices a través, de un análisis multivariado con el uso de la herramienta “*Iso Cluster*”, donde se determinaron las características de las agrupaciones naturales de las celdas en el espacio de atributos multidimensionales, siendo el resultado final un archivo de firma ASCCI de salida, con un número de cuatro (4) clases, correspondientes a las categorías de erosión. Dicho archivo se ingresó en la herramienta “*Maximum Likelihood Classification*”, para realizar una clasificación de máxima probabilidad. Y, finalmente, se obtuvo el *raster* correspondiente al Potencial de Erosión Local.

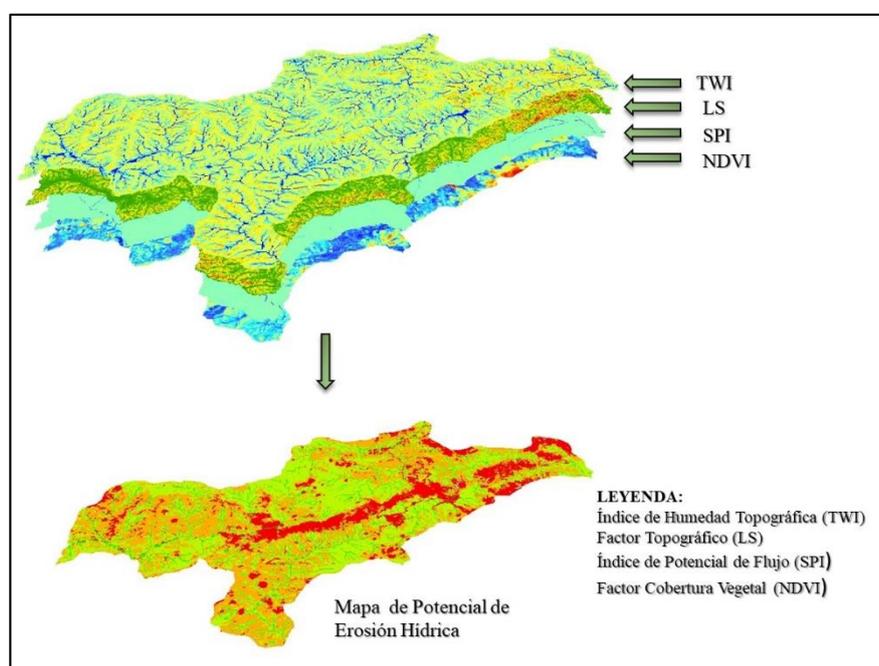


Figura 4.4. Representación mapa de susceptibilidad obtenido a partir del Índice de Vegetación y los Índices del terreno.

Los mapas de susceptibilidad permitieron sectorizar las áreas críticas, además de demostrar la interacción de los factores naturales, antrópicos, en los procesos de erosión del paisaje, donde este último resulta ser un factor condicionante con una probabilidad muy alta al proceso de erosión hídrica en el área de estudio.

4.7 ETAPA VI: ANÁLISIS INDUCTIVO PARA MODELO DE EROSIÓN DE PAISAJE

El aporte del análisis inductivo del Modelo de Erosión de Paisaje, es un beneficio fundamental para la empresa División Níquel, las comunidades cercanas como Tiara y la comunidad científico-técnica, donde a través de la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se pueden obtener estimaciones fiables sobre los procesos de erosión, la predicción de las tasas de erosión, y la representación en digital de las superficies de erosión y el paisaje resultante, a partir de la cartografía temática y los modelos digitales del terreno.

Constituye, además, una mejor precisión de los resultados, al utilizar una cartografía de mayor detalle, a una escala (1:50.000), siendo de gran utilidad en la planificación autónoma, estatal, municipal, para la evaluación del proceso de erosión hídrica, pudiéndose gestionar una mayor cantidad de información, alfanumérica y gráfica, permitiendo también la actualización periódica del modelo de erosión de paisaje.

Cabe destacar que el Mapa de Susceptibilidad al Proceso de Erosión Hídrica, no predice cuándo este fenómeno ocurrirá, pero permite identificar las zonas donde se puede generar potencialmente dicho proceso, además de sectorizar las áreas donde se hace necesario la realización de estudios específicos, como el de la salud ambiental de los cuerpos de agua, el cual está directamente vinculado con los tiempos de residencia y las dosificaciones de metales y metaloides acumulados, en función de la naturaleza contaminante del residuo sólido en suspensión hídrica.

Este Mapa de Susceptibilidad permite planificar, asertivamente, las acciones para inhibir el aporte de sustancias peligrosas y el inicio potencial de reacciones químicas adversas, espontáneas e inducidas, al alcanzar las concentraciones mínimas necesarias y suficientes y/o al concurrir los factores que inciden en éstas. En el caso que ocupa a esta investigación, el residuo sólido presenta minerales arcillosos accesorios del yacimiento mineral, constituido por metales: básicos, siderúrgicos, preciosos, livianos y pesados: hierro, níquel, cobre, magnesio y cobalto, entre otros. Por supuesto, la contaminación química es un impacto ambiental de interés en este

estudio, pero también lo es la afectación física, esto es la colmatación y la pérdida del cauce, con el consecuente desbordamiento de los aludes torrenciales.

5 GEOGRAFÍA FÍSICA

En este apartado se presenta información necesaria para el estudio de las condiciones físico naturales en las subcuencas Tiara, Mesia, Paito y Cagua, que incluye al área de estudio, a través del análisis de: relieve, morfometría de las subcuencas, red de drenaje, suelos, cobertura vegetal y usos del suelo, además de los procesos climatológicos e hidrometeorológicos, que condicionan la ocurrencia de la erosión hídrica y su consecuente transporte de sedimentos.

5.1 RELIEVE

La zona de estudio se encuentra localizada dentro de una estribación montañosa de la Serranía del Interior, en la cual se realizó el análisis descriptivo de las diversas formas topográficas, que permitió establecer la organización general del área de estudio, siguiendo los criterios físicos y geométricos. El relieve fue dividido en dos unidades topográficas; por una parte, se encuentra la unidad de relieve alto, dividida a su vez en dos subunidades: filas altas ubicadas hacia la zona norte y central, y cerros medios ubicados hacia el noroeste y suroeste. Por otro lado, la segunda unidad topográfica se corresponde a los valles intramontinos.

Unidad de relieve alto

En elevación sobre el nivel del mar (en adelante, msnm), esta unidad destaca de toda la región, ocupando aproximadamente un 70% del área de estudio; se caracteriza por presentar la topografía más elevada con alturas que sobrepasan los 1.000 msnm. Abarca la región que se extiende desde los Naranjos, al oeste, hasta el Picacho al este, y desde el Cedral, al norte, hasta Loma de Hierro.

Sub-unidad I: Filas altas

Este grupo de filas se sitúa en la zona norcentral de la región y se destaca por presentar las mayores alturas, con una orientación preferencial N65°E, de pendientes moderadas y pronunciadas, y líneas de cresta agudas. Las diversas formas topográficas encontradas son:

Fila Los Tres Palos: se encuentra localizada hacia el sur del pueblo Los Naranjos, con cotas hasta de 1.500 msnm; con orientación N65°E, donde las laderas son simétricas, con pendientes muy abruptas y estribaciones drenadas por los afluentes del río Paito. El patrón de drenaje no varía en sus laderas, presentando una geometría semi paralela en dirección sureste-suroeste.

Fila El Paito: ubicada hacia el este de la fila Los Tres Palos, hacia el sur del pueblo Carutico, con cotas mayores a 1.450 msnm. Presenta laderas simétricas y pendientes abruptas; se encuentra drenada por los afluentes de la cuenca Paito, con un patrón subparalelo.

Fila Albarico: se sitúa en la quebrada la Florida, hacia el sur del pueblo la Horqueta y Norte de La Florida, con cotas hasta 1.280 msnm. Su orientación aproximada es N60°E; las laderas son simétricas, bastante estribadas por los afluentes del río Cagua, cuyo patrón de drenaje es paralelo y subparalelo.

Cerro Jabonera: se localiza al este de la población La Horqueta y al sur de Cedra-lito, con alturas mayores a los 1.300 msnm. Sus laderas son asimétricas, mientras que las pendientes tienden a ser medianamente pronunciadas; presenta estribaciones debido a la presencia de drenajes paralelos del río Cagua y dendríticos del río Paito.

Montaña de Agua Amarilla: se sitúa al norte de la fila de Loma de Hierro, con cotas superiores a los 1.300 msnm. Se encuentra en sentido N65°E con laderas simétricas y pendientes muy pronunciadas; drenado por los afluentes de los ríos Cagua y Paito en sus dos laderas, cuyo patrón es rectilíneo semi paralelo.

Fila Loma de Hierro: se sitúa hacia la parte central, se caracteriza por su tope amesetado, tiene una línea de cresta alargada en sentido E-NE, con cotas hasta de 1.300 msnm, laderas asimétricas y pendientes mayormente pronunciadas hacia el flanco sur. El drenaje varía de una ladera a otra; hacia la ladera sur se encuentra drenada por los afluentes de los ríos Mesia y Tiara, por un patrón dendrítico entallado, en sentido sureste. La ladera norte muestra un drenaje rectilíneo semi paralelo, en sentido noroeste, correspondiente a los afluentes de las subcuencas Cagua y Paito.

Sub-unidad 2: Filas y cerros medios

Filas Papelón y La Macanilla: se ubican al noreste-este, donde se localiza el pueblo del Picacho. Las filas presentan una línea de cresta en forma arqueada, con cotas hasta los 1.160 msnm, con laderas asimétricas y pendientes pronunciadas. Se encuentran drenadas por los afluentes de los ríos Cagua y Mesia, con patrones sub paralelos en su flanco sur y dendríticos en el norte.

Fila Santa Elena: se localiza al sureste de la localidad de Corocito, con alturas de 1.140 msnm. La fila presenta una línea de cresta alargada e irregular, y laderas asimétricas. Se encuentra drenada por los tributarios del río Mesia, los cuales presentan patrones paralelos, debido a la fuerte inclinación de la pendiente.

Cerros Medios: se encuentran ubicados al suroeste, próximos a los pueblos Pao Zarate y El Rodeo, mientras que al sureste son cercanos a Corocito. Está constituido por un grupo de cerros sin ninguna orientación preferencial, con laderas asimétricas de pendientes moderadas al norte y, al sur, abrupta. Los cerros Ceibito, El Castaño y El Tigre, presentan alturas promedio de 750 msnm y están drenados por los afluentes de los ríos Paito y Tiara, con un patrón dominante del tipo dendrítico. Por otro lado, los cerros San Andrés y Mesia presentan alturas hasta los 900 msnm, y se hallan drenados por los tributarios correspondientes al río Mesia, cuyo patrón de drenaje es del tipo paralelo y sub paralelo.

Unidad de relieve bajo

Ésta ocupa un 30% del área de estudio aproximadamente, con cotas desde los 320 hasta los 600 msnm. Como se observa en la Figura 5.1, se encuentra constituida por los valles intramontinos, estos están distribuidos entre las filas con vertientes de pendientes fuertes. Dentro de esta unidad desembocan los cuatro (4) ríos principales de la región, siendo el río Mesia el de mayor extensión, con comienzo al sur de la fila de Loma de Hierro.

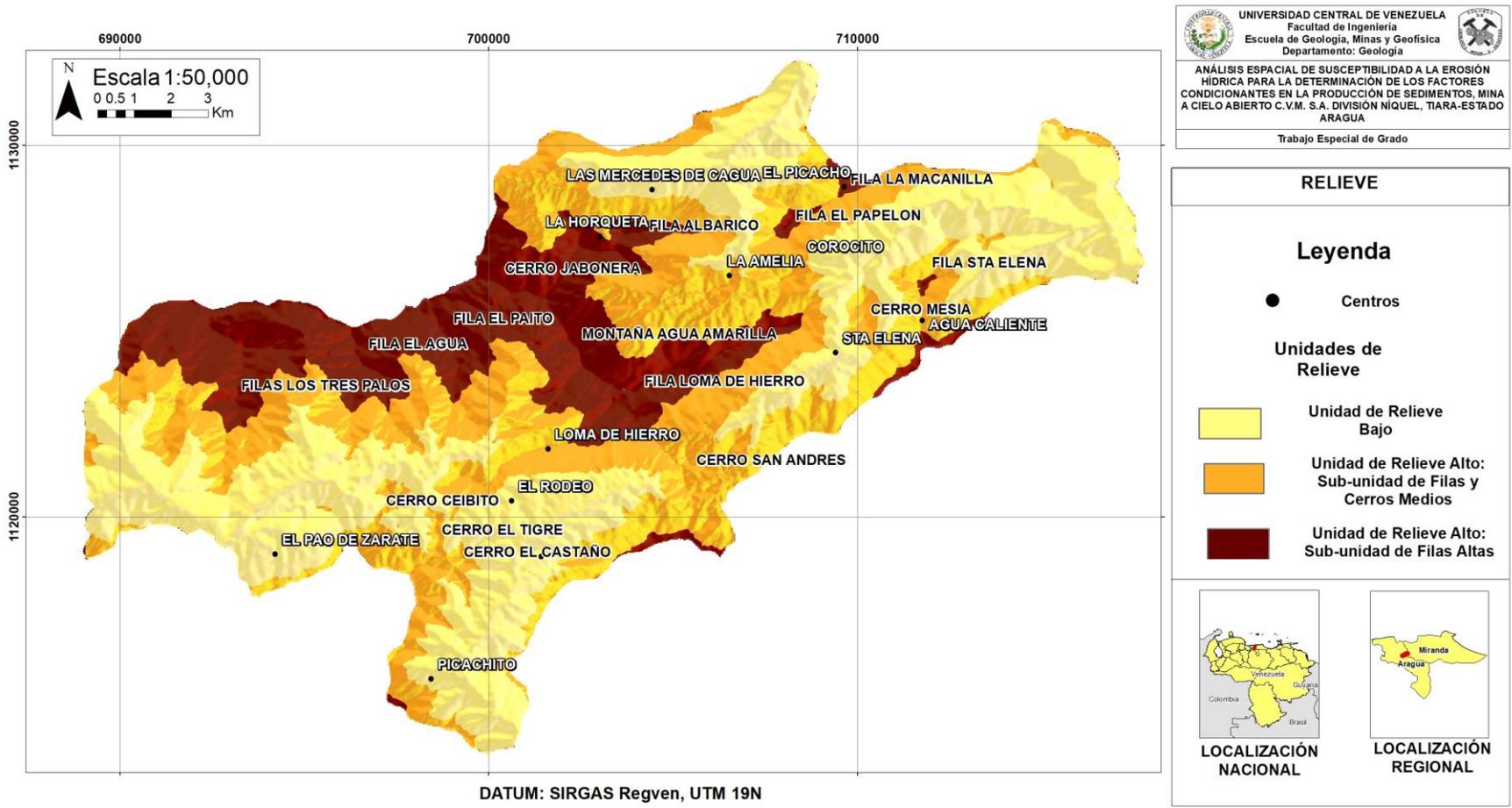


Figura 5.1. Mapa con las unidades de relieve características de la zona de estudio.

5.2 MORFOMETRÍA DE LAS SUBCUENCAS

La morfometría implica describir los parámetros de: elevaciones topográficas, superficies, longitudes y pendientes, correspondientes a las distintas subcuencas de la zona de estudio. Además, involucra el análisis de estos parámetros, a partir de las propuestas de autores como Horton (1932) y Miller (1953), para calcular la Relación de Forma (Índice de Gravelius), la Razón de Circularidad y el Índice de Compacidad.

5.2.1 Subcuenca Tiara

La subcuenca Tiara abarca una superficie de 36,25 Km², siendo su cota máxima de 1.357,04 msnm y mínima de 531,45 msnm. La pendiente media de la subcuenca es 29,29 %, mientras que la pendiente media del río Tiara es de 3%. Dichos rasgos morfométricos permiten un aumento en la energía de la movilización y transporte de sedimentos, correspondiéndose según las características cualitativas a un relieve accidentado, según Pérez (1979), en donde se presenta mayor velocidad de las aguas y capacidad erosiva.

Como se reporta en la Tabla 5.1, en la subcuenca del río Tiara, el Factor de Forma (0,37) indica una geometría ligeramente alargada, según Pérez (1979), siendo menos sujeta a concentrar el escurrimiento superficial, debido a que el tiempo de viaje del agua es mucho más largo, y por ende, los picos de crecidas son menos súbitos en casos de lluvias concentradas. En cuanto al Coeficiente de Compacidad (1,34) la clasifica como oval redonda a oval-oblonga, es decir, ocasionando retrasos en la concentración de volúmenes de agua de escurrimiento. Y en cuanto al Coeficiente de Circularidad de Miller (0,50) con una forma ovalada, es indicativa de una producción de caudales altos, mientras que la susceptibilidad ante los eventos potenciales de crecientes es baja.

Tabla 5.1. Resultados de las características morfométricas de la subcuenca Tiara.

Área (Km ²)	Perímetro (Km)	∑ Drenajes (Km)	Longitud Cauce principal (Km)	Índice de Gravelius	Factor Forma	Índice de Miller	Pendiente Media (%)
36,25	29,89	2,18	13,39	1,343	0,37	0,50	29,29

5.2.2 Subcuenca Mesia

La subcuenca Mesia abarca una superficie de 58,59 Km², siendo su cota máxima de 1.383,74 msnm y mínima de 318,22 msnm. La pendiente media de la subcuenca es 12,98 %, mientras que la pendiente media del río Mesia es de 2,9%. Esto es indicativo de una baja velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua, por lo cual la capacidad de arrastre de sedimentos es menor.

Como se reporta en la Tabla 5.2, en la subcuenca del río Mesia, el Factor de Forma (0,27) indica una geometría alargada, por lo que su tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa es baja. En cuanto al Coeficiente de Compacidad (1,63) la clasifica como oval oblonga a rectangular oblonga, es decir, su capacidad para retener volúmenes de agua de esorrentía es bajo. Y en cuanto al Coeficiente de Circularidad de Miller (0,37) con una forma ovalada, es indicativa de una producción de caudales altos y potencial a crecientes moderado.

Tabla 5.2. Resultados de las características morfométricas de la subcuenca Mesia.

Área (Km ²)	Perímetro (Km)	∑ Drenajes (Km)	Longitud Cauce principal (Km)	Índice de Gravelius	Factor Forma	Índice de Miller	Pendiente Media (%)
58,59	44,57	2,06	22,91	1,63	0,27	0,37	12,98

5.2.3 Subcuenca Paito

La subcuenca Paito abarca una superficie de 80,42 Km²; siendo su cota máxima de 1.617,05 msnm y mínima de 545,36 msnm. La pendiente media de la subcuenca es 20,17 %, mientras que la pendiente media del río es de 4,9%. Dichas características morfométricas explican un comportamiento de gran energía correspondiente al relieve accidentado, según las características cualitativas de Pérez (1979), permitiendo así que el desplazamiento y transporte de sedimentos sea rápido, además de tener capacidad erosiva alta, puesto que en zonas de alta pendiente son más ocurrentes los problemas de erosión producto de la energía cinética.

Como se reporta en la Tabla 5.3, en la subcuenca del río Paito, el Factor de Forma (0,58) indica una geometría ligeramente ensanchada, lo cual implica que la concentración del escurrimiento de una lluvia intensa es alta, debido a que tiene menor tiempo de concentración, y por lo tanto mayor rapidez para la concentración

de las aguas superficiales, contribuyendo a que los picos de crecidas sean violentos. En cuanto al Coeficiente de Compacidad (1,35) la clasifica como oval redonda a oval-oblonga, es decir, presenta una mayor rapidez para concentrar volúmenes de agua de escurrimiento. Y en cuanto al Coeficiente de Circularidad de Miller (0,53) con una forma oval, siendo ésta una geometría similar a un círculo, por lo que su potencial a la generación de crecientes es alto, mientras que su producción de caudales es baja.

Tabla 5.3. Resultados de las características morfométricas de la subcuenca Paito.

Área (Km ²)	Perímetro (Km)	∑ Drenajes (Km)	Longitud Cauce principal (Km)	Índice de Gravelius	Factor Forma	Índice de Miller	Pendiente Media (%)
80,42	43,54	2,08	15,07	1,359	0,58	0,53	20,17

5.2.4 Subcuenca Cagua

La subcuenca Cagua abarca una superficie de 50,04 Km², con una cota máxima de 1.401,98 msnm y mínima de 412,71msnm. La pendiente media de la subcuenca es 31,08 %, mientras que la pendiente media del río es de 6,3%, siendo la cuenca con la pendiente más pronunciada, correspondiéndose a una topografía accidentada, según Pérez (1979). Estos parámetros morfométricos permiten que la posibilidad de generar crecidas sea mayor, además de la capacidad de transporte de sedimentos del río pueda presentar una respuesta más rápida, debido a que se incrementan en cuencas que presentan valores altos de pendientes.

Como se reporta en la Tabla 5.4, en la subcuenca del río Cagua, el Factor de Forma (0,50) indica una geometría ligeramente ensanchada, por lo que su tendencia a concentrar el escurrimiento de las aguas de lluvias es alta. En cuanto al Coeficiente de Compacidad (1,30) la clasifica como oval redonda a oval-oblonga, es decir, presenta una mayor rapidez para concentrar volúmenes de agua de escurrimiento. Y en cuanto al Coeficiente de Circularidad de Miller (0,58) con una forma oval, siendo susceptible a crecientes como eventos potenciales, mientras que la producción sostenida de caudales es moderada.

Tabla 5.4. Resultados de las características morfométricas de la subcuenca Cagua.

Área (Km ²)	Perímetro (Km)	∑ Drenajes (Km)	Longitud Cauce principal (Km)	Índice de Gravelius	Factor Forma	Índice de Miller	Pendiente Media (%)
50,04	32,96	2,12	12,56	1,304	0,50	0,58	31,8

5.2.5 Tiempo de Concentración

En general, los tiempos de concentración para cada una de las cuatro (4) subcuenca se obtuvieron a través de la fórmula propuesta por Kirpich (1942). Como se muestra en la Tabla 5.5, el mayor tiempo de concentración lo presenta la subcuenca del río Mesia, siendo su valor de 2,87 horas; esto es debido a sus características como la pendiente del cauce que es de 2,9 %, al Factor de Forma y los Coeficientes de Circularidad y Compacidad, los cuales contribuyen a que el recorrido de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente tarde más en llegar, desde la parte más alta de la subcuenca, hasta la desembocadura de la misma. El caso contrario ocurre con la subcuenca del río Cagua, la cual tiene un Tiempo de Concentración de 1,34 horas, por lo que el agua, proveniente de las lluvias, tarda menos en llegar a la parte más baja de la subcuenca, debido a que la pendiente del cauce es más pronunciada, de 6,3%.

Por otro lado, las subcuencas de los ríos Tiara y Paito presentan un Tiempo de Concentración de 1,87 y 1,7 horas, respectivamente, siendo en este caso, 4,9% la pendiente del cauce del río Paito y 3% la del río Tiara.

Tabla 5.5. Tiempos de concentración, calculados a partir de la fórmula de Kirpich (1942).

Cuenca	Longitud del cauce (km)	Pendiente promedio del cauce (m/m)	Tiempo de concentración (horas)
Mesia	22,91	0,029	2,87
Tiara	13,39	0,03	1,87
Paito	15,07	0,049	1,7
Cagua	12,56	0,063	1,34

Los resultados anteriores fueron corroborados a través del cálculo de Tiempo de Concentración propuesto, por *California Pulvert Practice* (1942), con los cuales se consideran: la longitud del cauce principal de la subcuenca y la diferencia entre las cotas, máxima y mínima, de la misma.

Como se reporta en la Tabla 5.6, nuevamente, la subcuenca del río Mesía presentó el valor de concentración más alto, debido a que la pendiente media es de 12,98%. Por el contrario, la subcuenca del río Cagua tiene un valor de 1,24 horas, con una pendiente media de 31,79%, correspondiente a un relieve escarpado, por lo cual el recorrido del agua de lluvia que escurre demorará menos en llegar, desde la parte más alta de la subcuenca hasta la desembocadura de la misma.

Tabla 5.6. Tiempos de concentración, calculados a partir de la fórmula de California Pulvert Practice (1942).

Cuenca	Longitud del cauce (km)	DA (cota máx – cota mín) (metros)	Tiempo de concentración (horas)
Mesía	22,91	1.065,52	2,05
Tiara	13,39	825,59	1,43
Paito	15,07	1.071,69	1,48
Cagua	12,56	989,27	1,24

5.2.6 Equilibrio y Maduración de las subcuencas

El equilibrio dinámico y maduración de las subcuencas, se estimó mediante la representación de la curva hipsométrica en función de la altura relativa. En la Figura.5.2, se muestran las curvas características de las subcuencas Mesía, Tiara, Paito y Cagua, con éstas es posible señalar que se encuentran entre la fase de equilibrio relativo o de madurez, representando una actividad erosiva media, en donde el transporte de agua y sedimentos se registra en la misma proporción.

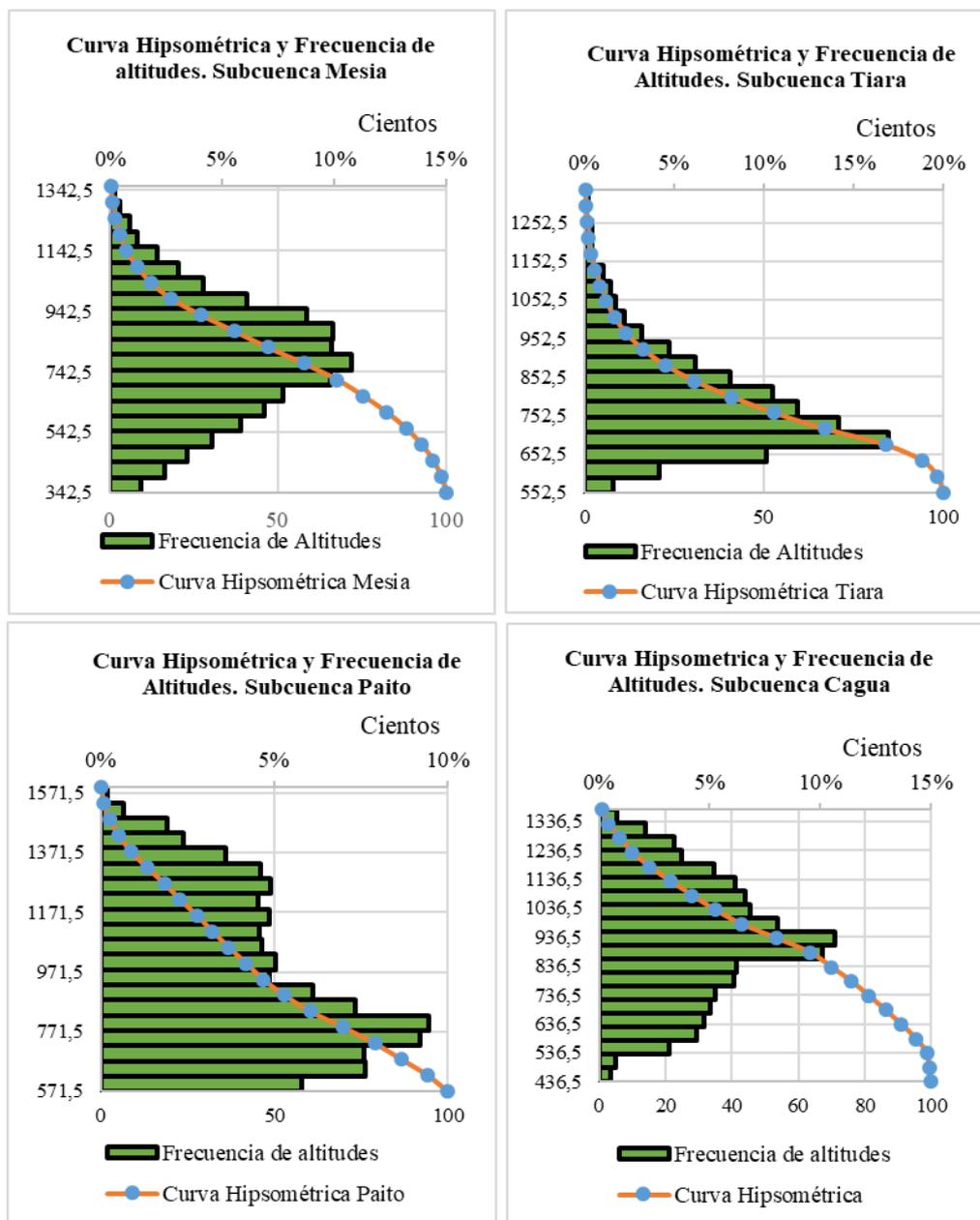


Figura.5.2. Representación de las curvas hipsométricas de las subcuencas en función de la frecuencia de altitudes.

5.3 RED DE DRENAJE

Según Llamas (1993), la red de drenaje implica describir el arreglo de los canales que conducen las corrientes dentro de una cuenca, integrada por un río principal y sus tributarios, cuyas ramificaciones se extienden hacia la parte más alta de la cuenca. El cálculo y análisis de los parámetros como: el orden de los cauces, la

densidad de drenaje, la longitud de los tributarios y la razón de bifurcación, se realizó a partir de la propuesta de autores como Horton (1945) y Suárez (2011).

5.3.1 Subcuenca Tiara

Como se reporta en la Tabla 5.7, la subcuenca del río Tiara, presenta corrientes, hasta de orden cuatro (4), siendo su valor de densidad de 2,18 km/km²; el patrón dominante es del tipo dendrítico y subparalelo, como el observado en la Figura 5.3. Estas formas de drenaje se desarrollan por diferentes controles, como las pendientes moderadas, la poca cubierta vegetal, además de ser rocas con baja permeabilidad y estar litológicamente alteradas.

Tabla 5.7. Valores de longitudes de corrientes y densidad de drenaje de la subcuenca Tiara, con su razón de bifurcación.

Cuenca	Área (km ²)	Orden	Longitud de los cauces (km)	Razón de bifurcación (Rb)	Densidad de drenaje (km/km ²)
Tiara	36,25	1	44,55	2,236	79,12/36,25
		2	19,92	2,817	
		3	7,07	0,923	
		4	7,58	Total = 5,986	
		Total	79,12	Promedio= 1,995	2,18

La dinámica de la red hídrica permitió establecer el patrón de los cursos naturales y su densidad. El drenaje más abundante se encuentra hacia la parte alta de la subcuenca, donde afloran las rocas máficas (Gabro de Loma de Níquel y el Basalto de Tiara), pudiendo ser indicativo de la baja permeabilidad de las litologías, donde se presenta un patrón dendrítico. La vegetación en la zona es baja, además de encontrarse actividad antrópica, correspondiente a los asentamientos urbanos de la población de Tiara.

Por otro lado, también aflora la Peridotita de Loma de Níquel, la cual muestra menor densidad de drenajes, debido a que su grado de fracturamiento tiene mayor permeabilidad, permitiendo así que el agua pueda infiltrarse, y consecuentemente, alterar su composición química. De acuerdo con la cobertura vegetal, ésta es muy baja, dado que el suelo residual no resulta favorable para el desarrollo de plantas autóctonas y/o cultivos seleccionados antrópicamente.

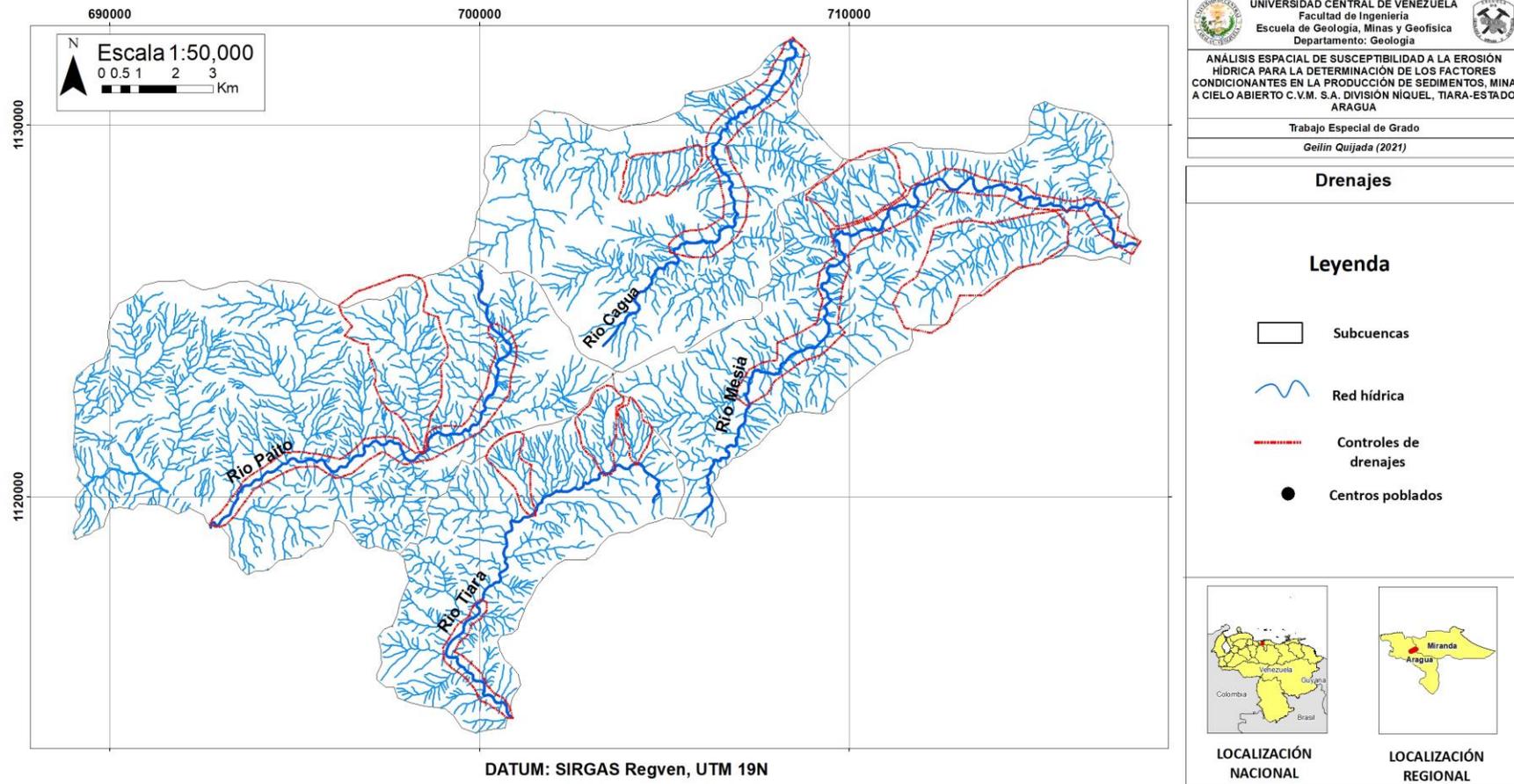


Figura 5.3. Mapa con los patrones de drenajes característicos de las subcuencas Tiara, Mesia, Cagua y Paito.

En la Figura 5.4, se observa hacia la parte media de la subcuenca, en las Filitas de Paracotos, con una densidad moderada de drenajes; el patrón es dendrítico y angular. Con respecto a la vegetación, ésta es muy baja, y también perturbada por las actividades humanas. Asimismo, hacia la parte baja de la subcuenca, se encuentran las rocas Volcanosedimentarias del río Guare y las Metatobas del Caño y el chino de Villa de Cura, con patrones de drenajes del tipo dendrítico y paralelo, de densidad moderada.

La subcuenca Tiara presenta una razón de bifurcación de 1,99, valor que se puede considerar bajo, si se considera que Strahler (1977), plantea que la razón de bifurcación tiende a estar entre 3 y 5. Según Sánchez (1991), este valor se relaciona a una subcuenca bien drenada, con un tiempo de concentración de las aguas fluviales menor, y por ende una concentración más rápida del agua, siendo ésta propensa a generar crecidas más violentas.

5.3.2 Subcuenca Mesia

La subcuenca del río Mesia presenta corrientes de orden cuatro (4). El patrón de drenaje dominante es del tipo dendrítico y paralelo, los cuales están controlados por las condiciones topográficas, de pendientes muy pronunciadas, y estructurales que se reflejan en el cambio brusco del cauce y los tributarios, además de las características litológicas de la zona, como fue mostrado en la Figura 5.3. Las unidades dominantes son las Peridotitas de Loma de Níquel y el Gabro de Mesia, correspondiente al Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro.

Como se reporta en la Tabla 5.8, el valor de densidad es de 2,06 km/km², correspondiente a una subcuenca bien drenada. La mayor cantidad de drenajes se presenta hacia la parte alta y media de la subcuenca (Figura 5.4), en donde se encuentran las rocas básicas (Gabro de Loma de Níquel y el Basalto de Tiara), con patrones de drenaje del tipo dendrítico, condicionados por la baja permeabilidad de las mismas.

Tabla 5.8. Valores de longitudes de corrientes y densidad de drenaje de la subcuenca Mesia, con su razón de bifurcación.

Cuenca	Área (km ²)	Orden	Longitud de los cauces (km)	Razón de bifurcación (Rb)	Densidad de drenaje (km/km ²)
Mesia	58,59	1	65,7	2,83	120,98/58,9
		2	23,21	1,71	
		3	13,53	0,729	
		4	18,54	Total = 5,275	
		Total	120,98	Promedio = 2,63	2,06

Se observan controles estructurales sobre los drenajes que discurren principalmente hacia el sureste.

La densidad de la vegetación es escasa debido a la intervención antrópica, como la construcción vial, la actividad minera y los asentamientos urbanos. Por otra parte, las rocas ultrabásicas (Peridotita de Loma de Níquel) presentan una menor densidad de drenajes, ya que son más permeables, y, por ende, menos resistentes al proceso de erosión hídrica. Razón por la cual sus minerales son alterados con mayor facilidad debido al avance de la meteorización química, a través de las fracturas, siendo el patrón del drenaje del tipo dendrítico rectangular.

Hacia la parte baja de la subcuenca, aflora el Esquito de Tinapú, el cual presenta drenajes espaciados, con un patrón del tipo dendrítico y paralelo, siendo éste último condicionado por la topografía de la zona, ya que se encuentran sobre pendientes abruptas.

Por otra parte, el Gneis de la Aguadita y el Gneis Tonalítico de Curiepe, presentan un patrón de drenaje dendrítico con tributarios cortos.

La subcuenca Mesia presenta una razón de bifurcación de 2,63, valor que se puede considerar medio, lo cual es indicativo de un drenaje eficiente, con un tiempo de concentración de las aguas fluviales mayor, y por ende una concentración más lenta del agua, siendo ésta menos propensa a generar crecidas violentas.

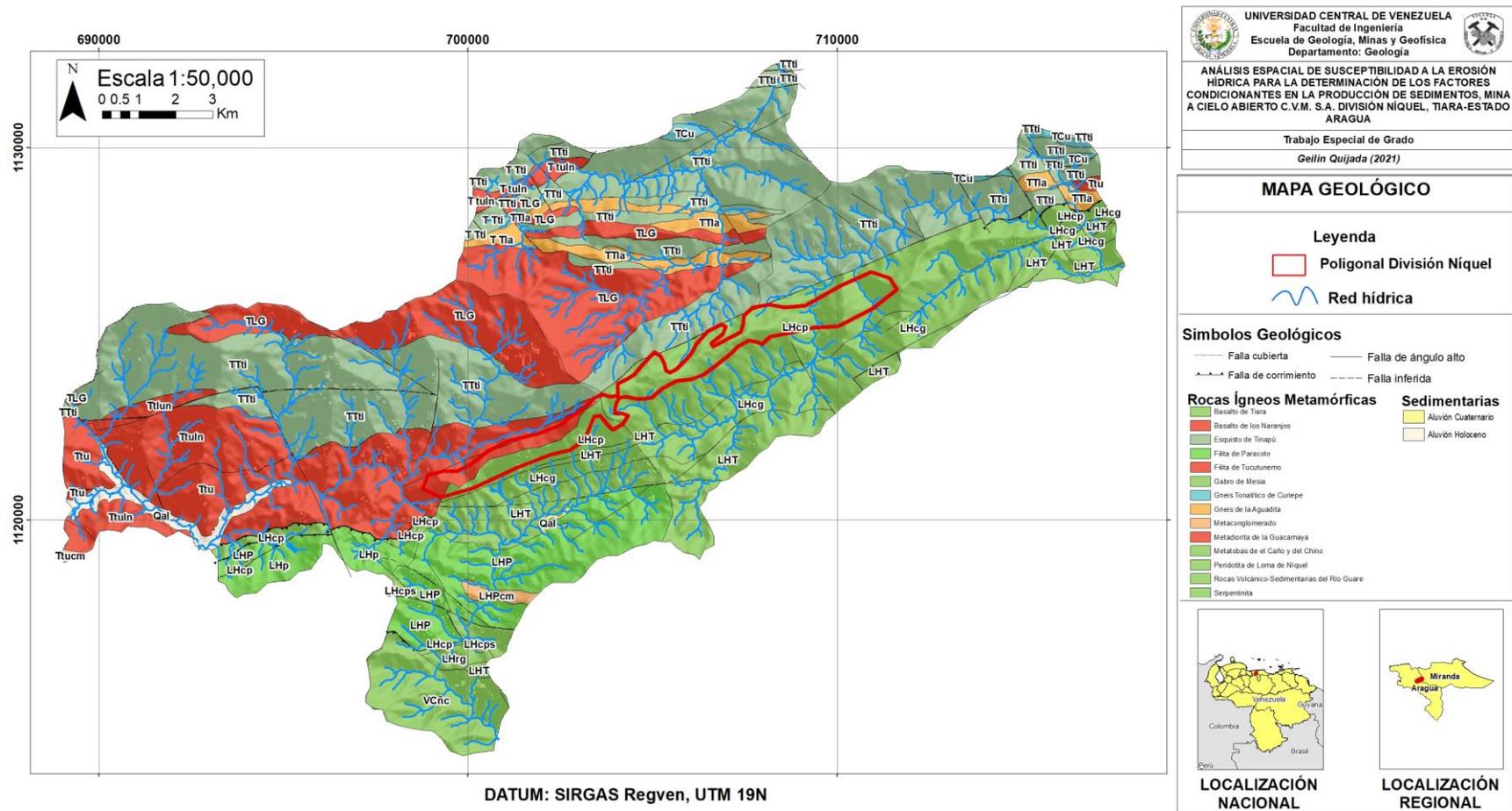


Figura 5.4. Representación del mapa geológico del área de estudio.

5.3.3 Subcuenca Paito

La subcuenca del río Paito presenta corrientes de orden cinco (5). El patrón dominante de la red hídrica es dendrítico; el mismo se halla controlado por las condiciones estructurales, geológicas y topográficas. Sin embargo, este último control es el más importante, ya que predominan las pendientes pronunciadas y, por esta razón, se generan drenajes fuertemente erosivos, como fue mostrado en la Figura 5.3.

Como se reporta en la Tabla 5.9, el valor de densidad de drenaje es de 2,08 km/km², correspondiente a una subcuenca bien drenada. La mayor abundancia de las corrientes se presenta hacia las Filitas de Tucutunemo, en la cual se observa un patrón de drenaje dendrítico rectangular (Figura 5.4), con una vegetación muy escasa, mientras que el Esquito de Tinapú muestra patrones de drenajes dendríticos y paralelos, de densidad media condicionados por las pendientes abruptas de la zona.

Tabla 5.9. Valores de longitudes de corrientes y densidad de drenaje de la subcuenca Paito, con su razón de bifurcación.

Cuenca	Área (km ²)	Orden	Longitud de los cauces (km)	Razón de bifurcación (Rb)	Densidad de drenaje (km/km ²)
Paito	80,42	1	88,18	2,269	167,5/80,42
		2	38,85	1,672	
		3	23,23	1,715	
		4	13,54	3,659	
		5	3,7	Total= 9,317	
		Total	167,5	Promedio= 2,329	

Por otra parte, se presenta la Metalava Basáltica de Los Naranjos con patrones de drenaje del tipo dendrítico y paralelo, de densidad moderada. Asimismo, se encuentra La Metadiorita de La Guacamaya, con corrientes del tipo dendrítico.

La subcuenca Paito presenta una razón de bifurcación de 2,33, valor que se puede considerar bajo, al igual que la subcuenca Tiara, precedentemente estudiada, lo cual es indicativo de una torrencialidad alta, siendo propensa a crecidas más violentas.

5.3.4 Subcuenca Cagua

La subcuenca del río Cagua presenta corrientes de orden cinco (5). El tipo drenaje dominante es el paralelo y subparalelo; éste se encuentra controlado por las condiciones estructurales, litológicas y topográficas, aunque es este último el factor con mayor importancia, debido a que se presentan pendientes bastante pronunciadas, las cuales generan diversos tributarios erosivos, como los observados en la Figura 5.3.

Como se muestra en la Tabla 5.10, el valor de la densidad del drenaje es de 2,12 km/km², correspondiente a una subcuenca bien drenada. Se observan las mayores corrientes hacia la parte baja de la cuenca, en donde aflora el Esquito de Tinapú, con patrones de drenaje de tipos dendrítico y paralelo, condicionados por las laderas abruptas en la zona (Figura 5.4). Por otro lado, se observa una cobertura vegetal escasa.

Tabla 5.10. Valores de longitudes de corrientes y densidad de drenaje de la subcuenca Cagua, con su razón de bifurcación.

Cuenca	Área (km ²)	Orden	Número de cauce (Nu)	Razón de bifurcación (Rb)	Densidad de drenaje (km/km ²)
Cagua	50,04	1	60,23	2,86	105,98/50,04
		2	21,03	3,03	
		3	6,94	0,50	
		4	13,63	3,28	
		5	4,15	Total= 9,69	
		Total	105,98	Promedio= 2,42	2,12

En cuanto a la Metadiorita de la Guacamaya y el Gneis de la Aguadita, localizadas en la parte alta y media de la cuenca, la red de drenaje muestra un patrón dendrítico; la vegetación es abundante en toda su extensión.

Con respecto a la razón de bifurcación, la subcuenca Cagua presenta un valor de 2,42 siendo indicativo de una torrencialidad alta, y con propensión a crecidas más violentas.

5.4 VEGETACIÓN

Según los estudios de impacto ambiental hecho por la empresa División Níquel, el área se encuentra constituida por dos (2) unidades ecológicas, éstas son: la sabana abierta de montaña, ubicada entre 800 y 1.300 msnm, y el bosque nublado, localizado entre 1.100 y los 1.300 msnm. Por otro lado, existe una zona de transición o ecotono que marca los límites entre estas dos unidades, el primer límite con la sabana está representado por una cobertura de herbazales, mientras que, el segundo, Bosque-Ecotono se destaca por la vegetación arbustiva (matorral).

La vegetación alta y medianamente alta, correspondientes al bosque y matorral, abarcan una superficie del 48% del área de estudio. Mientras que, existe un 51,82% de la zona cuya cobertura vegetal es baja, representada por la Sabana Abierta de Montaña, y la vegetación del tipo herbáceo.

La vegetación más baja se halla dentro del área enmarcada por la poligonal de extracción mineral, encontrándose topográficamente en laderas con pendientes moderada a alta, por lo cual las acciones de los agentes de erosión hídrica son significativas, ya que transportan y, posteriormente, depositan gran cantidad de partículas finas y gruesas, hacia las subcuencas cercanas.

Con la finalidad de generar un mapa de vegetación, se consideró la información obtenida del estudio de impacto ambiental de la empresa División Níquel, explicada anteriormente. La obtención del mapa se realizó a través del procesamiento de la imagen satelital LANDSAT 8 en el software ArcGis 10.3, donde a través de la combinación de las bandas (5,6,2) se efectuó el análisis de la vegetación en la zona de estudio. En la Figura 5.5, los tonos anaranjados brillantes se corresponden a las áreas de bosques mientras que los más claros a vegetación arbustiva (matorral), por otro lado, los tonos verdes oscuros a la vegetación de sabana y los más claros a los herbazales.

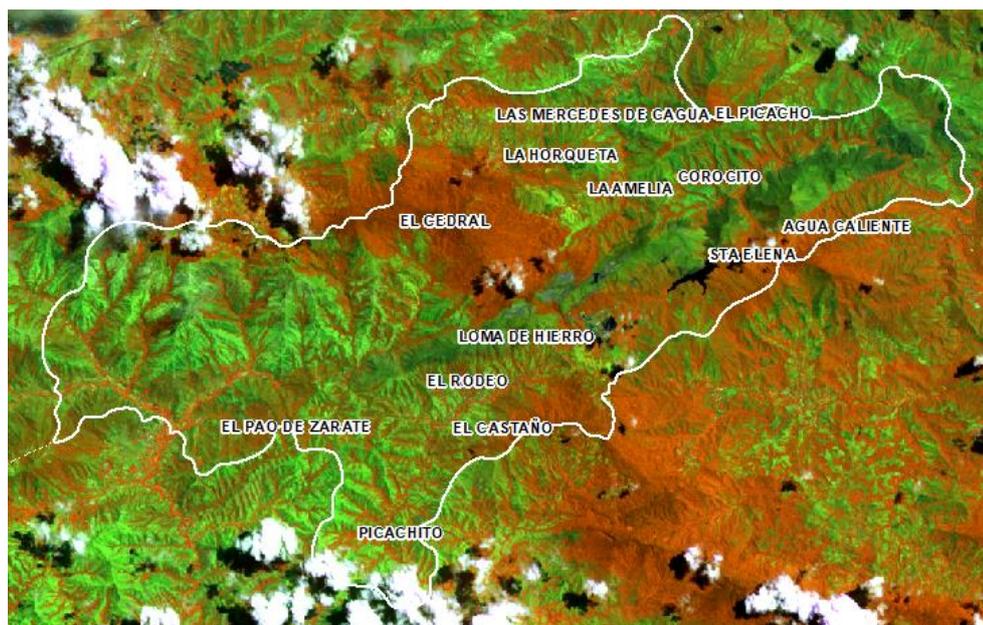


Figura 5.5. Imagen satelital con la combinación de las bandas (5,6,2) donde la vegetación de bosque y arbustiva está representada por los tonos anaranjados y la cobertura de sabana y herbazal por los tonos verdes.

Seguidamente se hizo un análisis multivariado, por medio de la clasificación supervisada. Ésta permitió clasificar el raster a través de los valores de cada pixel, creando puntos correspondientes al tipo de vegetación y asignándoles el nombre propio a cada clase. Dicha clasificación se realizó de acuerdo al tipo de vegetación observada en la imagen.

Posteriormente, se generó la firma espectral (descripción estadística de las clases que derivaron del tipo de vegetación identificada en el raster de entrada), para luego crear una imagen raster reclasificada. La Figura 5.6 muestra el raster final reclasificado con los tipos de vegetación representativas de la zona de estudio.

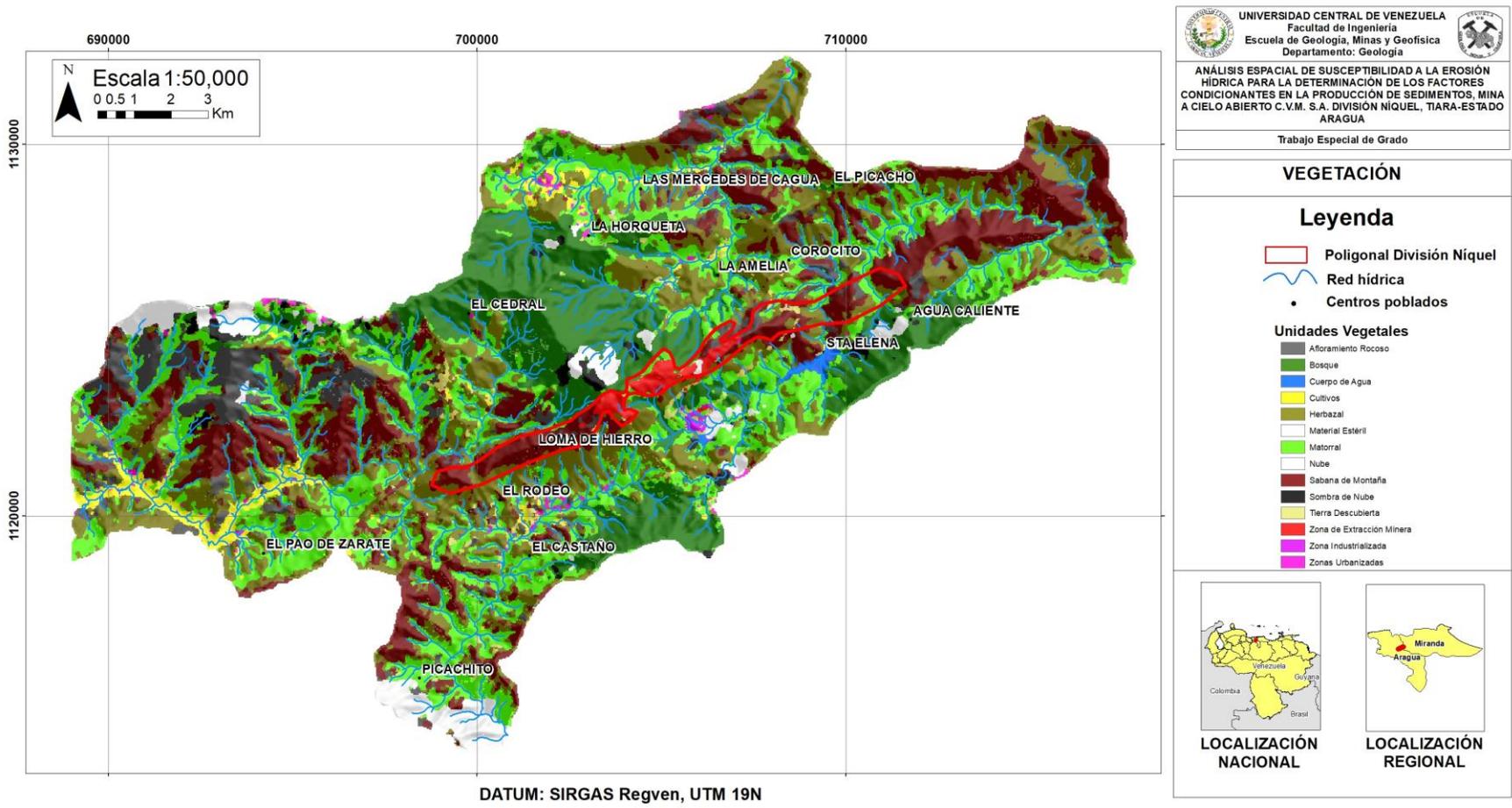


Figura 5.6. Mapa correspondiente a las unidades de vegetación del área de estudio.

5.5 SUELOS

Los procesos de meteorización en el trópico están condicionados por las temperaturas relativamente altas, la duración del proceso de intemperismo y el volumen significativo de precipitaciones. En este sentido, la elevada disponibilidad de agua es el factor más importante, ya que su percolación a través del perfil, altera a los minerales primarios a través de la meteorización química (hidrólisis, disolución, hidratación, etc.), perdiendo así la roca su integridad estructural, en un intento de alcanzar un nuevo estado de equilibrio. Los suelos encontrados en el área de estudio se han formado a partir de las rocas básicas y ultrabásicas, dando como resultado una cobertura de saprolito níquelífero que forman los suelos lateríticos.

Según Collela (1986), señala que, los suelos formados pertenecen al orden Ultisol; éstos están ubicados en el Bosque Nublado y el Ecotono, mientras que hacia la Sabana se encuentran los Inceptisoles, dentro de los dos (2) primeros, el Bosque y el Ecotono, la meteorización química en el suelo ha sido muy intensa, por lo que la fracción de tamaño 2 μm está principalmente formada por minerales arcillosos constituidos por goethita, hematita y cuarzo. En cambio, en la Sabana, los suelos son bastante jóvenes y están empezando a desarrollar sus horizontes, por lo que la pedregosidad es considerable y su profundidad efectiva es menor entre 20-50 cm.

Según AGUIRRE (2012), los valores más altos de pH son encontrados en la Sabana (6,5) y el Ecotono (5,7), debido a que el aporte de materia orgánica es menor, por el poco desarrollo de la cobertura vegetal en estas unidades; mientras que, en el Bosque Nublado los suelos presentan un valor de pH de 4,6 debido a un mayor desarrollo en la materia orgánica y la vegetación.

Estos suelos están desarrollados sobre pendientes pronunciadas y con poca cobertura vegetal en el caso de la Sabana, o en zonas desprovistas de vegetación por la acción antrópica, por lo que, los procesos de erosión hídrica laminar y en cárcavas son importantes. Dicha erosión elimina continuamente la parte superficial del terreno, transportando gran cantidad de partículas finas y gruesas hacia los ríos.

Partiendo del conocimiento de Collela (1986), sobre el orden los suelos desarrollados en la zona de estudio, se generó un mapa de tipo de suelo, a través del procesamiento de la imagen satelital LANDSAT 8 en el software ArcGis 10,3.

Mediante la combinación de las bandas (5,4,3) se identificaron las áreas con vegetación abundante (tono rojo), y las zonas con vegetación menos desarrollada (tono rosado y marrón), como se observa en la Figura 5.7. Dicho análisis se realizó, debido a que los suelos Ultisoles se desarrollan en la cobertura vegetal más abundante (Bosque Nublado y el Ecotono), mientras que los Inceptisoles en la vegetación menos densa (Sabana).

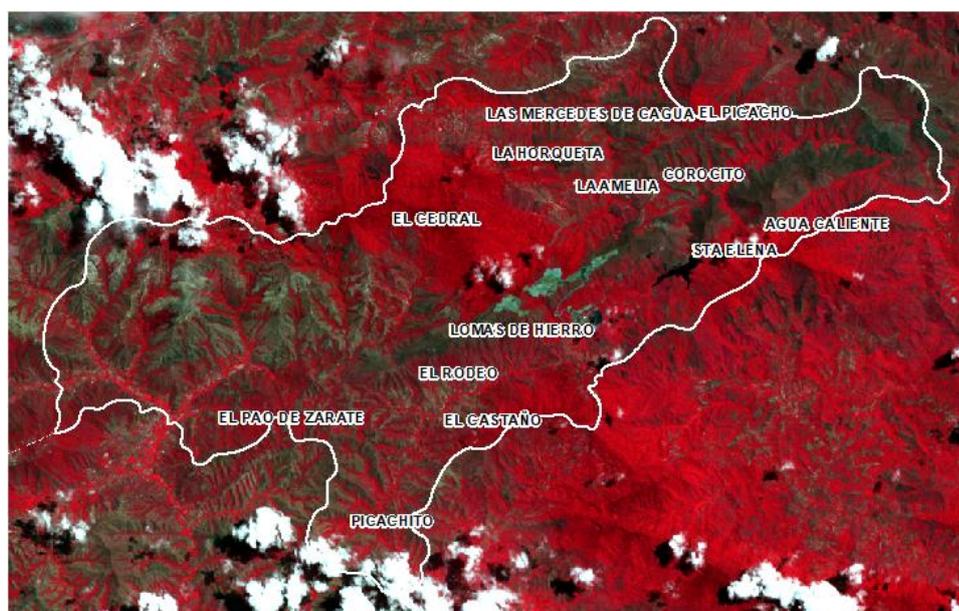


Figura 5.7. Imagen satelital con la combinación de las bandas (5,4,3) donde la vegetación más abundante está representada por los tonos rojos brillantes mientras que la menos densa por los tonos rosados y marrón.

Posteriormente se hizo un análisis multivariado, por medio de la clasificación supervisada. Ésta permitió clasificar el raster a través de los valores de cada pixel, creando puntos correspondientes al tipo de suelo y asignándoles el nombre propio a cada clase.

Seguidamente, se generó la firma espectral (descripción estadística de las clases que derivaron del tipo de suelo identificado en el raster de entrada), para luego crear una imagen raster reclasificada. La Figura 5.8 muestra el raster final reclasificado con los tipos de suelo representativos de la zona de estudio, donde los

reportados con el nombre “sin clasificar” se corresponde a los suelos intervenidos por la acción antrópica actual.

5.5.1 Propiedades del suelo

Según Aguirre (2012), los suelos del área de estudio presentan características propias, que va desde un suelo ácido (Bosque) hasta un suelo con alto contenido de metales pesados (Sabana).

A continuación, se describen sus propiedades de acuerdo su textura, contenido de materia orgánica y profundidad.

Textura

Collela (1986) señala que los suelos Inceptisoles en la Sabana son de textura franco-arcillosa, mientras que los de orden Ultisol correspondientes a la vegetación del Bosque, son pesados y su textura es arcillo limosa.

Contenido de materia orgánica

Según Aguirre (2012), los mayores valores de materia orgánica se encuentran en el Bosque con 11,2%, asociados a su cobertura vegetal. Por otro lado, en la Sabana es de 2,15%, disminuyendo en un 80%, debido a una menor cobertura vegetal.

Profundidad

La profundidad es definida como la distancia entre la superficie y la base del perfil; Collela (1986) establece que los suelos Inceptisoles, en el área de estudio, tienen una profundidad efectiva menor entre 20-50 cm, mientras que los Ultisoles son suelos profundos mayores de > 75 cm.

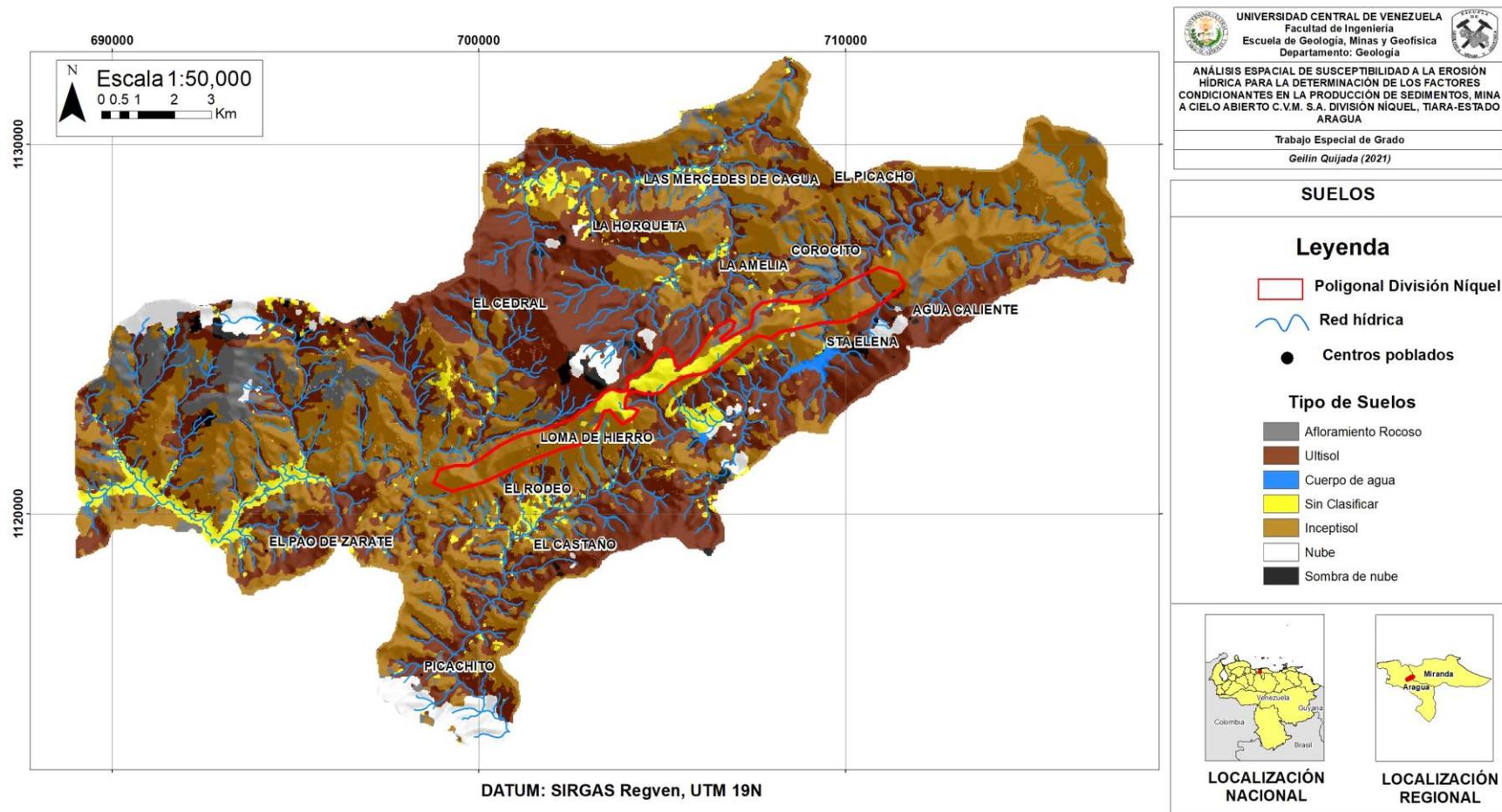


Figura 5.8. Mapa con tipos de suelos encontrados en la zona de estudio.

5.6 USO DEL SUELO

Como se explicó en el planteamiento del problema, el desarrollo de las actividades humanas, como las labores mineras, agrícolas, industriales, domésticas, entre otros usos antrópicos, han producido cambios en el paisaje de la zona de estudio, modificando las condiciones naturales de los cauces, además de encontrarse en muchos casos, en áreas de altas pendientes no aptas para estos usos, incrementando los procesos de erosión, transporte y sedimentación en las cuencas. En este sentido, dichas prácticas generan una carga considerable de partículas finas y gruesas, las cuales son acarreadas por las aguas de escorrentía y las corrientes de los cursos de agua, para finalmente ser conducidas hacia las zonas más bajas de las subcuencas; siendo gran parte de estos elementos, residuos contaminantes dañinos para los cursos de agua.

Mediante el procesamiento de la imagen satelital LANDSAT 8 en el software ArcGis 10.3, se realizó una combinación de las bandas (7,6,4) para analizar los tipos de usos del suelo en la zona de estudio. En la Figura 5.9, los tonos magentas corresponden a las áreas urbanas, cultivos, minería, mientras que la vegetación a los tonos verdes claros a verdes brillantes.



Figura 5.9. Imagen satelital con la combinación de las bandas (7,6,4) donde áreas de vegetación está representada por los tonos verdes mientras que las zonas urbanas, minería, cultivos por los tonos magentas.

Posteriormente se hizo un análisis multivariado, por medio de la clasificación supervisada. Ésta permitió clasificar el raster a través de los valores de cada pixel, creando puntos correspondientes al tipo de uso del suelo y asignándoles el nombre propio a cada clase.

Seguidamente, se generó la firma espectral (descripción estadística de las clases que derivaron del tipo de uso del suelo identificado en el raster de entrada), para luego crear una imagen raster reclasificada, como se observa en la Figura 5.10.

En la región se identificaron los siguientes usos del suelo, de acuerdo al tipo de cobertura específica:

Tabla 5.11. Usos del suelo encontrados en la zona de estudio con su correspondiente área de ocupación

Uso de Suelo	Área (Km ²)
Zona industrial	0,4509
Zona de extracción minera	1,4860
Tejido urbano discontinuo	2,7276
Tierra desnuda	5,3610
Afloramiento rocoso	14,9740
Cultivos	6,3575
Sabana de Montaña	38,1797
Herbazal	54,5276
Bosque Nublado	35,8570
Matorral	55,5633
Reservorio de agua	0,5832
Nube	7,8420
Sombra de Nube	2,4812

5.6.1 Tierras desnudas

La vegetación está poco desarrollada o ausente, debido a que sus características fisiográficas naturales, como las pendientes pronunciadas, además de la intervención antrópica, son factores desencadenantes en el desarrollo de los procesos erosivos, limitando así el crecimiento de la cobertura vegetal, como se observa en la Figura 5.10 representadas por el color marrón.

5.6.2 Afloramientos rocosos

Rocas expuestas se hallan sobre las laderas muy empinadas, como se muestra en la Figura 5.10, representadas por el color gris. Donde su inestabilidad genera volúmenes de rocas desprendidas durante los periodos más intensos de precipitaciones.

5.6.3 Vegetación

Están representadas en el mapa de usos del suelo por el color verde, como se muestra en la Figura 5.10, estas se corresponden a las coberturas vegetales naturales como el Bosque Nublado, desarrollado hacia las cimas y los valles intramontanos, y las coberturas seminatural representadas por La Sabana de Montaña, Matorral y los Herbazales, cuya intervención antrópica es de poco a ninguna.

La Sabana de Montaña se caracteriza por estar exenta de elementos arbustivos, debido a que las características edáficas donde se sitúa, presenta altas concentraciones de hierro, que desfavorecen el crecimiento de las especies vegetales.

Por otro lado, los Matorrales y Herbazales se desarrollan en áreas influenciadas anteriormente por la intervención antrópica, debido a los procesos de recuperación de cobertura vegetal. Los Herbazales se encuentran hacia las zonas bajas de montaña, mientras que, los Matorrales hacia los valles intramontanos.

5.6.4 Tejido urbano discontinuo

Se corresponde a los centros poblados como: Tiara, Santa Lucía, El Rodeo, La Esperanza, El Pao Zárate, El Castaño, representado por el color rosado, como se observa en la Figura 5.10. Estos asentamientos se deben a la presencia de elementos físico naturales favorables, dentro del área de estudio, que permiten el desarrollo de las actividades humanas, previo al desarrollo minero.

5.6.5 Zona industrial

Comprende la infraestructura industrial para el desarrollo minero División Níquel, siendo ubicada en las cercanías de la población de Tiara, como se observa en la Figura 5.10, está representada por el color morado,

5.6.6 Zona de extracción minera

En la zona de estudio, la actividad minera se enfoca en la exploración y extracción de la mena de níquel, y en la comercialización de ferroníquel. El área de afectación autorizada comprende una superficie de 2.566,32 hectáreas; dicha intervención comprende zonas de extracción mineral, además de la construcción de vías internas y de acceso, como se observa en la Figura 5.10, representada por el color rojo.

5.6.7 Cultivos

Comprenden las áreas de aprovechamiento en la producción de alimentos, a través de las actividades ganaderas y de cultivos, mostrados en la Figura 5.10, por el color amarillo.

5.6.8 Reservorio de agua

Corresponde a la presa Santa Elena, construida con el propósito de abastecer de agua a la planta de procesos de la empresa División Níquel, representada en la Figura 5.10, por el color azul.

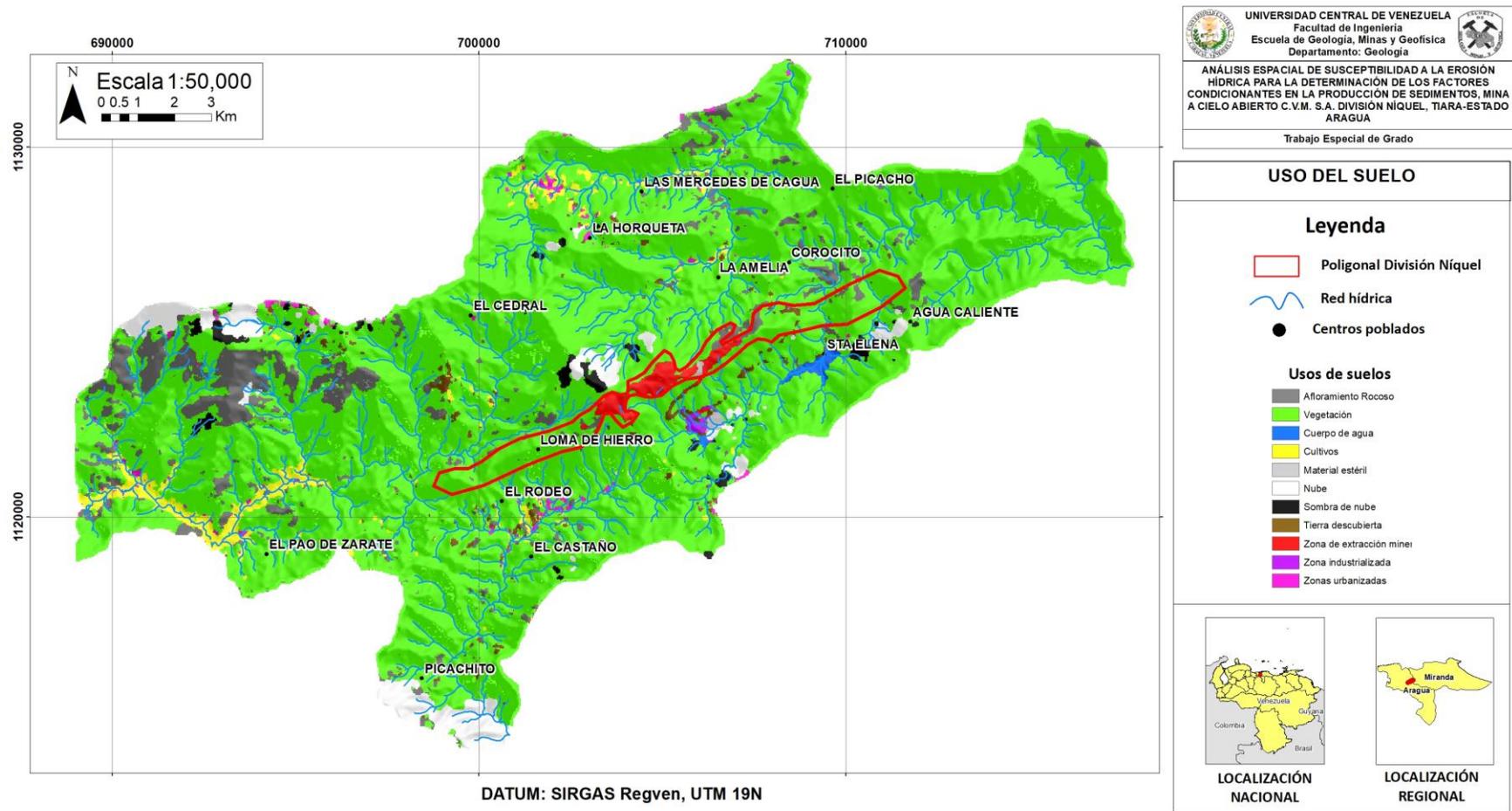


Figura 5.10. Mapa representativo de los usos del suelo en el área de estudio.

5.7 CARACTERÍSTICAS HIDROMETEOROLÓGICAS

Las características hidrometeorológicas de la región de estudio permiten conocer las condiciones climatológicas e hidrológicas, fundamentales para el análisis y gestión de los recursos hídricos.

Cabe destacar que el análisis sería realizado con mayor precisión si fuera posible contar con estaciones hidrometeorológicas mínimas pero suficientes dentro de las cuatro (4) subcuencas en estudio, para medir las variaciones climáticas que resultan en procesos de pérdida de cobertura vegetal, y causan el deterioro de la calidad ambiental, originando las alteraciones en los valores de evaporación y especialmente de evapotranspiración.

La zona de estudio se ubica en una estribación montañosa de la Serranía del Interior, con un relieve montañoso muy marcado, con cotas entre los 320-1.600 m, con un clima típico de bosque seco premontano según el estudio de impacto ambiental hecho por la empresa División Níquel, a continuación, se describen cada uno de estos parámetros:

5.7.1 Precipitación

El régimen de precipitación bimodal, caracterizado por precipitaciones anuales que oscilan entre 363,67 mm y 1.609,84 mm, siendo las lluvias más importantes y agresivas durante los meses de mayo a agosto, con un leve descenso a partir de septiembre-octubre. Por otro lado, la época de sequía se presenta desde los meses de noviembre hasta abril.

En la Tabla 5.12, se encuentran los promedios mensuales y anuales de las precipitaciones presentadas en las ocho (8) estaciones pluviométricas ubicadas en las cercanías del área de estudio, aportados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), la estación pluviométrica de Loma de Níquel, y los registros climatológicos obtenidos a partir del programa Larc-Power de la NASA.

A la serie de datos de lluvias, se le realizó el estudio estadístico para así validar y depurar los datos atípicos observados mediante los diagramas de cajas, en

cada estación. Posteriormente, estos datos anómalos fueron sustituidos por la mediana en las estaciones pluviométricas.

Finalmente, analizados y excluidos los datos anómalos, se generaron los histogramas de precipitación para cada una de las estaciones consideradas en el área de estudio; estos se detallan en los Anexos I y II. Como se observa en la Figura 5.11, el clima de la zona de estudio se caracteriza por presentar un régimen bimodal, con un periodo de lluvia entre los meses de mayo a octubre y un periodo de sequía entre los meses de noviembre a abril.

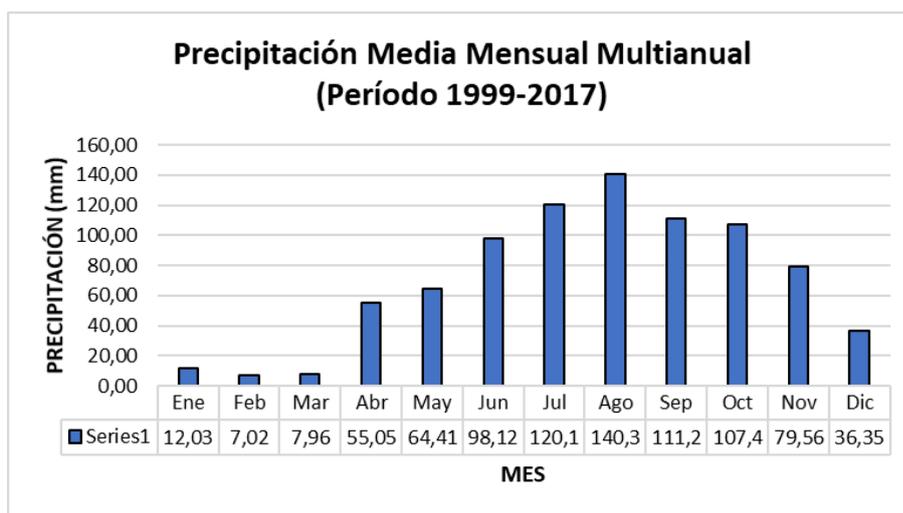


Figura 5.11. Histograma correspondiente a la Precipitación Media Mensual Multianual.

La precipitación media total multianual es de 839,77 mm/año, con máximas en el mes de agosto (250mm) y mínimas en el mes de febrero (0,133mm), como se muestra en la Figura 5.12.

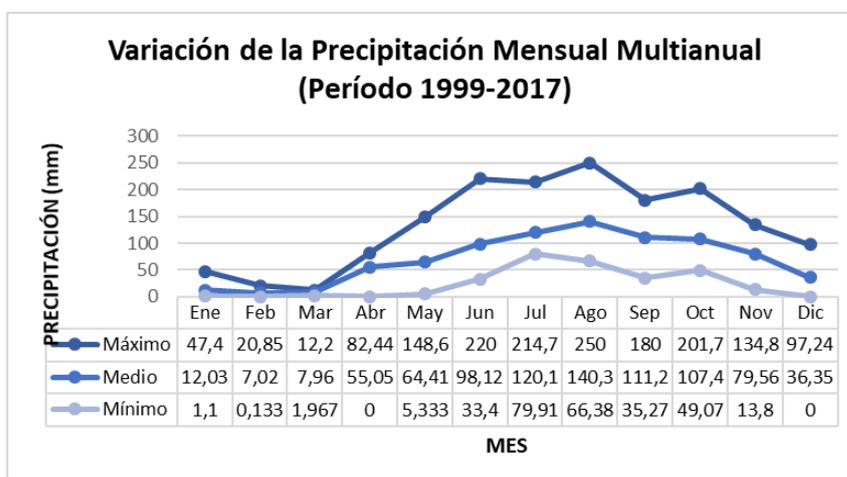


Figura 5.12. Gráfica de la variación temporal de los valores totales mensuales de precipitación en la zona de estudio.

Tabla 5.12. Datos correspondientes a las precipitaciones promedios mensuales y la precipitación anual años (1999-2017) de las estaciones ubicadas en las cercanías del área de estudio y el programa Larc-Power de la NASA.

ESTACIÓN	X	Y	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	PANUAL (mm)
Tiara	701149,4	1119.819,5	1,82	0,14	4,58	65,60	44,09	57,09	79,91	149,27	127,42	125,24	91,17	9,27	755,59
Loma de Níquel	704029,76	1122765,93	47,40	20,85	12,20	82,44	148,56	220,03	214,65	250,03	179,97	201,66	134,80	97,24	1.609,84
San Francisco de Pao	689996,4	1117236,4	1,10	0,13	1,97	55,93	38,60	72,97	81,18	147,47	124,60	97,13	53,10	32,70	706,88
San Diego de los Altos	726428,3	1114257	17,25	17,14	8,62	53,52	86,26	103,18	123,36	155,10	109,92	105,72	83,51	53,89	917,46
La Urbina Quebrada Seca	690406,7	1136763,4	1,23	1,48	6,73	61,35	54,48	82,55	139,95	66,38	76,83	91,85	89,35	32,40	704,55
El Cortijo	674382,1	1114218,1	2,20	0,47	8,13	0,00	5,33	33,40	105,60	110,40	35,27	49,07	13,80	0,00	363,67
San Sebastián de Los Reyes	701138,6	1100351,3	2,76	1,22	11,71	68,02	53,51	117,78	96,33	99,87	128,42	85,91	92,07	16,71	774,31
NASA	673042,1	1114343,2	22,47	14,75	9,76	53,52	84,46	97,97	120,18	144,53	107,75	103,18	78,69	48,63	885,88

5.7.2 Precipitación Media

Como se explicó en los marcos teórico y metodológicos, para determinar la cantidad de agua que podría entrar en el sistema hidrológico, se utilizó el método de las isoyetas mediante la realización de isolíneas, las cuales presentan precipitaciones de igual magnitud a lo largo de toda la línea. Posteriormente, dichas isolíneas fueron intersectadas con la zona de estudio y se calculó el área dibujada entre isolíneas y los límites de las cuencas. Dicho cálculo se realizó por medio del software ArcGis, en donde:

1. Se ubicaron las estaciones pluviométricas.
2. Se trazaron las isoyetas, interpolando las alturas de precipitación entre las diversas estaciones, de modo similar como se trazan las curvas de nivel. Esto se realizó a través del método de interpolación tipo Spline.
3. Se hallaron las áreas A_1, A_2, \dots, A_n entre cada dos (2) isoyetas seguidas, mediante la ecuación (1) detallada en el marco teórico:

Como se observa en la Tabla 5.13, se obtuvo un valor de precipitación media de 1.291,06 mm/año.

Tabla 5.13. Valores correspondientes a la precipitación media, mediante el método de las Isoyetas.

NÚMERO ISOYETA	Pi-1 (mm)	Pi (mm)	PROMEDIO	ÁREA (Km ²)	ÁREA*PROMEDIO (Km ²)*(mm)
1	437	623	529,83	15,94	8.445,44
2	623	826	724,51	29,97	21.713,49
3	826	1.030	928,33	38,58	35.814,80
4	1.030	1.234	1.132,10	22,44	25.404,25
5	134	1.438	785,95	16,05	12.614,56
6	1.438	1.642	1.539,75	23,21	35.737,70
7	1.642	1.845	1.743,56	30,27	52.777,52
8	1.845	2.094	1.969,88	32,75	64.513,47
9	2.049	2.191	2.120,08	15,78	33.454,86
TOTAL				224,99	290.476,10
PRECIPITACIÓN MEDIA (mm)					1.291,06

En la Figura 5.13 correspondiente al mapa de precipitación media anual, en la zona se puede apreciar claramente dos zonas diferenciadas por su pluviosidad, siendo la isoyeta 1.200 mm la que marca esta separación.

El área del yacimiento de Loma de Hierro, las comunidades de La Horqueta, y El Cedral, registran precipitaciones entre los (1.200-1600 mm). Estas aumentan hacia la zona este, en los pueblos de La Amelia, El Corocito, El Picacho llegando a ser máximas (1.800-2.000 mm), lo que hace de estas zonas potencialmente erosivas por efecto de las precipitaciones.

Hacia el oeste, dentro de las localidades el Pao Zarate, Picachito, El Castaño se registra una pluviosidad de 600 mm, en esta zona no se alcanzan precipitaciones tan elevadas como las observadas hacia el este, a causa de su menor altitud.

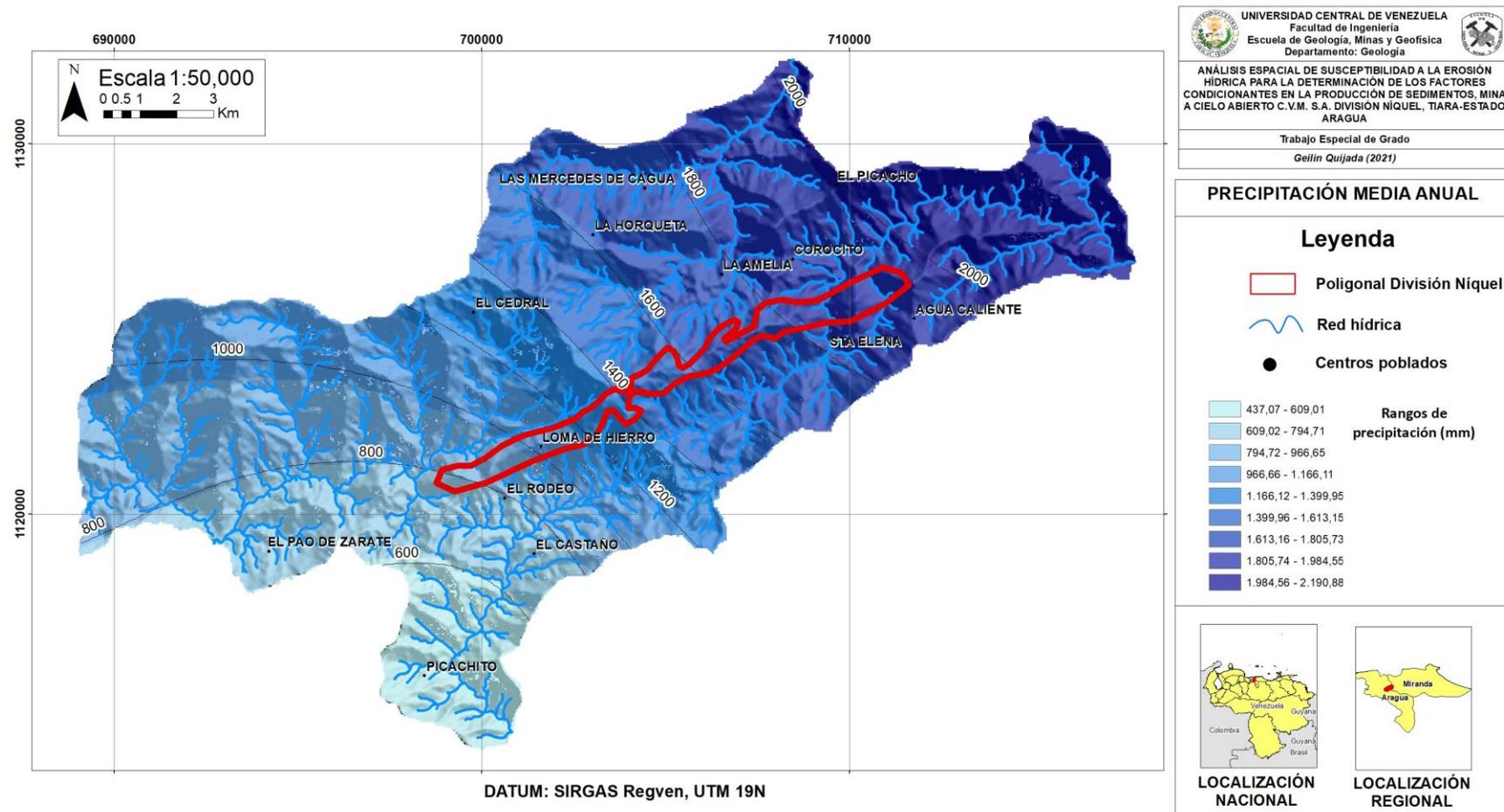


Figura 5.13. Mapa correspondiente a la Precipitación Media Anual, donde se logra observar que las mayores concentraciones de las lluvias se presentan hacia la zona central y este del área de estudio.

5.7.3 Escorrentía superficial

Para determinar la cantidad de agua que genera escorrentía (Precipitación Neta) y que parte de la precipitación queda como retención superficial o se infiltra (Abstracción), se calculó a través de la ecuación (2) presentada en el marco teórico.

En cuanto al tipo de suelo, éste se clasificó a partir de las características texturales explicadas en la sección 5.5. Por otro lado, de acuerdo a los usos del suelo detallados en el apartado 5.6, se asignó un Umbral de Escorrentía, el cual indica la capacidad de infiltración del agua, el valor del Umbral de Escorrentía (adimensional) se extrajo de acuerdo a los datos presentados en las Tabla 2.1 y Tabla 2.2 de Ferrer, F. J. (1991).

A continuación, se muestran en las Tablas 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17 los valores de Umbral de Escorrentía correspondientes de las subcuencas Paito, Tiara, Mesia y Cagua:

Tabla 5.14. Valores de umbral de escorrentía propios a los usos del suelo de la subcuenca Paito

Subcuenca	Pendiente (%)	Suelo	Tipo de suelo	Uso de Suelo	Umbral de escorrentía (Po)
Paito	20,17	C	Franco-Arcilloso	Afloramiento Rocoso	2
				Sabana de Montaña	18
				Herbazal	18
				Tierra Descubierta	8
				Cultivos	12
				Tejido Urbano Discontinuo	8
		Matorral	22		
D	Arcillo-Limoso	Bosque Nublado	23		

Tabla 5.15. Valores de umbral de escorrentía propios a los usos del suelo en la subcuenca Tiara.

Subcuenca	Pendiente (%)	Suelo	Tipo de suelo	Uso de Suelo	Umbral de escorrentía (Po)
Tiara	29,29	C	Franco-Arcilloso	Tierra Descubierta	8
				Herbazal	18
				Tejido Urbano Discontinuo	8
				Cultivos	12
				Sabana de Montaña	18
				Zona de Extracción Mineral	6
		Matorral	22		
D	Arcillo-Limoso	Bosque Nublado	23		

Tabla 5.16. Valores de umbral de escorrentía propios a los usos del suelo en la subcuenca Mesia.

Subcuenca	Pendiente (%)	Suelo	Tipo de suelo	Uso de Suelo	Umbral de escorrentía (Po)
Mesia	12,98	C	Franco-Arcilloso	Afloramiento Rocoso	2
				Sabana de montaña	18
				Herbazal	18
				Tierra Descubierta	8
				Zona de Extracción Mineral	6
				Zona Industrial	3
				Matorral	22
		Material Estéril	8		
D	Arcillo-Limoso	Bosque Nublado	23		

Tabla 5.17. Valores de umbral de escorrentía propios a los usos del suelo en la subcuenca Cagua.

Subcuenca	Pendiente (%)	Suelo	Tipo de suelo	Uso de Suelo	Umbral de escorrentía (Po)
Cagua	31,80	C	Franco-Arcilloso	Afloramiento Rocoso	2
				Sabana de Montaña/ Pastizales	18
				Herbazal	18
				Tierra Descubierta	8
				Cultivos	12
				Tejido Urbano Discontinuo	8
				Matorral	22
		D	Arcillo-Limoso	Bosque Nublado	23

Una vez obtenido el Umbral de Escorrentía (P_o), correspondiente a cada uso del suelo, se procedió al análisis de las precipitaciones a través del cálculo de la Precipitación Neta (P_n), a partir de la ecuación (2) presentada en el marco teórico, siendo ésta finalmente, la que va a formar parte de la escorrentía directa.

Dentro del uso de suelo correspondiente a Escasa Vegetación, como se observa en la Tabla 5.18, la Precipitación (ΣP) correspondiente a la primera lluvia, está por encima del Umbral de Escorrentía, razón por la cual el suelo se encuentra saturado por dicha precipitación y, por consiguiente, el agua precipitada procede a escurrir. De acuerdo con lo indicado, se pudo proceder a calcular la Precipitación Neta (P_n).

Tabla 5.18. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción para el uso del suelo correspondiente a la vegetación escasa.

Uso de Suelo	Área (m ²)	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣPn (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Espacios con escasa vegetación	536,1	8	1	9,39	9,39	0,05	0,05	9,34
			2	5,78	15,16	1,09	1,04	4,74
			3	9,49	24,66	4,90	3,81	5,68
			4	54,52	79,18	45,57	40,67	13,85
			5	62,74	141,92	103,12	57,55	5,19
			6	105,32	247,24	204,97	101,85	3,47
			7	119,36	366,60	322,62	117,64	1,72
			8	130,24	496,85	451,87	129,26	0,99
			9	128,03	624,88	579,31	127,44	0,59
			10	113,08	737,95	692,03	112,72	0,36
			11	83,02	820,97	774,85	82,82	0,20
			12	31,97	852,94	806,75	31,90	0,07

Como se observa en la Figura 5.14, en los primeros meses de lluvias escasas, correspondientes a enero, febrero y marzo, el agua comienza a retenerse en el suelo y a saturarlo, el cual debido a sus características texturales (arcilloso) forma una capa impermeable que, posteriormente, genera escorrentía superficial en los meses posteriores.

La capa vegetal también juega un papel importante, debido a que las lluvias son retenidas por éstas, y al estar el suelo desnudo, y con pendientes, de moderadas a pronunciadas, el agua escurre más fácilmente. Por consiguiente, la cantidad de Volumen de Escorrentía es significativo siendo, 432,50 m³.



Figura 5.14. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para los espacios con escasa vegetación.

Como se observa en la Tabla 5.19, respecto al uso del suelo correspondiente a la vegetación Herbazal, la Precipitación (ΣP) resultó menor al Umbral de Escorrentía en los meses de enero y febrero. En este sentido, el suelo en las primeras lluvias no se encuentra saturado debido a la protección de la cobertura vegetal, razón por la cual las Precipitaciones Acumuladas (ΣP_n) son iguales a cero. Posterior a estas lluvias, el suelo rebasa su capacidad de infiltración, por lo cual el agua comienza a escurrir, siendo la Precipitación Neta Total en el área de 753,70 mm.

Tabla 5.19. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la vegetación herbazal.

Uso de Suelo	Área m ²	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣP_n (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Herbazal	54.527	18	1	9,39	9,39	0,00	0,00	9,39
			2	5,78	15,16	0,00	0,00	5,78
			3	9,49	24,66	0,46	0,46	9,04
			4	54,52	79,18	24,76	24,30	30,22
			5	62,74	141,92	71,79	47,03	15,71
			6	105,32	247,24	164,62	92,83	12,49
			7	119,36	366,60	277,07	112,45	6,90
			8	130,24	496,85	403,09	126,02	4,23
			9	128,03	624,88	528,50	125,41	2,62
			10	113,08	737,95	639,95	111,45	1,62
			11	83,02	820,97	722,04	82,09	0,93
			12	31,97	852,94	753,70	31,65	0,31

En la Figura 5.15, se observa como en los meses de enero, febrero, marzo y abril, el agua de las lluvias consigue infiltrarse, debido a que el umbral de escorrentía es mayor con respecto a las primeras precipitaciones acumuladas. Esto permite que el suelo se sature y, por consiguiente, en los meses con mayor acumulación de precipitaciones, éste se halle sobresaturado, resultando así una escorrentía mayor y más rápida, con un volumen total de 41.096,88 m³.

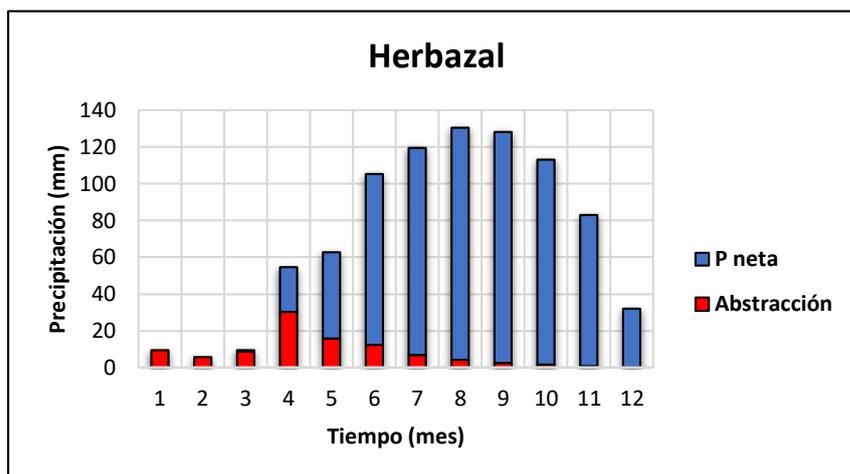


Figura 5.15. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para la vegetación Herbazal.

Como se muestra en la Tabla 5.20, en cuanto al uso del suelo correspondiente a los Cultivos, la Precipitación (ΣP) resultó ser menor al Umbral de Escorrentía en el mes de enero. Es decir, el suelo en las primeras lluvias no se encuentra saturado, razón por la cual la Precipitación Acumulada (ΣP_n), inicialmente, es igual a cero. Seguidamente, las lluvias posteriores comienzan a saturar el suelo, para finalmente rebasar su capacidad de infiltración y, en consecuencia, a escurrir el agua siendo la Precipitación Neta Total en el área de 784 mm.

Tabla 5.20. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el uso del suelo correspondiente a los Cultivos.

Uso de Suelo	Área (m ²)	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣP_n (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Cultivos	6.357,5	12	1,00	9,39	9,39	0,00	0,00	9,39
			2,00	5,78	15,16	0,16	0,16	5,62
			3,00	9,49	24,66	2,21	2,05	7,45
			4,00	54,52	79,18	35,49	33,28	21,24
			5,00	62,74	141,92	88,88	53,39	9,35
			6,00	105,32	247,24	187,44	98,56	6,76
			7,00	119,36	366,60	303,29	115,85	3,51
			8,00	130,24	496,85	431,46	128,17	2,08
			9,00	128,03	624,88	558,23	126,77	1,26
			10,00	113,08	737,95	670,53	112,31	0,77
			11,00	83,02	820,97	753,12	82,58	0,44
			12,00	31,97	852,94	784,94	31,82	0,15

En la Figura 5.16, se observa como en los meses de enero, febrero, marzo y abril, el agua de las lluvias consigue infiltrarse saturando el suelo. En efecto, en los meses con mayor acumulación de precipitaciones, éste se encuentra sobresaturado, resultando así una escorrentía mayor y más rápida provocada por la escasa cobertura vegetal, con un volumen total de escorrentía de 4.990,23 m³.

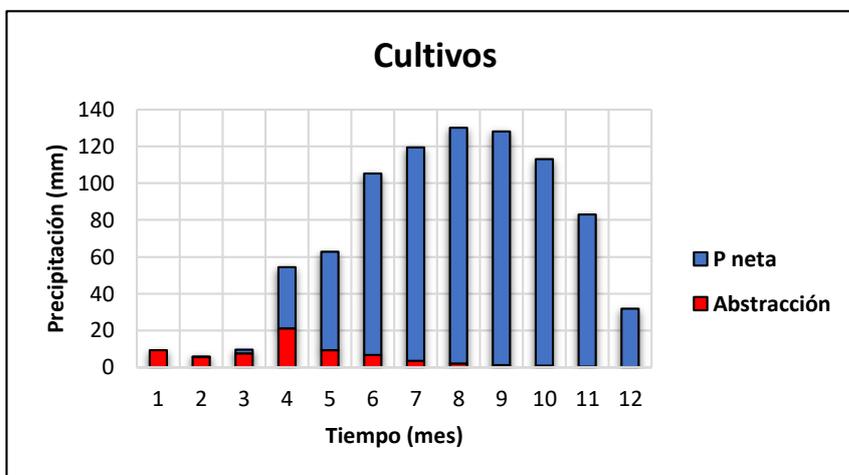


Figura 5.16. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para la vegetación Cultivos.

Como se muestra en la Tabla 5.21, respecto al uso del suelo correspondiente al Tejido Urbano Discontinuo, la Precipitación (ΣP) correspondiente a la primera lluvia, está por encima al Umbral de Escorrentía. Es decir, el suelo presenta una capacidad de infiltración menor, razón por la cual el agua comienza a escurrir una vez precipita, siendo la Precipitación Neta Total en el área de 806,75 mm.

Tabla 5.21. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el uso del suelo correspondiente al Tejido Urbano Discontinuo.

Uso de Suelo	Área m ²	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣPn (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Tejido Urbano Discontinuo	2.723	8	1	9,39	9,39	0,05	0,05	9,34
			2	5,78	15,16	1,09	1,04	4,74
			3	9,49	24,66	4,90	3,81	5,68
			4	54,52	79,18	45,57	40,67	13,85
			5	62,74	141,92	103,12	57,55	5,19
			6	105,32	247,24	204,97	101,85	3,47
			7	119,36	366,60	322,62	117,64	1,72
			8	130,24	496,85	451,87	129,26	0,99
			9	128,03	624,88	579,31	127,44	0,59
			10	113,08	737,95	692,03	112,72	0,36
			11	83,02	820,97	774,85	82,82	0,20
			12	31,97	852,94	806,75	31,90	0,07

Se observa en la Figura 5.17 que, en los primeros meses de lluvias, correspondientes a enero, febrero y marzo, el agua comienza a retenerse en el suelo y a saturarlo, para posteriormente generar escorrentía superficial en los meses subsiguientes. Asimismo, al estar estas construcciones ubicadas en pendientes moderadas y pronunciadas, con poca cobertura vegetal, el agua escurre con mayor facilidad y, por ende, la cantidad de Volumen de Escorrentía es significativa, siendo éste de $2.196,78 \text{ m}^3$.

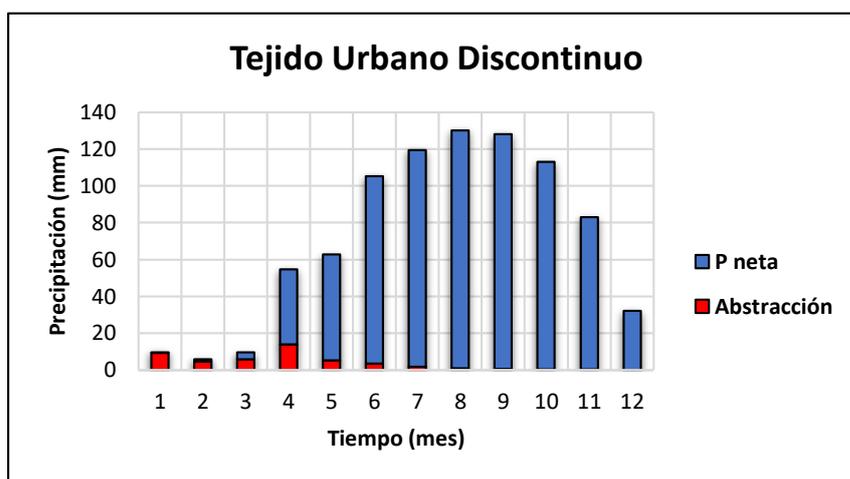


Figura 5.17. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el Tejido Urbano Discontinuo.

Como se observa en la Tabla 5.22, la vegetación correspondiente a Sabana de Montaña, las dos (2) primeras Precipitaciones (ΣP) resultaron ser menor al Umbral de Escorrentía. En este sentido, el suelo en las primeras lluvias no se encuentra saturado debido a la protección de la cobertura vegetal, razón por la cual las Precipitaciones Acumuladas (ΣP_n) son iguales a cero. Seguidamente, el suelo rebasa su capacidad de infiltración, producto de las precipitaciones posteriores, por lo cual el agua comienza a escurrir, siendo la Precipitación Neta Total en el área de $753,70 \text{ mm}$.

Tabla 5.22. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la vegetación Sabana de Montaña.

Uso de Suelo	Área m ²	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣPn (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Sabana de Montaña	38.179	18	1	9,39	9,39	0,00	0,00	9,39
			2	5,78	15,16	0,00	0,00	5,78
			3	9,49	24,66	0,46	0,46	9,04
			4	54,52	79,18	24,76	24,30	30,22
			5	62,74	141,92	71,79	47,03	15,71
			6	105,32	247,24	164,62	92,83	12,49
			7	119,36	366,60	277,07	112,45	6,90
			8	130,24	496,85	403,09	126,02	4,23
			9	128,03	624,88	528,50	125,41	2,62
			10	113,08	737,95	639,95	111,45	1,62
			11	83,02	820,97	722,04	82,09	0,93
			12	31,97	852,94	753,70	31,65	0,31

En la Figura 5.18, se observa como en los meses de enero, febrero y marzo, el agua de las lluvias consigue infiltrarse, debido a que el umbral de escorrentía es mayor con respecto a las primeras precipitaciones acumuladas. Esto permite que el suelo se sature y, por ende, en los meses con mayor acumulación de precipitaciones, éste se encuentra sobresaturado, resultando así una escorrentía significativa y más rápida, con un volumen total de 28.775,43 m³.

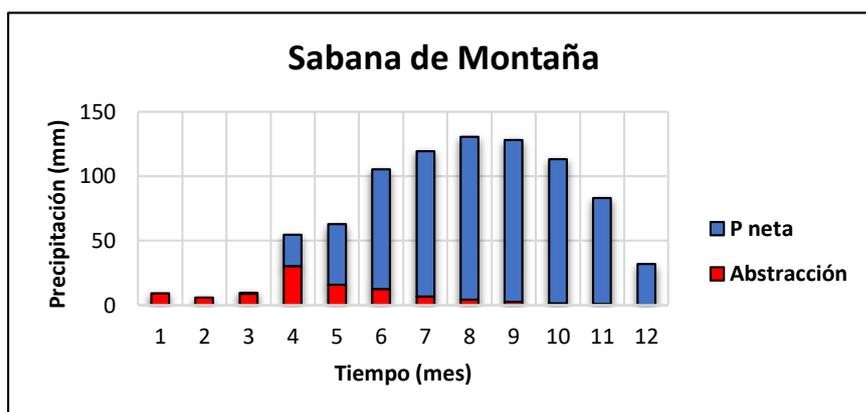


Figura 5.18. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para la vegetación Sabana de Montaña.

Como se observa en la Tabla 5.23, en cuanto al uso del suelo correspondiente a la Zona de Extracción Minera, la Precipitación (ΣP) correspondiente a la primera lluvia, resultó ser mayor al Umbral de Escorrentía. Es decir, el suelo se encuentra saturado por estas precipitaciones y, seguidamente, el agua precipitada procede a escurrir, siendo la Precipitación Neta Total de 817,97 mm.

Tabla 5.23. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la Zona de Extracción Minera.

Uso de Suelo	Área m ²	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣPn (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Zona de extracción minera	1.486	6	1	9,39	9,39	0,34	0,34	9,04
			2	5,78	15,16	2,14	1,80	3,98
			3	9,49	24,66	7,15	5,01	4,48
			4	54,52	79,18	51,90	44,75	9,77
			5	62,74	141,92	111,35	59,45	3,30
			6	105,32	247,24	214,56	103,22	2,11
			7	119,36	366,60	332,91	118,35	1,01
			8	130,24	496,85	462,58	129,67	0,58
			9	128,03	624,88	590,26	127,69	0,34
			10	113,08	737,95	703,13	112,87	0,21
			11	83,02	820,97	786,04	82,90	0,12
			12	31,97	852,94	817,97	31,93	0,04

Se observa en la Figura 5.19 que, en los primeros meses de lluvias escasas, correspondientes a enero, febrero y marzo, el agua comienza a retenerse en el suelo y posteriormente a saturarlo, el cual, debido a sus características texturales, condiciones topográficas de laderas con pendientes pronunciadas, y desprovistas de vegetación, permite la generación de las aguas de escorrentía con un volumen total de 1.215,50 m³, siendo estas capaces de transportar y depositar sedimentos resultantes de los trabajos mineros.



Figura 5.19. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para la Zona de Extracción Minera.

Como se muestra en la Tabla 5.24, con respecto al uso del suelo correspondiente a la vegetación de Matorral, la Precipitación (ΣP) resultó ser menor al Umbral de Escorrentía. En este sentido, el suelo en las primeras lluvias no se encuentra saturado, debido a la protección de la cobertura vegetal, y en consecuencia las Precipitaciones Acumuladas (ΣP_n) son iguales a cero. Posterior a estas lluvias, el suelo rebasa su capacidad de infiltración, por lo cual el agua comienza a escurrir, siendo la Precipitación Neta Total en el área de 733,80 mm.

Tabla 5.24. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la vegetación Matorral.

Uso de Suelo	Área m ²	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣP_n (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Matorral	55.563	22	1	9,39	9,39	0,00	0,00	9,39
			2	5,78	15,16	0,00	0,00	5,78
			3	9,49	24,66	0,06	0,06	9,43
			4	54,52	79,18	19,56	19,49	35,03
			5	62,74	141,92	62,55	42,99	19,75
			6	105,32	247,24	151,34	88,79	16,53
			7	119,36	366,60	261,22	109,88	9,48
			8	130,24	496,85	385,54	124,32	5,93
			9	128,03	624,88	509,85	124,31	3,72
			10	113,08	737,95	620,60	110,75	2,32
			11	83,02	820,97	702,29	81,68	1,34
			12	31,97	852,94	733,80	31,51	0,45

En la Figura 5.20, se observa cómo en los meses correspondientes a enero, febrero, marzo y abril, el agua de las lluvias alcanza infiltrarse, debido a que el Umbral de Escorrentía es mayor con respecto a las primeras precipitaciones acumuladas en la zona. Esto permite que el suelo se sature y, por ende, en los meses con mayor acumulación de precipitaciones, éste se encuentra sobresaturado, resultando así la generación de una escorrentía significativa y más rápida, con un volumen total de 40.772,13 m³.

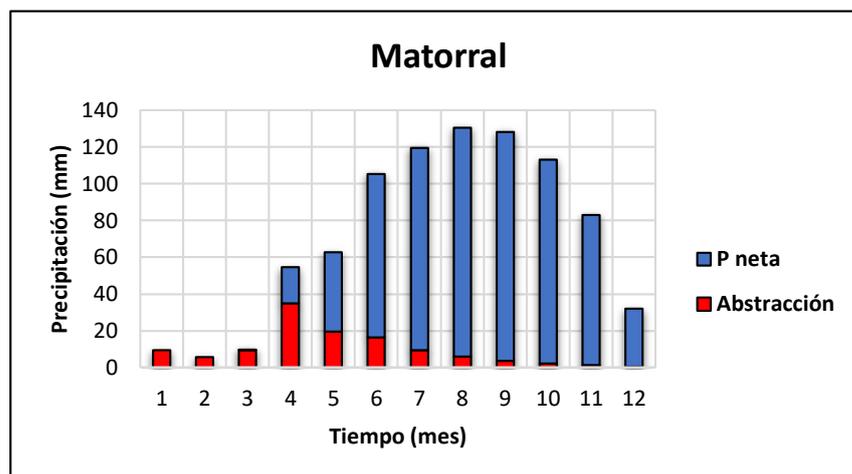


Figura 5.20. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para la vegetación de matorral.

Como se muestra en la Tabla 5.25, el Material Estéril apilado dentro del yacimiento de Loma de Hierro, la Precipitación (ΣP) correspondiente a las primeras lluvias, se encuentra por encima del Umbral de Escorrentía, razón por la cual el material se halla saturado por esta precipitación, y por consiguiente el agua precipitada procede a escurrir con facilidad, siendo la Precipitación Neta Total en el área de 806,75 mm.

Tabla 5.25. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el uso del suelo correspondiente al Material Estéril.

Uso de Suelo	Área m ²	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣPn (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Material Estéril	233	8	1	9,39	9,39	0,05	0,05	9,34
			2	5,78	15,16	1,09	1,04	4,74
			3	9,49	24,66	4,90	3,81	5,68
			4	54,52	79,18	45,57	40,67	13,85
			5	62,74	141,92	103,12	57,55	5,19
			6	105,32	247,24	204,97	101,85	3,47
			7	119,36	366,60	322,62	117,64	1,72
			8	130,24	496,85	451,87	129,26	0,99
			9	128,03	624,88	579,31	127,44	0,59
			10	113,08	737,95	692,03	112,72	0,36
			11	83,02	820,97	774,85	82,82	0,20
			12	31,97	852,94	806,75	31,90	0,07

De acuerdo con lo indicado en la Figura 5.21, los primeros cuatro (4) meses, el agua comienza a ser retenida en el material hasta saturarlo, y en consecuencia se

genera la escorrentía superficial con un volumen total de 187,97 m³, siendo este producto estéril removido poco a poco y transportando por las lluvias.

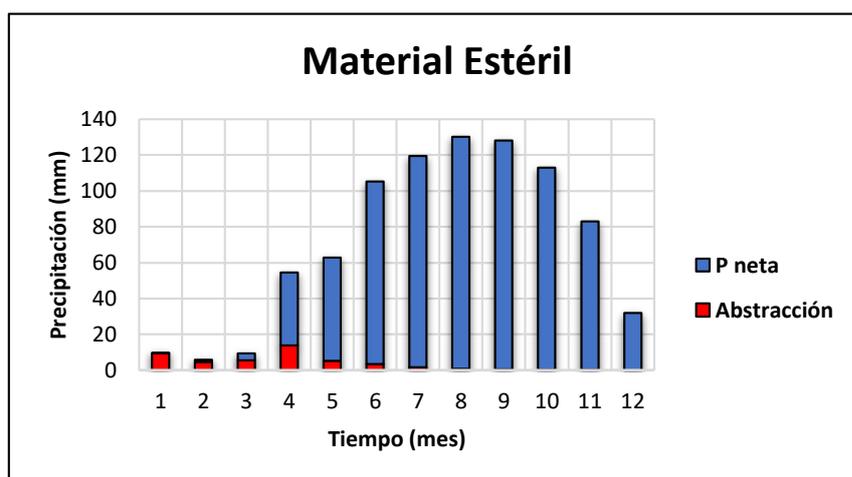


Figura 5.21. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el Material Estéril.

Como se muestra en la Tabla 5.26, en cuanto al uso de suelo correspondiente a la vegetación de Bosque Nublado, la Precipitación (ΣP) resultó ser menor al Umbral de Escorrentía, de modo que el suelo en las primeras lluvias no se encuentra saturado, debido a la protección de la cobertura vegetal, por lo cual las Precipitaciones Acumuladas (ΣP_n) son iguales a cero. Posterior a estas lluvias, el suelo rebasa su capacidad de infiltración, generando escorrentía superficial, siendo la Precipitación Neta Total en el área de 728,94 mm.

Tabla 5.26. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la vegetación de Bosque Nublado.

Uso de Suelo	Área m ²	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣP_n (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Bosque Nublado	35.857	23	1	9,39	9,39	0,00	0,00	9,39
			2	5,78	15,16	0,00	0,00	5,78
			3	9,49	24,66	0,02	0,02	9,47
			4	54,52	79,18	18,44	18,41	36,11
			5	62,74	141,92	60,46	42,02	20,72
			6	105,32	247,24	148,23	87,77	17,55
			7	119,36	366,60	257,44	109,21	10,15
			8	130,24	496,85	381,31	123,87	6,38
			9	128,03	624,88	505,32	124,02	4,01
			10	113,08	737,95	615,89	110,56	2,51
			11	83,02	820,97	697,46	81,57	1,45
			12	31,97	852,94	728,94	31,48	0,49

En la Figura 5.22, se observa cómo en los primeros meses el agua de las lluvias logra infiltrarse, debido a la protección de la cobertura vegetal, la cual juega un papel muy importante puesto que las lluvias presentadas son retenidas por las plantas, haciendo que las precipitaciones caigan con una menor velocidad en el suelo, y por consiguiente que éste absorba de una manera más lenta las partículas de agua, resultando así un volumen total de escorrentía de 26.137,46 m³.

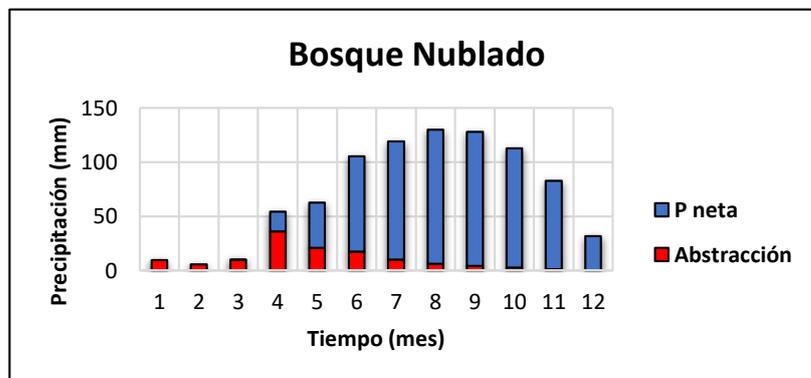


Figura 5.22. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para la vegetación de Bosque Nublado.

Como se muestra en la Tabla 5.27, en cuanto al uso del suelo correspondiente a la infraestructura industrial para el desarrollo minero División Níquel, la Precipitación (ΣP) correspondiente a la primera lluvia, resultó ser mayor al Umbral de Escorrentía. Por consiguiente, el suelo intervenido se encuentra saturado con las primeras lluvias, de modo que el agua precipitada procede a escurrir siendo la Precipitación Neta Total de 835,20 mm.

Tabla 5.27. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el uso del suelo correspondiente a la Zona Industrial.

Uso de Suelo	Área m ²	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣPn (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Zona Industrial	450,8	3	1	9,39	9,39	1,91	1,91	7,48
			2	5,78	15,16	5,45	3,54	2,24
			3	9,49	24,66	12,80	7,35	2,15
			4	54,52	79,18	63,65	50,85	3,67
			5	62,74	141,92	125,38	61,74	1,01
			6	105,32	247,24	230,11	104,73	0,59
			7	119,36	366,60	349,20	119,09	0,27
			8	130,24	496,85	479,29	130,09	0,15
			9	128,03	624,88	607,23	127,94	0,09
			10	113,08	737,95	720,25	113,02	0,05
			11	83,02	820,97	803,24	82,99	0,03
			12	31,97	852,94	835,20	31,96	0,01

De acuerdo con lo indicado en la Figura 5.23, sólo en el mes de enero el agua logra ser retenida en el suelo hasta saturarlo y, por ende, en los meses siguientes con mayor acumulación de precipitaciones éste se encuentra sobresaturado, resultando así la generación de una escorrentía significativa y rápida, con un volumen total de 376,51 m³.

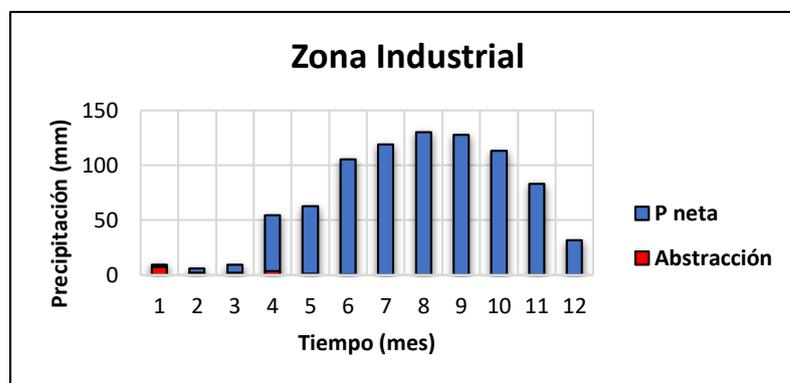


Figura 5.23. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para la Zona Industrial.

Como se muestra en la Tabla 5.28, con respecto a Afloramientos Rocosos, la Precipitación (ΣP) correspondiente a las primeras lluvias resultó ser mayor al Umbral de Escorrentía, puesto que, al ser las rocas ígneos metamórficas presentan baja permeabilidad, producto de sus características texturales, porosidad secundaria (patrones de fracturas sin interconexión), por lo cual permiten que las aguas queden retenidas en las primeras lluvias sin embargo, ésta no logra transmitirse y, por consiguiente, las rocas rebasan su capacidad de infiltración resultando así la generación de escorrentía superficial, siendo la Precipitación Neta Total de 841,06 mm.

Tabla 5.28. Valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para el uso del suelo correspondiente a los Afloramientos Rocosos.

Uso de Suelo	Área m ²	Umbral de Escorrentía (Po)	Mes	P (mm)	ΣP (mm)	ΣPn (mm)	Pn (mm)	Abstracción (mm)
Afloramientos Rocosos	14.974	2	1	9,39	9,39	3,14	3,14	6,25
			2	5,78	15,16	7,48	4,34	1,43
			3	9,49	24,66	15,72	8,24	1,26
			4	54,52	79,18	68,33	52,61	1,91
			5	62,74	141,92	130,59	62,26	0,48
			6	105,32	247,24	235,64	105,05	0,28
			7	119,36	366,60	354,87	119,23	0,12
			8	130,24	496,85	485,05	130,18	0,07
			9	128,03	624,88	613,03	127,99	0,04
			10	113,08	737,95	726,09	113,05	0,02
			11	83,02	820,97	809,09	83,01	0,01
			12	31,97	852,94	841,06	31,96	0,00

Se observa en la Figura 5.24 que, en el primer mes de lluvias escasas, correspondientes a enero, el agua comienza a retenerse en las rocas, las cuales, debido a sus características texturales, condiciones topográficas de laderas con pendientes pronunciadas, y desprovistas de vegetación, permite la generación de las aguas de escorrentía con un volumen total de 12.593,98 m³, siendo éstas significativas en el aporte de material rocoso, producto de los desprendimientos durante las lluvias más agresivas.

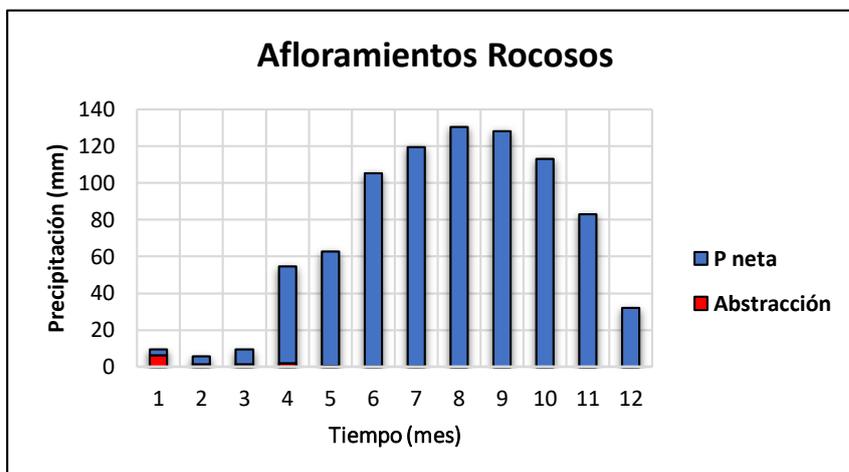


Figura 5.24. Histograma correspondiente a los valores de Precipitación Neta (Pn) y Abstracción, para los Afloramientos Rocosos.

5.7.4 Temperatura

La obtención de los datos de temperatura fue obtenida a partir del programa Larc-Power de la NASA, donde se accedió a una estación climatológica cercana a la zona de estudio con coordenadas 673042,1 E, 1114343,2 N, para un rango de tiempo estudiado (1999-2017). Posteriormente, con el gradiente altotérmico de Venezuela ($\pm 0,65^{\circ}\text{C}/100\text{msnm}$) y el registro de la estación, se calcularon los valores de temperatura media anual, para cada una de las estaciones que fueron consideradas en el análisis, como se observa en la Tabla 5.29.

Los datos de temperatura, indican que en la zona de estudio la temperatura oscila entre los 19 y 24°C. La temperatura desciende desde el mes de diciembre hasta marzo, cuando aumenta, y vuelve a disminuir, progresivamente, durante los meses de junio y julio, aumentando nuevamente entre los meses de agosto y octubre, como se puede observar en la Figura 5.25.

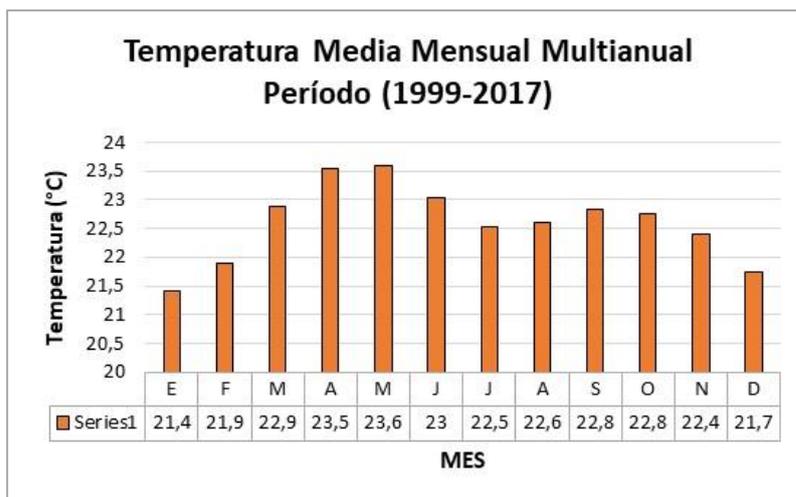


Figura 5.25. Histograma correspondiente a la Temperatura Media Mensual Multianual.

La temperatura media total multianual es de 23 °C/año, con máximas entre los meses de abril y mayo (25°C) y mínimas en el mes de enero (18,5°C), como se muestra en la Figura 5.26.

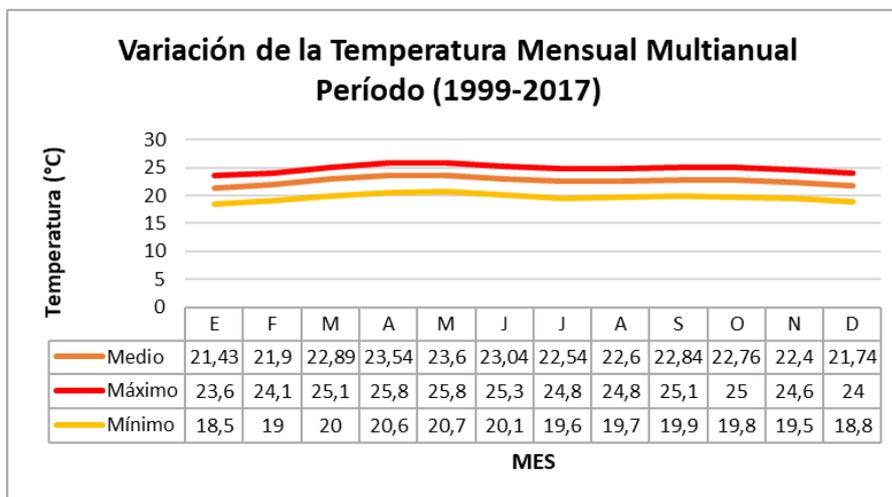


Figura 5.26. Gráfica de la variación temporal de los valores totales mensuales de temperatura en la región.

A partir de los datos de temperatura calculados anteriormente, para el período de tiempo (1999-2017), se estableció la variación espacial de la temperatura media anual, por medio del programa de ArcGis, en donde se realizó la interpolación (Spline), y posteriormente se generaron los contornos con un intervalo de 1°C, como se presenta en la Figura 5.27. La temperatura media anual, disminuye hacia los poblados del Rodeo, Tiara, El Castaño, Loma de Hierro con temperaturas entre los 20 a 22°C. Mientras que, hacia las localidades las Mercedes de Cagua, La Amelia, El Corocito y Agua Caliente aumenta, con temperaturas entre los 23 a 25°C.

Tabla 5.29. Valores de temperatura media anual (período 1999-2017) de las estaciones ubicadas en las cercanías del área de estudio y el programa Larc Power de la NASA, calculados a partir del gradiente altotérmico (°C).

ESTACIÓN	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Media anual °C	Altitud (msnm)	Diferencia de Altitud (msnm)
NASA	23,6	24,1	25,1	25,8	25,8	25,3	24,8	24,8	25,1	25	24,6	24	24,8	560	Esta Base
Cortijos	22,3	22,7	23,7	24,4	24,4	23,9	23,4	23,4	23,7	23,6	23,2	22,6	23,4	772	-212
San Sebastián de los Reyes	23	23,5	24,4	25,1	25,2	24,6	24,1	24,2	24,4	24,3	24	23,3	24,2	667	-107
San Francisco de Pao	22,8	23,3	24,3	24,9	25	24,4	23,9	24	24,2	24,2	23,8	23,1	24	688	-128
La Urbina Qda. Seca	21,7	22,2	23,2	23,8	23,9	23,3	22,8	22,9	23,1	23	22,7	22	22,9	858	-298
San Diego de Los Altos	19,5	19,9	20,9	21,6	21,6	21,1	20,6	20,6	20,9	20,8	20,4	19,8	20,6	1.205	-645
Loma de Níquel	20	20,5	21,5	22,1	22,2	21,6	21,1	21,2	21,4	21,4	21	20,3	21,2	1.118	-558
Tiara	18,5	19	20	20,6	20,7	20,1	19,6	19,7	19,9	19,8	19,5	18,8	19,7	1.350	-790

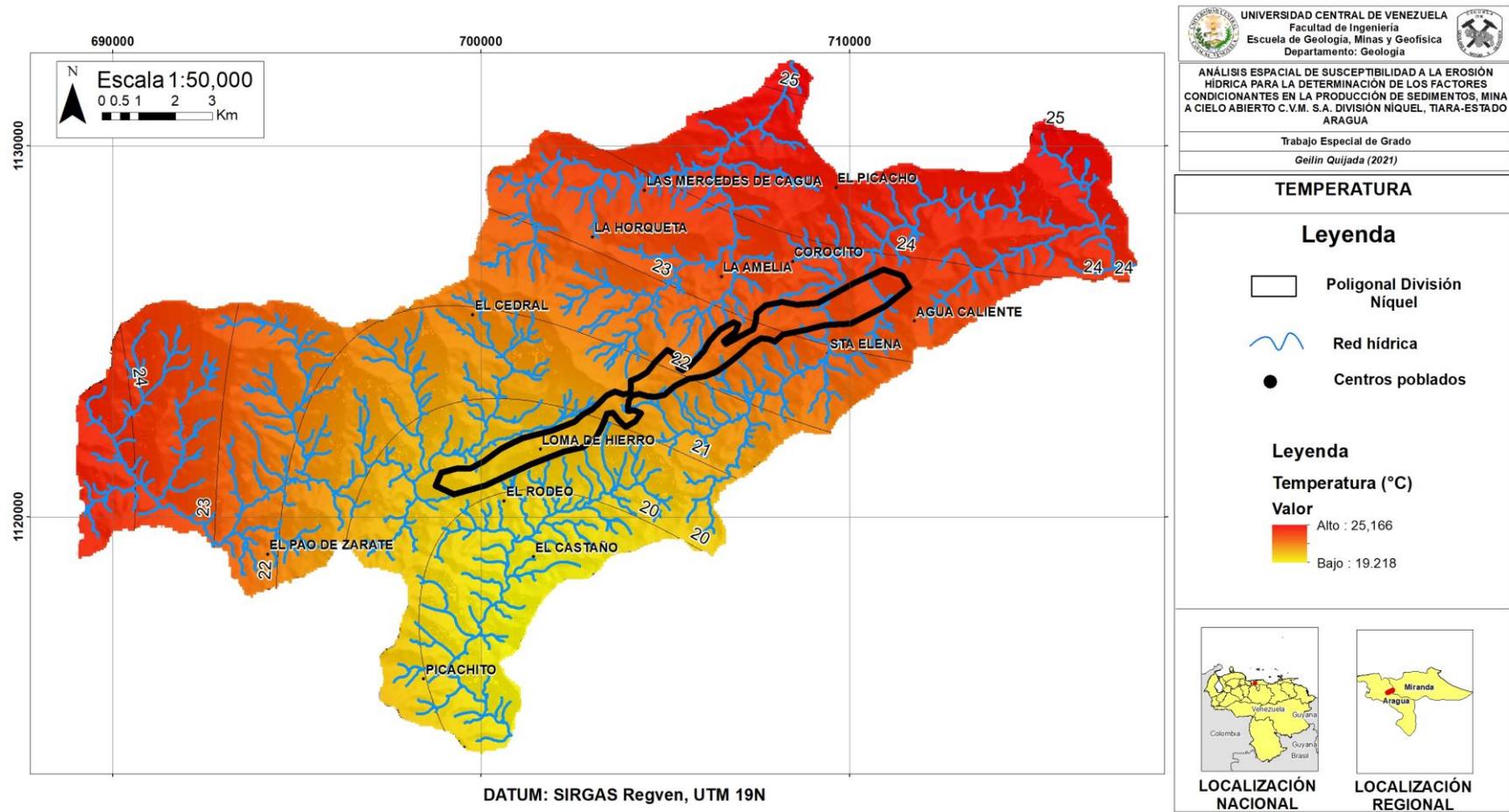


Figura 5.27. Mapa de Temperatura Media Anual (°C) para las subcuencas Tiara, Mesia, Paito y Cagua, en el período (1999-2017).

5.7.5 Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial se refiere a la máxima cantidad de agua que puede ser evapotranspirada de un suelo cuya protección vegetal es completa, además de no tener limitaciones de disponibilidad de agua, por lo cual depende de las precipitaciones y las temperaturas. La estimación de los valores de evapotranspiración para cada una de las estaciones analizadas, se realizaron a través de la metodología propuesta por Thornthwaite explicada en la sección 2.3.2, a partir de las ecuaciones (11) y (11), los cálculos y gráficos se detallan en el Anexo III.

Como se observa en la Tabla 5.30, los datos de evapotranspiración potencial indican que en la zona de estudio la evapotranspiración oscila entre los 8 y 11 cm. Existe dos disminuciones de evapotranspiración, la primera en el mes de diciembre hasta marzo, donde aumenta, y vuelve a disminuir progresivamente durante los meses de junio y julio, para posteriormente volver aumentar entre los meses de agosto a octubre Figura 5.28.

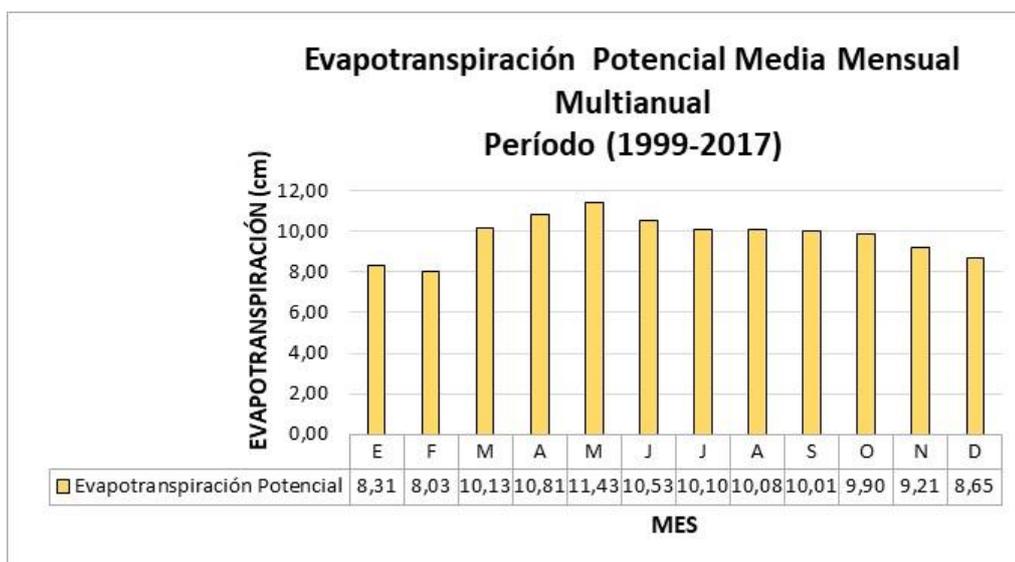


Figura 5.28. Histograma correspondiente a la Evapotranspiración Potencial Media Mensual Multianual.

Tabla 5.30. Valores de evapotranspiración potencial media anual (período 1999-2017) de las estaciones ubicadas en las cercanías del área de estudio y el programa Larc Power de la NASA.

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Media Anual (cm)
NASA	9,5	9,2	11,7	12,6	13,3	12,2	11,7	11,6	11,6	11,4	10,6	9,9	11,275
El Cortijo	8,4	8,1	10,2	10,9	11,5	10,6	10,2	10,1	10,1	10	9,3	8,7	9,841
San Sebastián de Los Reyes	8,9	8,7	11	11,8	12,4	11,4	10,9	10,9	10,8	10,7	9,9	9,3	10,558
San Francisco del Pao	8,8	8,5	10,8	11,5	12,2	11,2	10,7	10,7	10,6	10,5	9,8	9,1	10,366
La Urbina Quebrada Seca	8	7,7	9,7	10,4	11	10,1	9,7	9,7	9,6	9,5	8,8	8,3	9,375
San Diego de los Altos	9,4	9	11,4	12,2	12,9	11,9	11,4	11,4	11,4	11,3	10,5	9,9	11,058
Loma de Níquel	7,1	6,8	8,5	9	9,5	8,8	8,5	8,5	8,4	8,3	7,8	7,3	8,208
Tiara	6,4	6,2	7,7	8,1	8,6	8	7,7	7,7	7,6	7,5	7	6,7	7,433

Como se observa en la Figura 5.29, dentro de la región las precipitaciones ocurren durante todo el año, lo que indica excedencias de agua en el suelo, el cual, debido a sus características texturales (arcilloso), se encuentra saturado durante todos los meses.

Los mayores valores de evapotranspiración potencial ocurren entre los meses de enero a marzo, ya que las precipitaciones disminuyen, por lo cual, el suelo no se encuentra con excedencias de agua, y ésta es evapotranspirada.

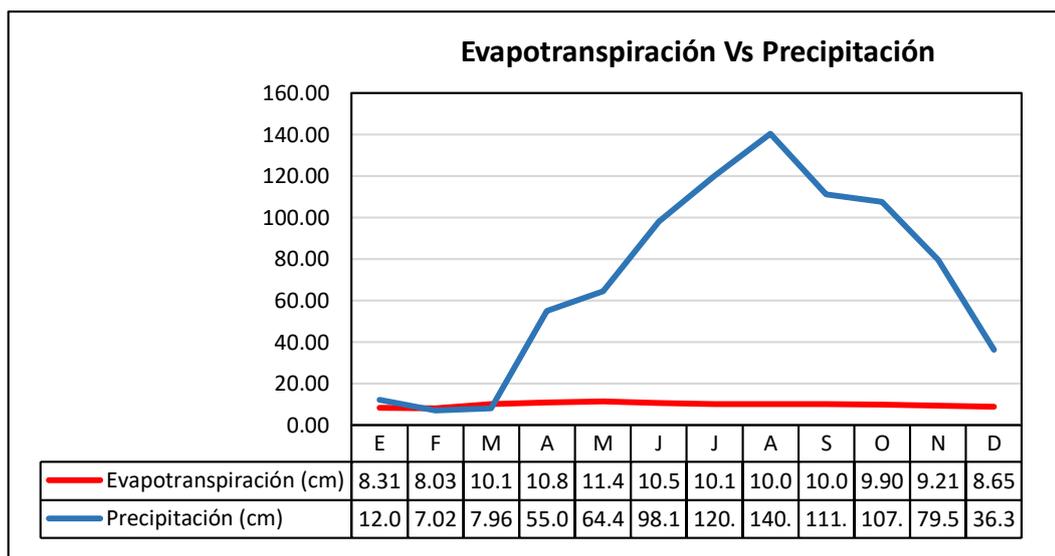


Figura 5.29. Gráfico de Evapotranspiración Vs Precipitación. Se puede observar como los valores mayores de evapotranspiración potencial se presentan durante los meses de escasas precipitaciones.

A partir de los datos de evapotranspiración potencial calculados anteriormente, se estableció la variación espacial de la evapotranspiración potencial para cada estación meteorológica, por medio del programa ArcGis, en donde se realizó la interpolación (Spline), como se presenta en la Figura 5.30. La evapotranspiración potencial, en la zona de estudio, se encuentra valores máximos de 10,303 cm hacia las localidades: Las Mercedes de Cagua, El Corocito, Agua Caliente, El Pao De Zarate, y valores mínimos de 7,4128 cm en los poblados Rodeo, Tiara, El Castaño y Loma de Hierro.

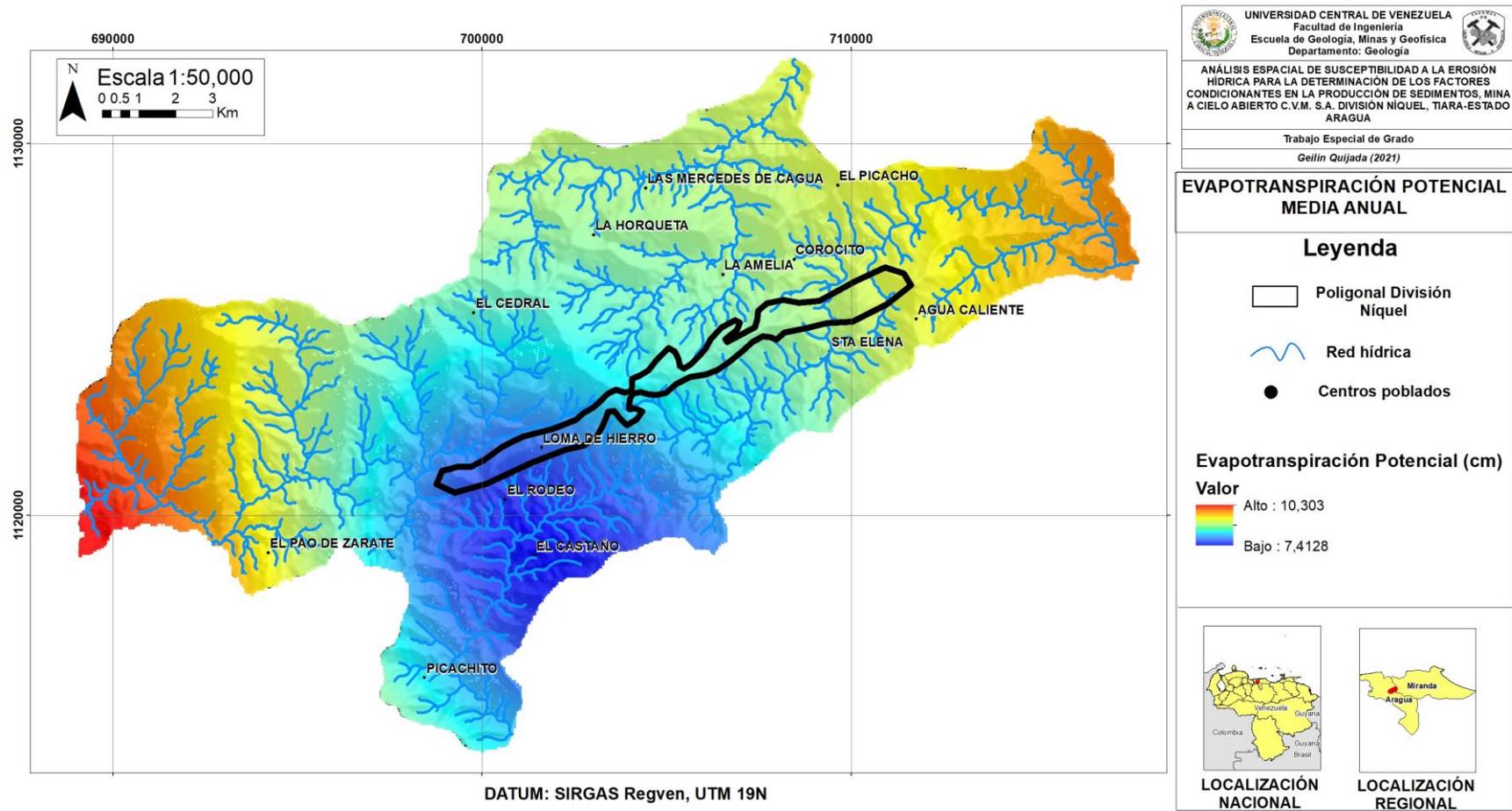


Figura 5.30. Mapa de evapotranspiración potencial para las subcuencas Tiara, Mesia, Paito y Cagua, en el período (1999-2017).

5.7.6 Coeficiente de humedad

El coeficiente de humedad (adimensional) es interpretado como la capacidad del suelo para retener el agua. Ejemplo: un coeficiente de humedad de 1,5 está lleno (1, es decir al 100%) y presenta 50% más de agua de excedencia para ese mes. La estimación de los valores del coeficiente de humedad, se realizaron a través de la diferencia del contenido agua, de las precipitaciones y la evapotranspiración potencial del suelo, los cálculos y gráficos se detallan en el Anexo III.

Como se observa en la Tabla 5.31, los valores de Coeficiente de humedad, en la región de estudio oscilan entre -0,28 y 12,24. Entre los meses enero a marzo, disminuyen las precipitaciones, y por ende, los coeficientes de humedad del suelo son menores, es decir, el contenido de agua almacenada, es deficiente. Mientras que, en los siguientes meses del año los coeficientes de humedad son mayores que uno (>1), por lo cual, el suelo se encuentra reteniendo agua, además de presentar excedencias dentro de su capacidad de almacenamiento, Figura 5.31.

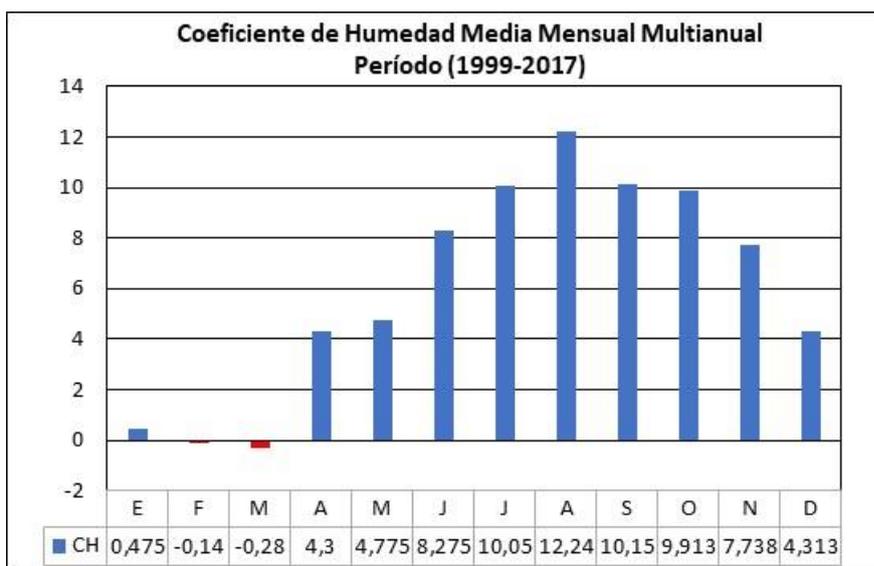


Figura 5.31. Histograma correspondiente al Coeficiente de humedad Media Mensual Multianual.

Tabla 5.31. Valores correspondientes al coeficiente de humedad media anual (período 1999-2017) de las estaciones ubicadas en las cercanías del área de estudio y el programa Larc Power de la NASA.

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Media Anual (adimensional)
NASA	1,4	0,6	-0,2	3,2	5,3	7	9,3	11,4	8,3	8	6,4	3,9	5,383
El Cortijo	-1	-1	-0,9	-1	-1	-0,7	0	0,1	-0,7	-0,5	-0,8	-1	-0,708
San Sebastián de Los Reyes	-0,7	-0,9	0,1	4,8	3,3	9,3	7,8	8,2	10,9	7,6	7,6	8,9	5,575
San Francisco del Pao	-0,9	-1	-0,8	3,9	2,2	5,5	6,5	12,8	10,8	8,2	4,4	2,6	4,516
La Urbina Quebrada Seca	-0,8	-0,8	-0,3	4,9	4	7,2	13,4	5,9	7	8,7	9,1	2,9	5,1
San Diego de los Altos	0,8	0,9	-0,2	3,4	5,7	7,7	9,8	12,6	8,6	8,4	6,9	4,5	5,758
Loma de Níquel	5,7	2,1	0,4	8,1	14,6	24	24,2	28,5	20,5	23,3	16,4	12,3	15,008
Tiara	-0,7	-1	-0,3	7,1	4,1	6,2	9,4	18,4	15,8	15,6	11,9	0,4	7,241

El coeficiente media total multianual es de 5,98, con máximas en agosto (28,5) y mínimas en el mes de enero, febrero y marzo, como se observa en la Figura 5.32.

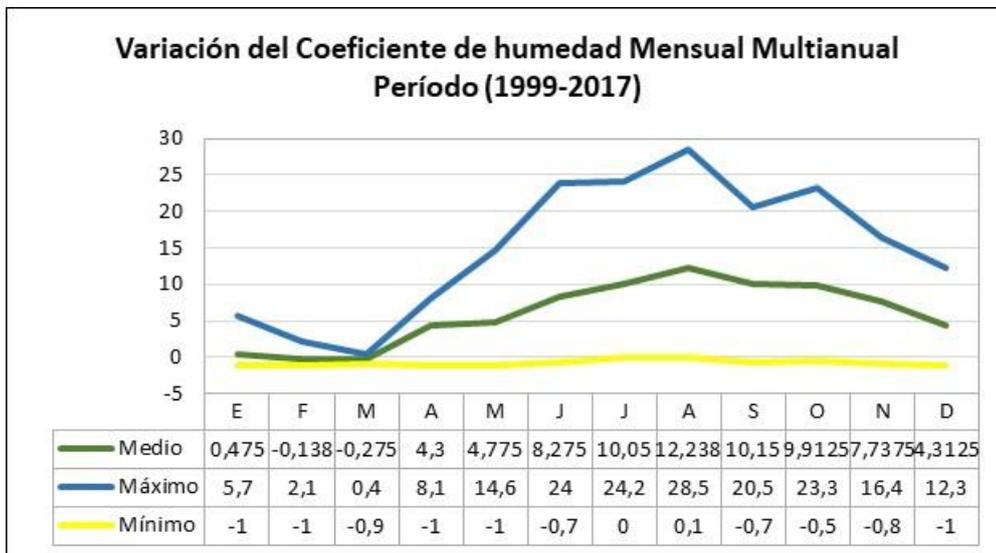


Figura 5.32. Gráfico variación temporal de los valores totales mensuales del coeficiente de humedad en la región.

A partir de los datos calculados, del coeficiente de humedad, se estableció la variación espacial de los coeficientes de humedad, para cada estación meteorológica y climatológica, por medio del programa ArcGis, y se realizó la interpolación (Spline), como se presenta en la Figura 5.33. El Coeficiente de humedad, en la región de estudio alcanza valores máximos de 19,00, correspondientes a las zonas en donde se presenta la mayor concentración de precipitaciones, es decir, hacia las localidades: Las Mercedes de Cagua, La Amelia, El Corocito, Agua Caliente; y valores mínimos de 4,20 en los poblados: El Rodeo, El Castaño, El Pao de Zárate, donde la cantidad de precipitaciones disminuyen progresivamente.

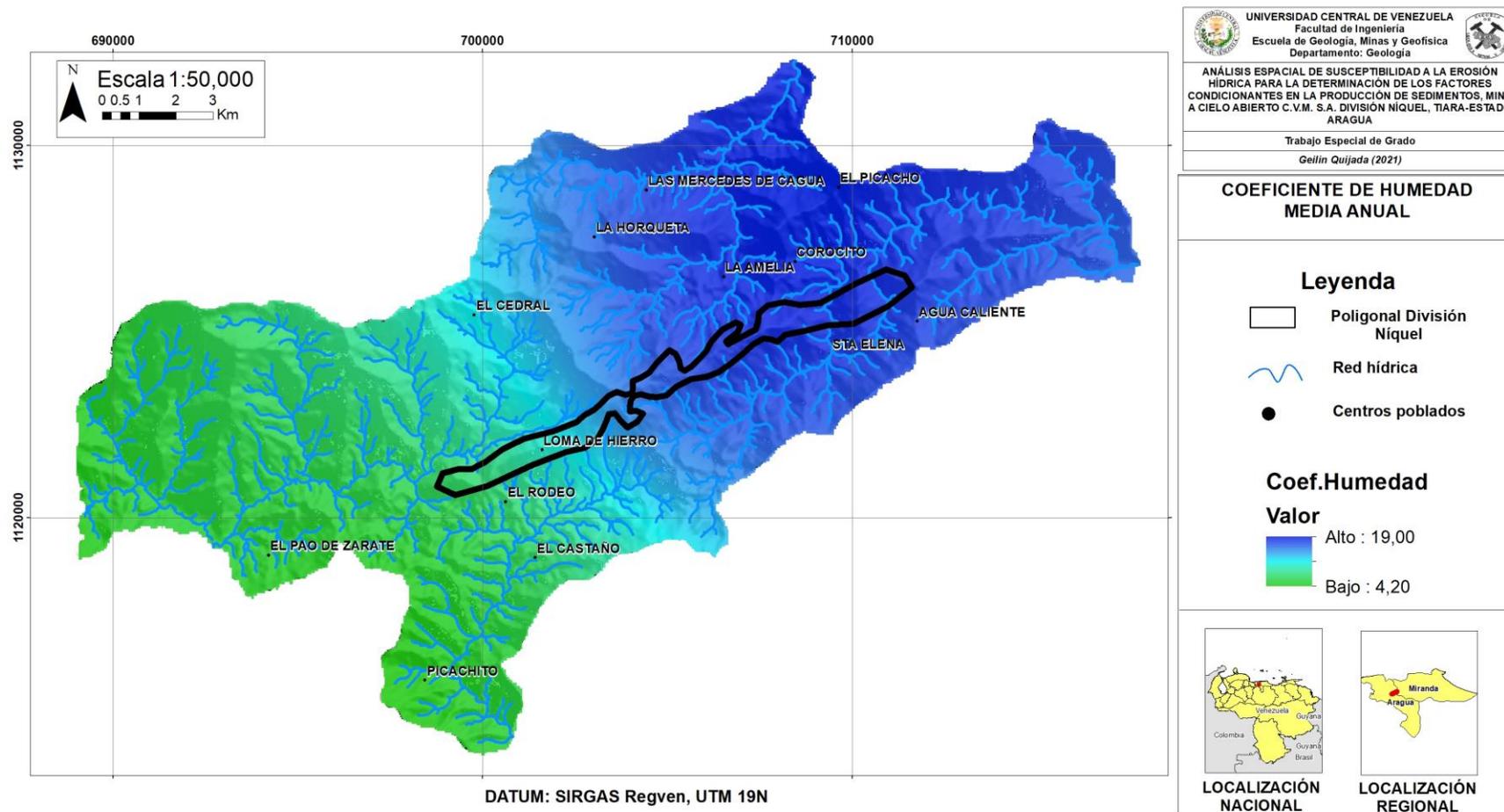


Figura 5.33. Mapa correspondiente a la variación espacial del coeficiente de humedad para las subcuencas Tiara, Mesia, Paito y Cagua, en el período (1999-2017).

5.8 GEOMORFOLOGÍA

El relieve, del área de estudio, se forma producto de la dinámica activa de los agentes endógenos como son: los controles litológicos y estructurales, siendo éstos procesos constructivos y destructivos, continuamente afectados por los agentes exógenos, tales como el clima y la actuación antrópica. De la interacción de los controles citados anteriormente, resultan los procesos de meteorización-erosión imperantes en la zona.

A partir de las expresiones topográficas descritas en la sección 5.1, éstas se dividen en dos (2) tipos de morfoestructuras correspondientes a las topoformas de relieve alto y las topoformas de relieve bajo; las cuales se encuentran en contactos abruptos hacia el sur.

Unidad de relieve alto:

Se corresponde al área de mayor superficie y altitudes en la región, asociadas a las subunidades de filas altas y cerros medios, con pendientes fuertes y moderadamente empinadas. Dichas geoformas pertenecen a una serie de fajas; Cagua-El Tinaco, Loma de Hierro y Villa de Cura, en dirección norte a sur; conformadas litológicamente por rocas ígneo metamórficas. Las rocas del tipo metamórfico son: Esquito de Tinapú, Metalava de los Naranjos, Metadiorita de la Guacamaya, Gneis de la Aguadita, Gneis Tonalítico de Curiepe, Metatobas del Caño y el Chino y Metaconglomerado de Charallave; mientras que las rocas ígneas están representadas por, Peridotita de Loma de Níquel, Gabro de Mesia, Basalto de Tiara, Basalto de Los Naranjos, Volcanosedimentarias del río Guare. Éstas se encuentran en contactos estructurales, con diversas fallas normales asociadas con cuencas *pull-apart*, fallas de transferencia y fallas transcurrentes con componente oblicua (BELLIZIA, 1967).

Las características geológicas en la región favorecen la disponibilidad de los agentes exógenos, los cuales resultan importantes en la meteorización y erosión de las rocas, proveyendo una elevada tasa de materia rocosa susceptibles a la movilización por agentes gravitacionales. En consideración a la geotecnia asociada a la

actividad minera actual, que ha eliminado la cobertura vegetal, provocando la degradación física del suelo, siendo estas superficies susceptibles a procesos erosivos, intensificados por la acción de los ríos y sus numerosas redes, así como las aguas de escorrentía producto de las precipitaciones desarrolladas en toda el área.

Unidad de relieve bajo:

Esta área corresponde a los valles intramontinos formados por la interacción estructural con la red de drenajes distributaria, comprende las altitudes más bajas y pendientes suaves, en donde se depositan materiales cuaternarios, como los aluviones generados por la acción de los agentes exógenos.

CAPÍTULO III

6 GEOLOGÍA LOCAL

6.1 GENERALIDADES

El yacimiento niquelífero de la localidad Loma de Hierro, está constituido por un complejo de peridotita-gabro, de origen secundario, dentro del cual se encuentran las peridotitas serpentinizadas, dunitas, piroxenitas, troctolitas y gabros asociados a basaltos. Esta unidad geológica se encuentra aflorando a 20 Km, al sur de la localidad de Tejerías y a 4 Km, al oeste del poblado de Tiara, cuya área abarca aproximadamente unos 21 Km de largo por unos 3 Km de ancho. La importancia geológica económica radica sobre el manto regolítico formado sobre las rocas de la asociación ofiolítica, ya que constituye el origen del yacimiento de saprolita niquelífera.

6.2 UNIDAD LITOLÓGICA

Las características litológicas en campo fueron reconocidas en los tres (3) sectores actuales de explotación (sectores I, II, III). Dentro de las cuales se encuentran afloramientos de roca basal, así como la saprolita y la laterita, todas ellas asociadas con la mineralización del níquel. El análisis de la unidad litológica se hizo en conjunto con las secciones finas de cada una de las muestras de roca tomadas durante la realización del trabajo de campo.

6.2.1 Sector I

Ubicación

El sector I se encuentra ubicado hacia la zona oeste del yacimiento, con un área aproximada de 0,647 km².

Características en campo

En el sector I se observa la presencia de goethita, saprolita cataclada, abundante sílice y aureolas de garnierita dentro de las diaclasas, magnesita, además

de afloramientos de rocas frescas y meteorizadas producto de la alta tasa de humedad dentro del sector. En este sector fueron recolectadas 3 muestras representativas, descritas a continuación:

- **Muestra:** M1-S1-1320

Ubicación: Sector I, nivel 1320 oeste

Coordenadas UTM: 1122909.645N 703263.221E

Observación de campo: corresponde a una roca constituida por una matriz olivínica, con tonalidades de gris oscuro a verde y se encuentra alterada por la serpentina y los óxidos hidróxidos de hierro. Contiene inclusiones de enstantita subhedrales, de color bronce, con tamaños de 3 a 5 mm, aproximadamente, y brillo submetálico. Su color meteorizado es pardo anaranjado y rojizo. Con respecto a los minerales de alteración, la serpentina presenta diferentes tonalidades de verde, como amarillento, negro y marrón, su hábito es fibroso laminar y se encuentra también como vetas finas. Los minerales opacos están diseminados en cristales subhedrales a euhedrales, además de vetillas negras que cortan a la roca. En cuanto a los óxidos hidróxidos, son de color pardo anaranjado y rojizo; éstos se hallan, producto de la meteorización química, Figura 6.1.



Figura 6.1. Fotografía afloramiento de peridotita ubicada en el nivel 1320 oeste del sector I.

- **Muestra:** M2-S1-1320

Ubicación: Sector I, nivel 1320 oeste

Coordenadas UTM: 1122914.388N 703258.313E

Observación de campo: la roca se encuentra constituida por una matriz olivínica, de color gris oscuro a verde, alterada por la serpentina y los óxidos hidróxidos de hierro. Presenta inclusiones de enstantita subhedrales, de color bronce, con brillo submetálico y tamaños de 3 a 5 mm, aproximadamente. Su color meteorizado es pardo anaranjado, amarillento y rojizo. Por otra parte, los minerales de alteración, como la serpentina muestran diferentes tonalidades de verdes, como amarillento, negro y marrón; su hábito es fibroso laminar, encontrándose también en forma de vetas finas de 2 a 10 mm de ancho. En el caso de los óxidos hidróxidos de hierro, estos se hallan producto de la meteorización química, sus colores son pardo anaranjado y rojizo. En cuanto a los minerales opacos, estos pueden apreciarse en color negro, como cristales subhedrales a anhedrales de 5 mm y en vetillas que cortan a la roca.

Como se observa en la Figura 6.2, el afloramiento está intensamente diaclasado, siendo estas fracturas rellenas de garnierita de color verde esmeralda, sílice amarillenta, blanca, ocre, marrón rojiza e incolora. Se logra observar también en menor proporción a la magnesita.

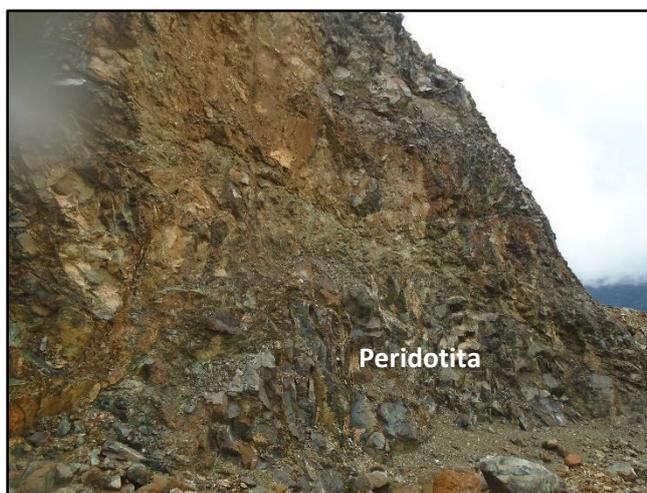


Figura 6.2. Fotografía afloramiento de peridotita intensamente diaclasado y meteorizado, ubicado en el nivel 1320 oeste del Sector I.

- **Muestra:** M3-S1-1330

Ubicación: Sector I, nivel 1330 noreste

Coordenadas UTM: 1123165.277N 703565.253E

Observación de campo: como se observa en la Figura 6.3, la roca presenta un alto grado de humedad, producto de la infiltración del agua en las diaclasas. Ésta se encuentra constituida por una matriz olivínica, de color gris oscuro a verde, siendo altamente alterada por la serpentina y por una cantidad considerable de óxidos de hierro. La enstantita se halla como inclusión, con cristales subhedrales de tamaños de 3 a 5 mm; su color es bronce con brillo submetálico. El color meteorizado de la roca es pardo anaranjado, amarillento y rojizo.

Por otra parte, los minerales de alteración como la serpentina, muestran diferentes tonalidades de verdes, como amarillento, negro y marrón; su hábito es fibroso laminar, pudiéndose observar también en forma de vetas finas de 1 a 12 mm de ancho. Los minerales opacos están dispersos en la roca con tonalidades marrón a negro, además de encontrarse como vetillas; en el caso de los óxidos de hierro, éstos son pardo anaranjado y rojizo.

En el afloramiento abundan grietas producto de la deformación de los esfuerzos tectónicos, en donde están acumuladas la garnierita, de color verde esmeralda, y variados polimorfos de óxidos de sílice, en tonos amarillentos, blanco, ocre, marrón rojiza e incolora. Se observan también concreciones de hematita.

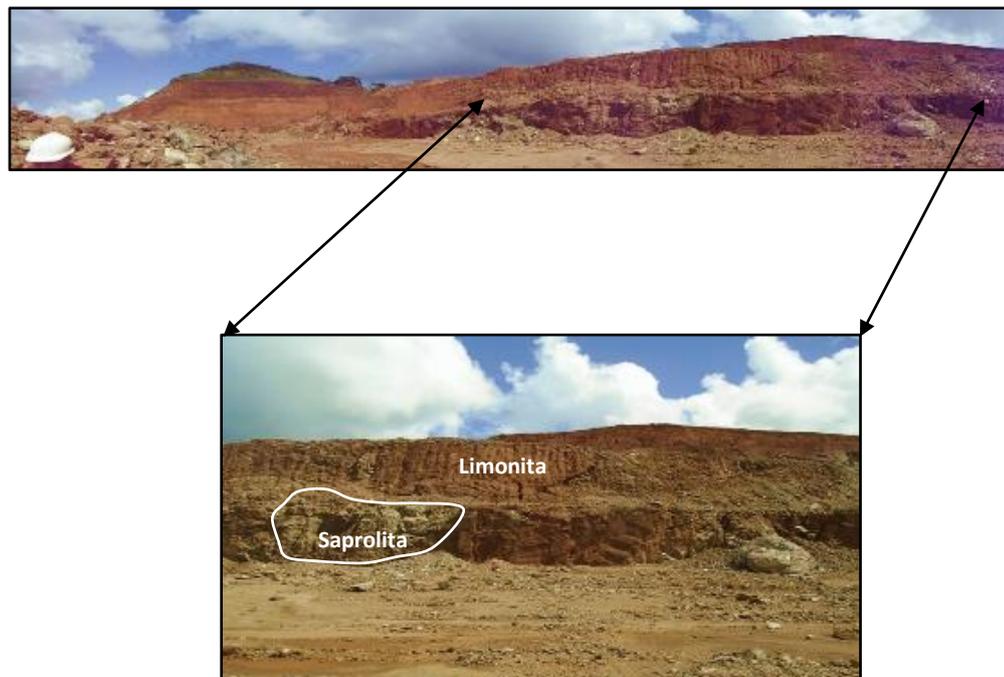


Figura 6.3. Fotografía, se puede observar la diferencia marcada que existe entre el horizonte saprolítico y la laterita por el contraste de color. Donde la laterita muestra los tonos más oscuros por el hierro, mientras que la saprolita el más claro.

Análisis petrográfico

M1-S1-1320:

En la Figura 6.4 se observa la muestra de roca seleccionada para la realización de la sección fina con el objetivo de ser analizada petrográficamente.



Figura 6.4. Representación Peridotita (Harzburgita). Muestra M1-S1-1320.

➤ **Harzburgita**

Como se observa en la Tabla 6.1, la roca presenta como mineral principal al olivino (forsterita) alterado por pequeñas cantidades de serpentina (crisotilo), seguido por ortopiroxeno correspondiente a la enstantita. La serpentina se encuentra dentro de las vetas como, alrededor del olivino, generado por la alteración mineral, producto del proceso de laterización. Por otro lado, en menor proporción, se observan minerales opacos como la magnetita y cromita, mientras que, mientras que Cr-spinela es un mineral accesorio.

Con respecto a sus rasgos texturales, esta roca es holocristalina, fanerítica, sus cristales se presentan en tamaños de medio a grueso, en su mayoría anhedrales, además se observan numerosas inclusiones, propias de una textura poiquilítica.

Mineralogía:

Olivino: Forsterita, incolora en cristales anhedrales, formando mosaico sintaxiales con colores de interferencia gris de primer orden, extinción ondulada, presenta también bordes difusos con abundancia de microfracturas rellenas con cantidades pequeñas de minerales de la serpentina (crisotilo), el cual es distintivo por su hábito fibroso, Figura 6.5A.

Ortopiroxenos: Se presenta la enstantita incolora con fenocristales de hábito prismático, hipidiomórfico con bordes difusos y maclas polisintéticas. Los minerales presentan microfracturas finas en cuyo interior está la serpentina; muestran extinción recta, algunos cristales muestran deformación asociada a altas temperaturas, Figura 6.5B.

Serpentina: Mineral de alteración del olivino y el ortopiroxeno, su color es pardo amarillento. Se presenta en forma de vetillas más o menos interconectadas con una estructura reticulada; también se observa el crisotilo con hábito fibroso y alargado.

Óxido hidróxido de hierro: Se presenta la limonita producto de la meteorización de hierro, su color es terroso.

Opacos: Se presentan pequeñas cantidades de magnetita dentro de las vetas de la serpentina, siendo éste el residuo de alteración del olivino y el piroxeno, su color es negro. Por otro lado, también se encuentra la cromita como inclusión de la Cr-espinela.

Cr-Espinela: Mineral anhedral con hábito ameboidal, de color castaño rojizo y borde irregular. Presenta algunas manchas negras correspondiente a la cromita.

Tabla 6.1. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Harzburgita. Muestra M1-S1-1320.

% Minerales Primarios				% Minerales de Alteración y Accesorios			
Ol	Opx	Cpx	Pla	Srp	Op	Cr-sp	FeOx
65	16		0	11	3	1	4

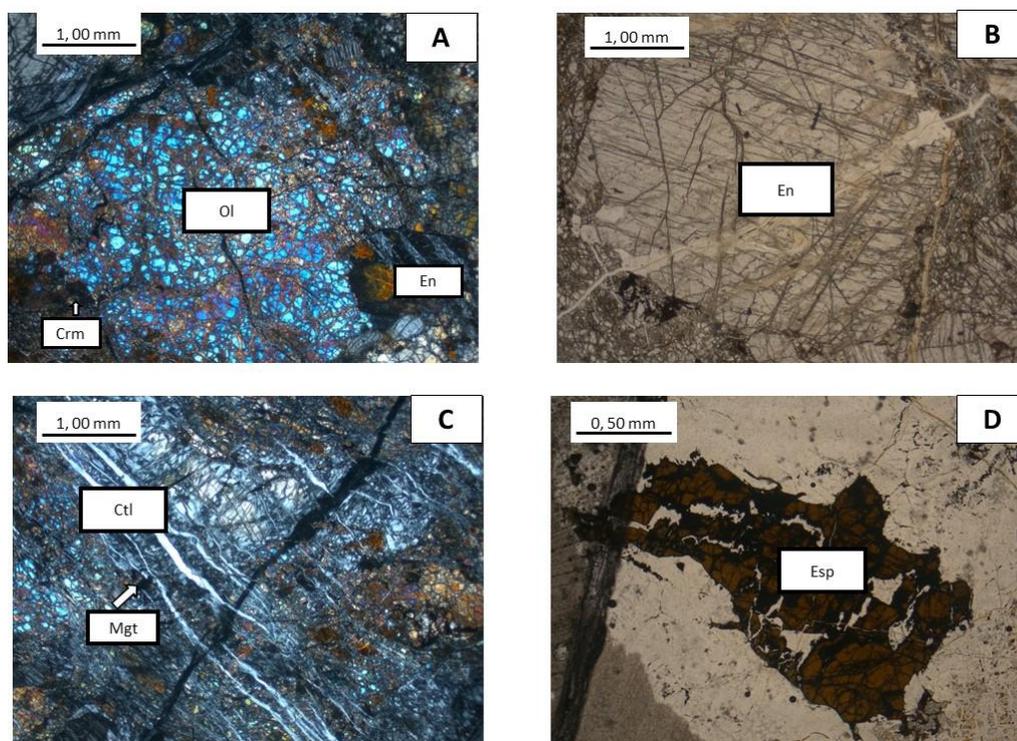


Figura 6.5. Representación petrográfica muestra de Harzburgita. A: cristales de olivino con alteraciones de cromita y enstatitas. B: Enstatita con microfracturas finas rellenas por la serpentina. C: Olivino alterado a serpentina (Crisotilo) y minerales de hierro como residuos de alteración. D: Cristal Espinela anhedral con alteraciones de cromita.

M2-S1-1320

En la Figura 6.6 se observa la muestra de roca seleccionada para la realización de la sección fina con el objetivo de ser analizada petrográficamente.



Figura 6.6. Representación Peridotita (Harzburgita). Muestra M2-S1-1320.

➤ **Harzburgita**

Como se muestra en la Tabla 6.2, la roca madre es una harzburgita que presenta como mineral mayoritario al olivino (forsterita) parcialmente alterado a serpentina; también, se observan cristales de enstantita. La serpentina se encuentra producto de la alteración de los minerales ferromagnesianos (olivino y ortopiroxenos) antes del proceso de laterización; ésta se halla dentro de las microfracturas como alrededor de los minerales mencionados anteriormente. Los minerales opacos se presentan en menor proporción, siendo estos la magnetita y cromita.

De acuerdo a sus rasgos texturales, esta roca es holocristalina, con cristales faneríticos de medio a grueso, éstos son anhedrales, es decir, presentan una textura alotriomórfica; también se observan numerosas inclusiones de cristales correspondiente a la textura poiquilítica.

Mineralogía:

Olivino: Forsterita, incolora, sus cristales son anhedrales y masivos, muestra bordes difusos y microfracturas, color de interferencia gris de primer orden y extinción ondulatoria. Presenta inclusiones de magnetita producto de la alteración a la serpentina.

Ortopiroxenos: Se presenta la enstantita incolora, con fenocristales de bordes difusos y distorsionados producto de la alteración a la serpentina. Presenta bandas producto de la deformación plástica (Figura 6.7A), en cuyo interior está la serpentina como mineral de alteración; su extinción es recta.

Serpentina: Color pardo amarillento, con hábito fibroso y alargado en el caso del crisotilo; muestra una estructura reticulada con colores de interferencia de primer orden. Se halla alrededor del olivino, además de estar en forma de vetas interconectadas.

Óxido hidróxido de hierro: Se presenta la limonita alterando a los remanentes del olivino producto de la meteorización de hierro, su color es terroso.

Opacos: Se encuentra magnetita dentro de las vetas de la serpentina como residuo de la alteración de los minerales ferromagnesianos, su color es negro, se encuentra en la misma dirección de la alteración. La cromita es de color negro y se encuentra como inclusión de Cr-espínela.

Cr-Espínela: Color castaño rojizo, hábito ameboidal con cristales, Figura 6.7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.B.**

Tabla 6.2. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Harzburgita. Muestra M2-S1-1320.

% Minerales Primarios				% Minerales de Alteración y Accesorios			
OI	Opx	Cpx	Pla	Srp	Op	Cr-sp	FeOx
70	15	0	0	11	1	1	2

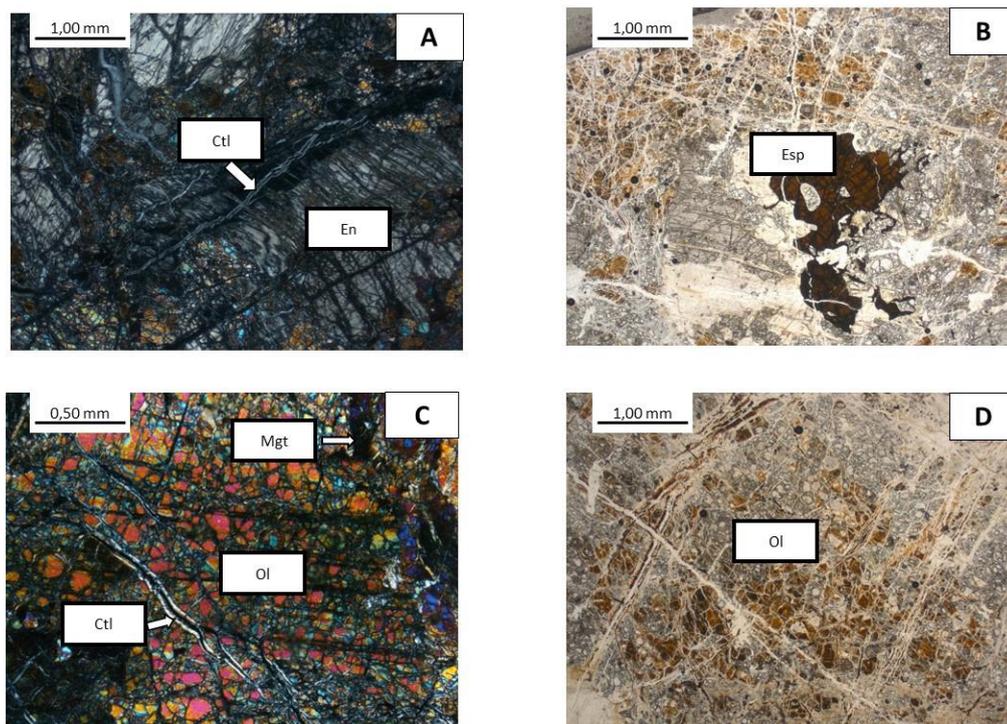


Figura 6.7. Representación petrográfica muestra de Harzburgita. A: Enstatita con alteraciones de serpentina (crisotilo). B: Espinela con cristales de olivino alterados a óxidos de hierro. C: Olivino alterado a serpentina (Crisotilo) y minerales de hierro producto de la alteración. D: Cristales de Olivinos en nicoles paralelos.

M3-S1-1330

En la Figura 6.8, se observa la muestra de roca seleccionada para la realización de la sección fina con el objetivo de ser analizada petrográficamente.



Figura 6.8. Representación de Serpentinita. Muestra M3-S1-1330.

➤ **Serpentinita**

Como se observa en la Tabla 6.3, la roca madre se caracteriza por, todavía presentar una cantidad importante de olivino con un grado mayor de alteración de serpentina, y minerales ortopiroxenos, como la enstantita con, un grado considerable de deformación, y mayor grado de porosidad debido a la disolución de los granos de olivino. Está constituida principalmente por la serpentina, que se encuentra en vetas interconectadas y alrededor de los bordes del olivino, como producto de alteración durante el proceso de laterización. Por otro lado, están los minerales opacos, como la cromita y magnetita, mientras que como accesorio la Cr-espinela.

Con respecto a sus rasgos texturales, la roca es holocristalina, con cristales faneríticos de medio a grueso, estos son anhedrales, es decir, presentan una textura alotriomórfica; también se observan numerosas inclusiones de cristales, correspondiente a la textura poiquilítica, así como bordes de reacción.

Mineralogía:

Olivino: Forsterita, es incolora, sus cristales son anhedrales, extinción ondulatoria, con hábito reticular enrejado por las vetillas de la serpentina. Muestra bordes difusos propio de la alteración sufrida por el protolito antes del proceso de laterización; además, de microfracturas gruesas.

Ortopiroxenos: La enstantita es incolora, con base en sus concentraciones de magnesio, característica de este tipo de piroxeno, con fenocristales prismáticos y muy deformados, muestra bordes difusos producto de la alteración a serpentina; presenta maclas polisintéticas y muestra microfracturas gruesas rellenas de serpentina, Figura 6.9A.

Serpentina: Color pardo amarillento, en forma de vetas y fibras alargadas características del crisotilo; muestra una estructura reticulada y sus colores de interferencia son grises de primer orden. Este mineral se forma producto de la alteración del olivino y el ortopiroxeno, Figura 6.9C.

Óxido hidróxido de hierro: Se presenta la limonita alterando a los remanentes del olivino producto de la meteorización de hierro, su color es terroso.

Opacos: Se presenta la magnetita de color negro, como inclusión dentro de la serpentina, como residuo de alteración de los minerales ferromagnesianos. La cromita es de color negro; también se encuentra como inclusión de Cr-espínela.

Cr-espínela: Color castaño rojizo, con formas más o menos ameboidales, en cristales anhedrales, Figura 6.9D. Se observan algunos cristales alrededor del ortopiroxeno y el olivino.

Tabla 6.3. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M3-S1-1330.

% Minerales Primarios				% Minerales de Alteración y Accesorios			
Ol	Opx	Cpx	Pla	Srp	Op	Cr-sp	FeOx
22	10	0	0	64	1	1	2

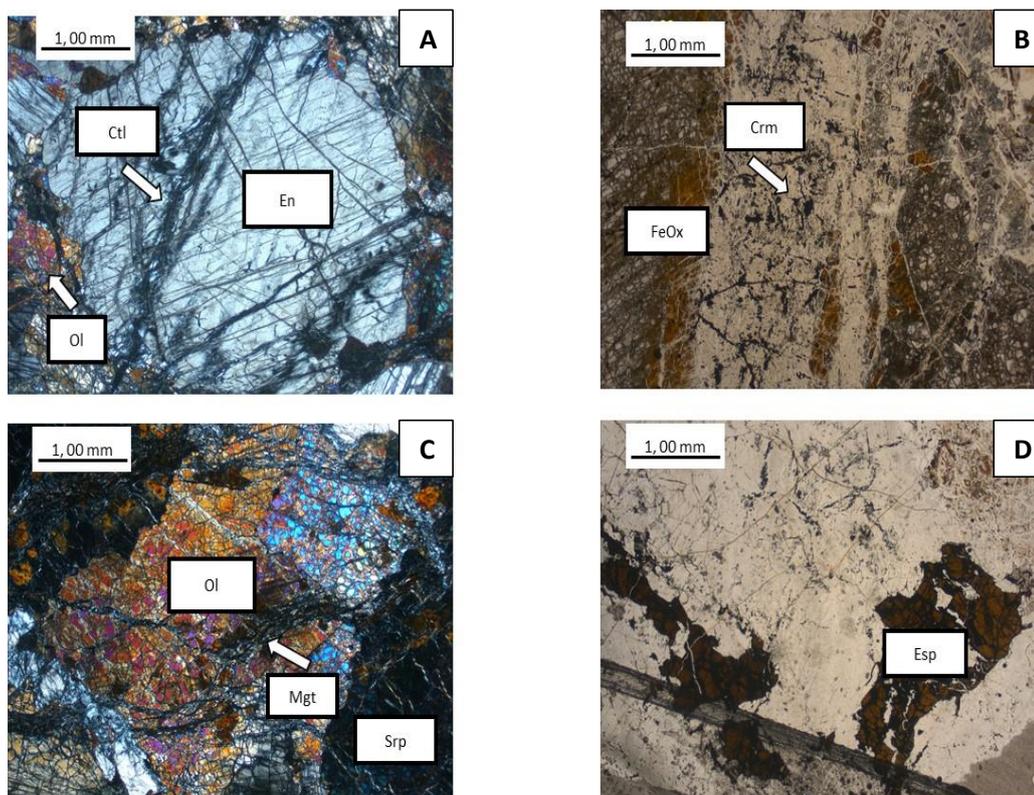


Figura 6.9. Representación petrográfica muestra de Serpentinita. A: Enstatita con alteraciones de serpentinita (crisotilo), con algunos cristales de olivino. B: cristales de cromita, con olivinos alterados a óxidos de hierro. C: Olivino alterado a serpentinita con pequeños cristales de magnetita. D: granos de Espínelas anhedrales.

6.2.2 Sector II

Ubicación

El sector II está ubicado hacia la zona central del yacimiento, y abarca un área aproximada de 0,9030 km².

Características en campo

Es el sector, más afectado por los trabajos mineros realizados anteriormente, además, está muy alterado por los procesos del intemperismo químico. En el mismo, se logra observar el perfil completo de meteorización, es decir a la laterita, la saprolita que se halla muy alterada, y por último, a la roca basal. Por otro lado, el proceso de cataclasis es marcado, se aprecian aureolas de garnierita y sílice formados dentro de las fracturas de las rocas. En este sector fueron recolectadas tres (3) muestras representativas, nombradas a continuación:

- **Muestra:** M1-S2-1240

Ubicación: Sector II, nivel 1240 este

Coordenadas UTM: 1124126.291N 705221.924E

Observación de campo: corresponde a una roca serpentinita constituida por una matriz olivínica de color gris oscuro, verde y negro; se halla intensamente alterada por la serpentina y los óxidos de hierro. La misma se encuentra muy meteorizada; su color es anaranjado, amarillento, pardo, ocre. La enstantita presenta cristales subhedrales, con tamaños de 3 a 5 mm; su color es bronce con brillo submetálico. Con respecto a los minerales de alteración, la serpentina se halla en forma de fibras laminares y vetas de espesor de 2 a 9 mm, con diferentes tonalidades de verde, marrón, negro, pardo amarillento, blanco. Los minerales opacos se muestran en colores negros, diseminados en cristales euhedrales y subhedrales; se encuentran también en forma de vetillas finas. En cuanto a los óxidos hidróxidos de hierro están en el interior de las vetas; tienen tonalidades ocre, anaranjadas y rojizas.

En el afloramiento se encuentran fracturas por causa de la deformación en el sector, estando las rocas en gran parte disgregadas, Figura 6.10. Dentro de las

diaclasas están acumuladas la garnierita, de color verde esmeralda y la sílice amarillenta, blanca, ocre, marrón rojiza e incolora.



Figura 6.10. Fotografía de Serpentinita, ubicada en nivel 1240 este del sector II. Afloramiento fuertemente diaclasado.

- **Muestra:** M2-S2-1270

Ubicación: Sector II, nivel 1270 noreste

Coordenadas UTM: 1124081.838N 704946.194E

Observación de campo: como se observa en la Figura 6.11, la roca es una serpentinita constituida por una matriz olivínica de color gris, verde y negro; está intensamente alterada por la serpentinización y los óxidos hidróxidos de hierro. Se encuentra con un grado importante de meteorización, su color meteorizado es anaranjado, amarillento, pardo, ocre. La enstantita muestra cristales subhedrales y euhedrales, con tamaños de 2 a 5 mm; su color es bronce, con brillo submetálico. Con respecto a los minerales de alteración, la serpentina se halla en gran cantidad en forma de fibras laminares y vetillas de espesor entre 2 y 9 mm, con diferentes tonalidades de verdes, negras, amarillentas, blancas. Los minerales opacos se presentan con colores negros, en cristales anhedrales y subhedrales diseminados, así como en forma de vetas finas cortando a la roca. Los óxidos hidróxidos de hierro tienen tonalidades ocre, anaranjadas, marrones y rojizas, marcando así el alto grado de afectación producto de la meteorización química; también se observa, en menor proporción, la magnesita.

En el afloramiento las rocas están muy disgregadas y fracturadas producto de la deformación que existe en el sector, lo cual permite la infiltración del agua, por lo que presentan un alto grado de humedad. Dentro de las diaclasas están acumuladas en gran proporción, tanto la garnierita de color verde esmeralda, como la sílice de tonos amarillentos, blancos, ocre, marrón rojizos e incoloros.

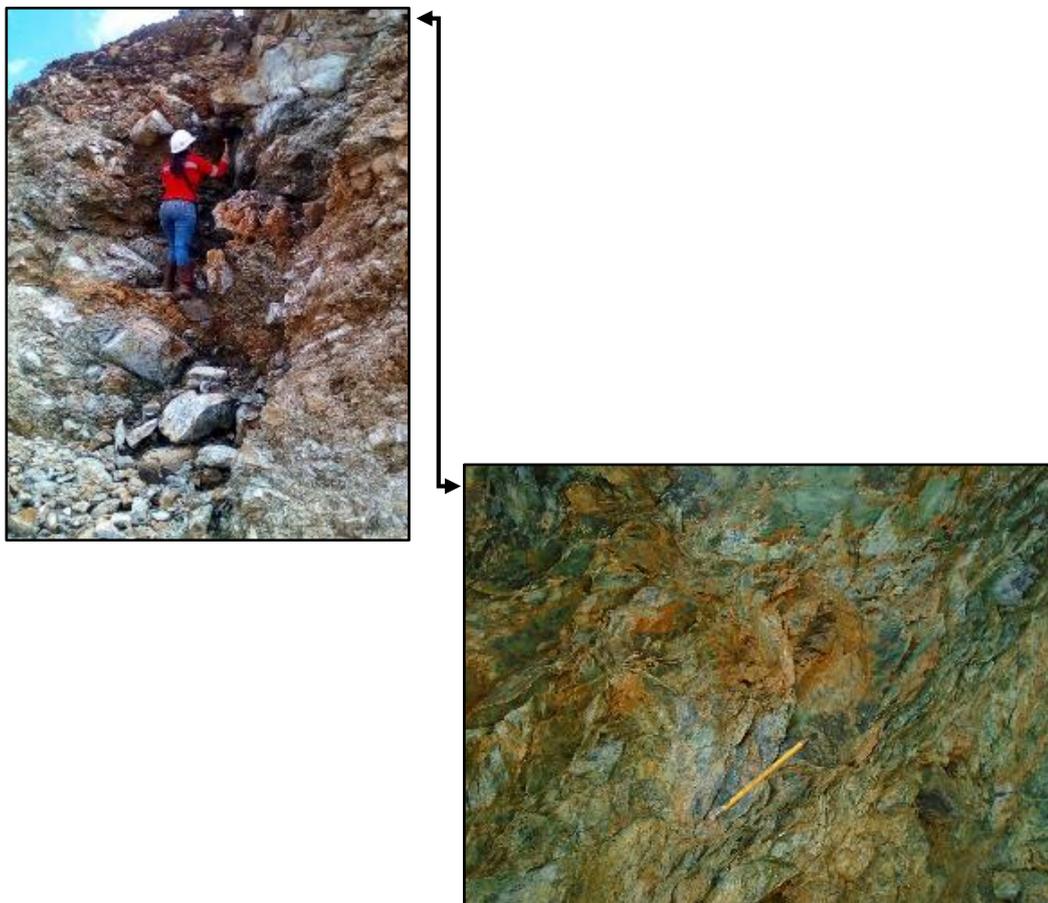


Figura 6.11. Fotografía afloramiento de Serpentinitas, ubicado en el nivel 1270 noreste en el sector II. Con alta concentración de óxidos de hierro, además de estar altamente diaclasado, permitiendo la infiltración del agua.

- **Muestra:** M3-S2-1270

Ubicación: Sector II, nivel 1270 noreste

Coordenadas UTM: 1124025.385N 704949.349E

Observación de campo: la roca es una serpentinita constituida por una matriz olivínica de color gris, negro y verde, se encuentra alterada producto de la serpentina y los óxidos hidróxidos de hierro. Presenta un grado importante de meteorización; su color meteorizado es anaranjado, amarillento, pardo y ocre. Por otro lado, la enstantita está en gran proporción, los cristales son euhedrales con tamaños de 3 a 5 mm y su color es bronce con brillo submetálico.

La serpentina presenta hábito fibroso laminar y en vetillas de espesor entre 1 y 10 mm, con diferentes tonalidades de verde, negro y blanco. Los minerales opacos tienen una coloración negra, se encuentran como inclusiones dispersas en cristales anhedrales y subhedrales, así como en vetas muy finas. Los óxidos hidróxidos de hierro tienen tonalidades ocre, marrones y rojizas, marcando de esta manera el intenso grado de meteorización química en el que se encuentra la roca.

Dentro del afloramiento, las rocas están fracturadas como producto a la deformación; se observaron pocas diaclasas rellenas por la garnierita, mientras que la sílice se muestra con tonos amarillentos, blancos, ocre, marrón rojizo e incoloros, Figura 6.12.



Figura 6.12. Fotografía afloramiento de saprolita dominado por Serpentinitas, ubicado en nivel 1270 noreste del sector II. Este se encuentra con alta concentración de óxidos de hierro, además de presentar diaclasas rellenas por la sílice.

Análisis petrográfico

M1-S2-1240

En la Figura 6.13 se observa la muestra de roca seleccionada para la realización de la sección fina con el objetivo de ser analizada petrográficamente.



Figura 6.13. Representación Serpentinita. Muestra M1-S2-1240.

➤ Serpentinita

Como se muestra en la Tabla 6.4, la roca presenta como componente principal a la serpentina como reemplazamiento del olivino y el ortopiroxeno. Se caracteriza por sus vetillas interconectadas y en forma de fibras alargadas común del crisotilo. Además, se logra observar como la textura de la roca se pierde por la alteración, reduciendo así la porosidad de la misma. La roca se encuentra meteorizada, los minerales opacos correspondientes a óxidos de hierro son la magnetita y cromita, como inclusiones; por otro lado, como accesorio está la Cr-espínela.

Respecto a sus rasgos texturales, es holocristalina, con cristales faneríticos de finos a gruesos; estos son anhedrales, es decir presentan una textura alotriomórfica. También, se observan numerosas inclusiones de cristales correspondientes a la textura poiquilítica, así como bordes de reacción de óxidos de hierro.

Mineralogía

Serpentina: Su color es pardo amarillento; se presenta en forma de vetas interconectadas y fibras alargadas gruesas características del crisotilo, Figura 6.14A. Tiene colores de interferencia gris, de primer orden. Este mineral se forma producto de la alteración del olivino, se encuentra alrededor y en fracturas del ortopiroxeno alterándolo; muestra también inclusiones de magnetita.

Ortopiroxeno (Enstantita): Incoloro, con fenocristales prismáticos y bordes difusos, producto de la alteración a la serpentina. Presenta maclas polisintéticas y extinción recta, con colores de interferencia de primer orden. Se muestran microfracturas finas rellenas por la serpentina, así como cristales muy deformados, 6.14B.

Óxido hidróxido de hierro: Se halla la limonita producto de la meteorización de hierro, su color es terroso.

Opacos: Se halla la magnetita de color negro; está como inclusión de la serpentina, siendo el residuo de alteración de la misma. Por otra parte, la cromita es de color negro como asociación de la espinela y la serpentina. Se encuentran bordes de reacción de óxidos de hierro producto del proceso de laterización.

Cr-espinela: Presenta hábito ameboidal; su color es castaño rojizo, muestra inclusiones de cromita.

Tabla 6.4. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M1-S2-1240.

% Minerales Primarios				% Minerales de Alteración y Accesorios			
Ol	Opx	Cpx	Pla	Srp	Op	Cr-sp	FeOx
0	10	0	0	72	2	2	14

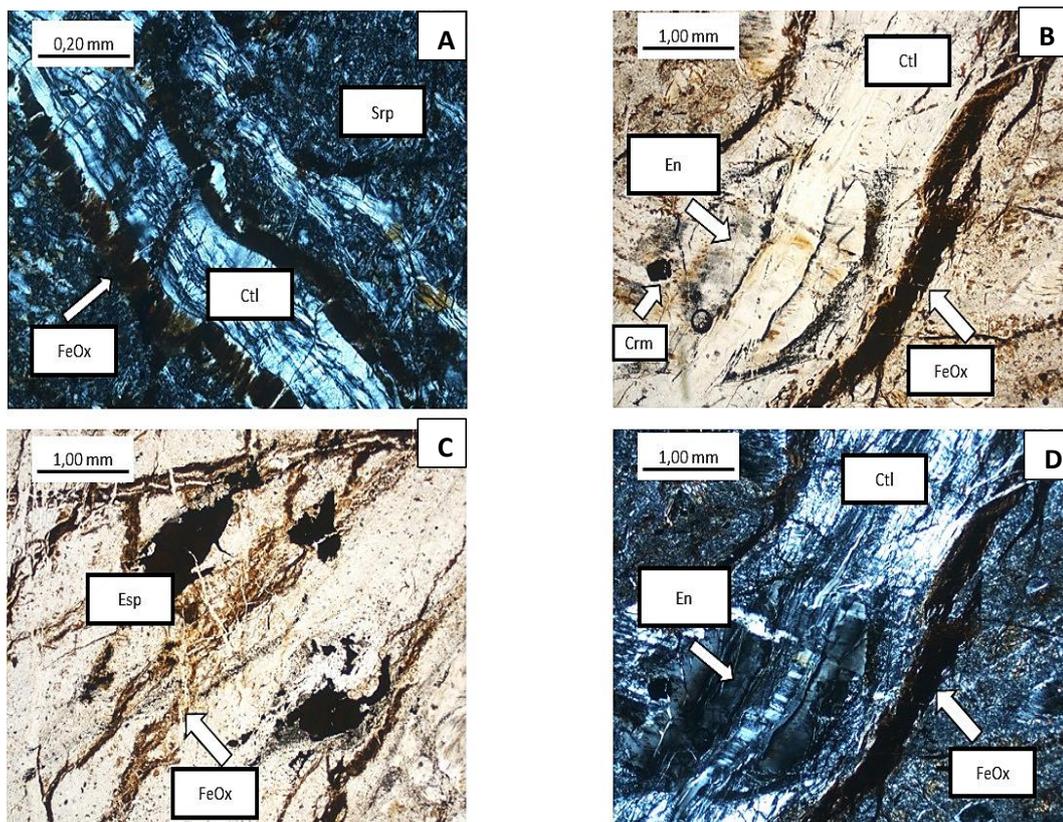


Figura 6.14. Muestra de Serpentina. A: Alteración completa del olivino a la serpentina (Crisotilo), con oxidaciones de hierro. B: Grano de enstantita alterada a serpentina, con cristales euhedrales de cromita y óxidos de hierro. C: Cristales de espinela con óxidos de Fe. D: Grano de enstantita completamente alterada, con microfracturas rellenas por la serpentina (crisotilo).

M2-S2-1270

En la Figura 6.15, se observa la muestra de roca seleccionada para la realización de la sección fina, con el objetivo de ser analizada petrográficamente.



Figura 6.15. Representación Serpentina. Muestra M2-S2-1270.

➤ **Serpentinita**

Como se observa en la Tabla 6.5, la roca tiene como mineral mayoritario a la serpentina en forma de retículas y vetillas interconectadas. Dicho mineral se forma producto de la alteración y completo reemplazo de la peridodita (protolito) durante el proceso de laterización. Se observan cristales de ortopiroxenos los cuales muestran microfracturas finas en cuyo interior se halla la serpentina.

Respecto a los minerales los opacos (magnetita y cromita) se encuentran como inclusión con textura poiquilítica y están en menor proporción que la Cr-espinela. La roca se encuentra con un grado de oxidación importante producto de la meteorización.

De acuerdo a las observaciones, la roca se presenta con porosidad muy reducida, sus cristales son anhedrales, es decir, presentan una textura alotriomórfica; también, se observan numerosas inclusiones de cristales correspondientes a la textura poiquilítica.

Mineralogía

Serpentina: Color pardo amarillento, se presenta en forma de vetas y como fibras alargadas correspondientes al crisotilo (Figura 6.16D), así como alrededor y en microfracturas del ortopiroxeno. Presenta color de interferencia gris de primer orden; muestra una estructura reticulada propia de este mineral y dentro de las vetas se encuentran inclusiones de magnetita y cromita.

Ortopiroxeno (Enstantita): Incoloro, con fenocristales de hábito prismático, muestra maclas polisintéticas, con colores de interferencia de primer orden. Presenta bordes difusos debido a que está alterado por la serpentina; se observan cristales deformados con microfracturas finas.

Óxido hidróxido de hierro: Se halla la limonita producto de la meteorización de hierro, su color es terroso.

Opacos: Se halla la magnetita de color negro dentro de las vetas de la serpentina, como nueva mineralogía de su propia la alteración; también está la cromita

de color negro (Figura 6.16B) como inclusión del Cr-espínela y asociado a la serpentina. Debido a la propia meteorización de la roca, se presenta oxidación en los bordes de algunos cristales y en forma de retículas.

Cr-espínela: Presenta hábito ameboidal, su color es castaño rojizo y muestra inclusiones de cromita, Figura 6.16C.

Tabla 6.5. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M2-S2-1270.

% Minerales Primarios				% Minerales de Alteración y Accesorios			
Ol	Opx	Cpx	Pla	Srp	Op	Cr-sp	FeOx
0	12	0	0	70	5	2	11

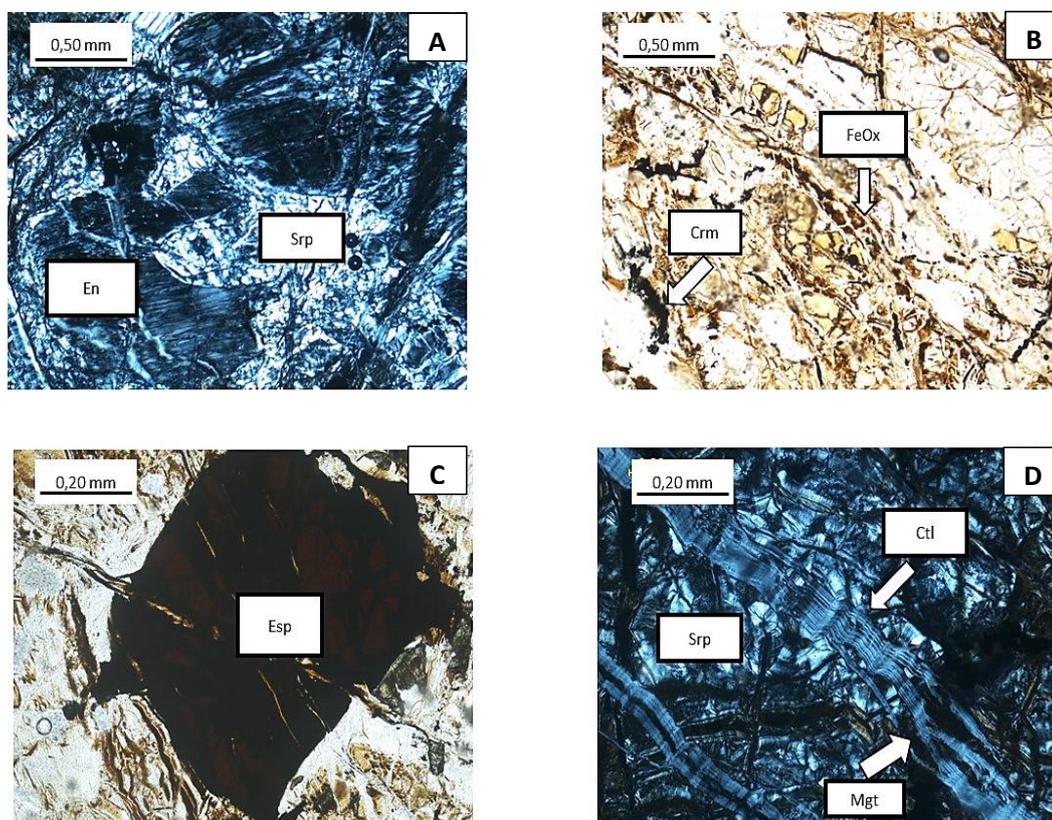


Figura 6.16. Representación petrográfica muestra de Serpentinita. A: Alteración completa del olivino y la enstatita a la serpentina. B: Cristales de olivinos completamente alterados por óxidos de Fe, con cristales anhedral de cromita. C: Cristal de espínela anhedral y óxidos de Fe. D: Serpentinita (Crisotilo) con su característico hábito fibroso, también se observa a la magnetita dentro de las microfracturas como residuo de la alteración.

M3-S2-1270

En la Figura 6.17, se observa la muestra de roca seleccionada para la realización de la sección fina con el objetivo de ser analizada petrográficamente.



Figura 6.17. Representación Serpentinita. Muestra M3-S2-1270.

➤ **Serpentinita**

Como se muestra en la Tabla 6.6, la roca presenta como mineral mayoritario a la serpentina, producto de la alteración del olivino y la enstantita. Se logra observar el ortopiroxeno (enstantita) la cual se halla con microfracturas, reemplazados casi por completo por la serpentina. Por otra parte, (magnetita y cromita) se encuentran como inclusión con textura poiquilítica y están en menor proporción que la Cr-spinela.

De acuerdo a las observaciones, la roca se presenta con porosidad muy reducida, sus cristales son anhedrales, es decir, presentan una textura alotriomórfica; también, se observan numerosas inclusiones de cristales correspondientes a la textura poiquilítica.

Mineralogía

Serpentina: Es pardo amarillento con colores de interferencia gris de primer orden, se presenta en forma de vetas interconectadas, su estructura es reticular. El mineral asociado dentro del grupo de la serpentina es el crisotilo, el cual muestra

un hábito fibroso y alargado; la magnetita se halla como inclusión dentro de las vetas.

Ortopiroxeno (Enstantita): Es incoloro, presenta fenocristales de hábito prismático, con bordes difusos, producto de la alteración de la serpentina. Tiene maclas polisintéticas (Figura 6.18A) y extinción recta, sus colores de interferencia son del primer orden; se observan cristales muy deformados y con microfracturas rellenas por la serpentina.

Óxido hidróxido de hierro: Se halla la limonita producto de la meteorización de hierro, su color es terroso.

Opacos: Se observa la magnetita de color negro, como residuo de la alteración a la serpentina, ésta se halla dentro de las vetas. Por otro lado, también se encuentra la cromita como inclusión de la Cr-espinela y asociada a la serpentina, su color es negro. Se encuentran óxidos producto de la propia meteorización de la roca, los cuales presentan tonalidades terrosas, que se hallan como bordes de reacción y en forma de retículas, (Figura 6.18D).

Cr-espinela: Presenta hábito ameboidal, su color es castaño rojizo y muestra inclusiones de cromita (Figura 6.18B).

Tabla 6.6. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M3-S2-1270.

% Minerales Primarios				% Minerales de Alteración y Accesorios			
Ol	Opx	Cpx	Pla	Srp	Op	Cr-sp	FeOx
0	10	0	0	70	2	2	14

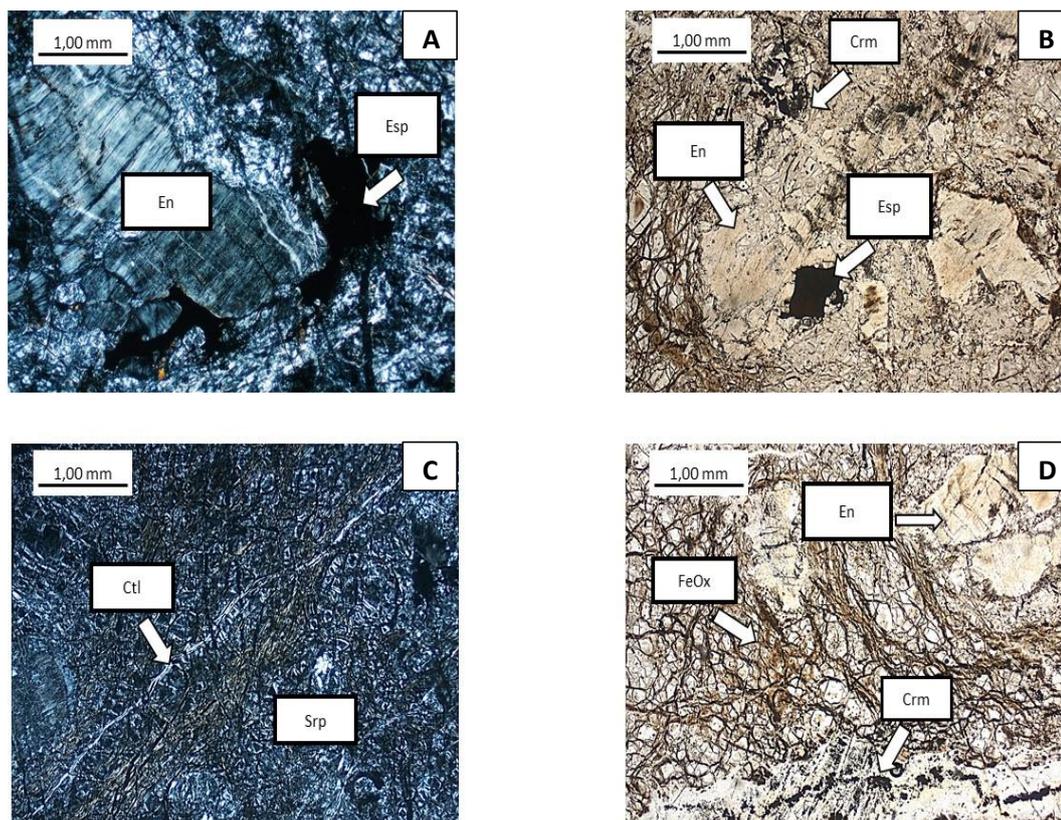


Figura 6.18. Representación petrográfica muestra de Serpentinita. A: Alteración del olivino y la enstatita a serpentina, también se observa a la espinela como residuo producto de la alteración. B: Grano de enstatita completamente alterado por óxidos de Fe, con cristales anhedrales de cromita y euhedrales de espinela. C: Serpentina, con una fibra de crisotilo. D: Alteración de la roca a óxidos de Fe, cristales de cromita. En la parte derecha de la foto se observa la enstatita con su clivaje característico.

6.2.3 Sector III

Ubicación

El sector III está ubicado hacia la zona este del yacimiento y abarca un área aproximada de 0,361 km².

Características en campo

El espesor de la saprolita es menor con respecto a los demás sectores, el contenido de hierro se presenta con gran abundancia, por lo que la laterita y saprolita son más ferrosas. La humedad es alta, las rocas se encuentran muy alteradas; el gabro se halla dentro de la saprolita ferrosa, mientras que en algunas zonas se observan trazas de garnierita y cristales de polimorfos de óxido de sílice dentro de las

diaclasas. En este sector fueron recolectadas dos (2) muestras. Las mismas se mencionan a continuación:

- **Muestra:** M2-S3-1180

Ubicación: Sector III, nivel 1180 este

Coordenadas UTM: 1124770.963N 707117.104E

Observación de campo: corresponde a una roca serpentinita constituida por una matriz olivínica, de colores: gris, negro y verde; se encuentra muy alterada producto de la serpentina y los óxidos de hierro. Presenta una capa superficial de colores: anaranjado, amarillento, pardo y ocre, producto del intemperismo. Por otro lado, la enstantita muestra cristales subhedrales de tamaños entre 2 y 5 mm; su color es bronce con brillo submetálico.

La serpentina presenta hábito fibroso laminar y en vetillas, cortando a la roca, con un espesor de 1 a 8 mm; tiene diferentes tonalidades de verde, negro y blanco. Los minerales opacos tienen una coloración negra; se encuentran diseminados en cristales anhedrales y subhedrales, así como en vetas muy finas. Los óxidos hidróxidos de hierro son ocre, anaranjado, marrón y rojizo, estos se hallan producto del alto grado de meteorización química que afecta la roca, Figura 6.19A.

Dentro del afloramiento las rocas están fracturadas, producto de la deformación; las diaclasas están rellenas por la garnierita (Figura 6.19B), de color verde esmeralda, como cristales de polimorfos de óxido de sílice de tonos: amarillentos, blancos, ocre, marrón rojizos e incoloros.

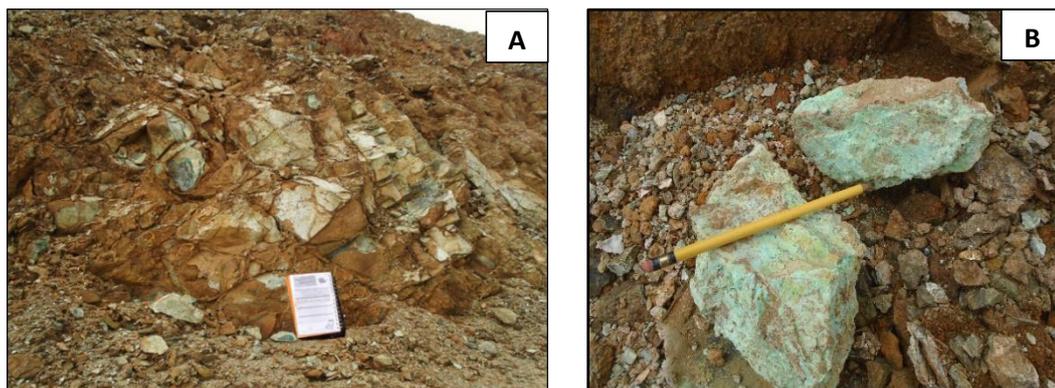


Figura 6.19. Fotografía A: Afloramiento de Serpentinitas alteradas por la meteorización, con alto contenido de óxidos de Fe. B: Muestras de garnierita encontradas en el afloramiento. Ubicado en el nivel 1180 este del sector III.

- **Muestra:** M3-S3-1185

Ubicación: Sector III, nivel 1180 noreste

Coordenadas UTM: 1124527.731N 706547.520E

Observación de campo: es una roca serpentinita conformada por una matriz olivínica, de color gris, negro y verde, se encuentra alterada por la serpentina y los óxidos de hierro; muestra una capa superficial de color anaranjado, amarillento, pardo y ocre, producto de la meteorización. Por otro lado, la enstantita presenta cristales subhedrales, con tamaños de 3 a 5 mm y su color es bronce con brillo submetálico.

La serpentina presenta hábito fibroso laminar y en forma de vetillas, con un espesor de 1 a 6 mm; tiene diferentes tonalidades de verdes, negro y blanco. Los minerales opacos son negros, se encuentran diseminados en cristales anhedrales y subhedrales, además en vetas muy finas. Como se muestra en la Figura 6.20A, la roca se muestra con una meteorización química intensa, los óxidos hidróxidos de hierro son de colores ocre, anaranjado, marrón y rojizo. La magnesita, por su lado, se encuentra cortando a la roca en forma de vetillas finas.

El afloramiento se encuentra altamente diaclasado producto de la deformación; dichas fracturas están rellenas por la garnierita de color verde esmeralda y la sílice de tonos amarillentos, blancos, ocre, marrón rojizos e incoloros (Figura 6.20B).

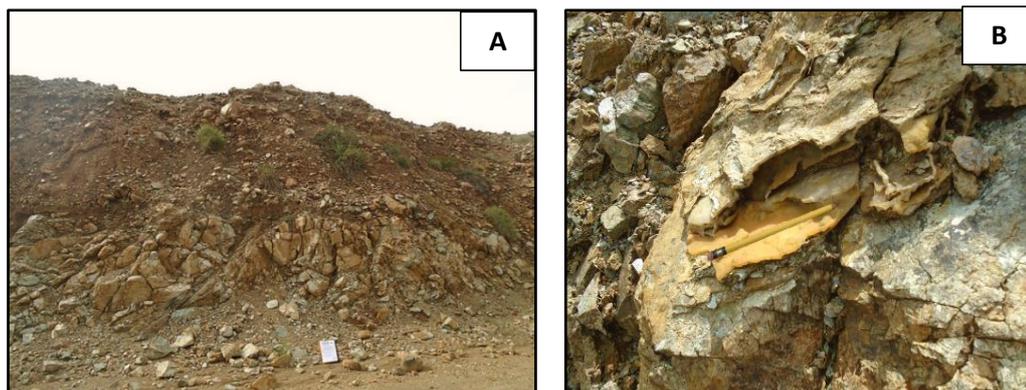


Figura 6.20. Fotografía A: Afloramiento de serpentinitas con alto contenido de óxidos de Fe, muy intervenido por los trabajos mineros. B: Recristalización de polimorfo de óxido de sílice hallado dentro de las diaclasas de la serpentinita. Ubicado en el nivel 1180 noreste, sector III.

Análisis petrográfico

M2-S3-1180

En la Figura 6.21, se observa la muestra de roca seleccionada para la realización de la sección fina con el objetivo de ser analizada petrográficamente.



Figura 6.21. Muestra Serpentinita. Muestra M2-S3-1180.

➤ Serpentinita

Como se observa en la Tabla 6.7, el mineral mayoritario de la roca es la serpentinita, la cual presenta una estructura reticulada; se halla en forma de vetas y en fibras alargadas características del crisotilo. Seguido, está la enstantita serpentinitizada con microfracturas finas, embebidas en algunos casos, en aureolas de alte-

ración producto de la serpentización. Los minerales opacos hallados son: la hematita que se encuentra como bordes de reacción, la cromita asociada a la serpentina y la magnetita dentro de las vetas. Por otro lado, como mineral accesorio está la Cr-espinela.

El grado de meteorización de la roca es mayor con respecto al observado en el sector I y II, respectivamente, ya que en ésta la limonitización superficial es más marcada, dándole un color terroso a la muestra. Por otra parte, de acuerdo a sus rasgos texturales, es holocristalina con cristales faneríticos de finos a gruesos; éstos son anhedrales, es decir presentan una textura alotriomórfica. También se observan numerosas inclusiones de cristales correspondientes a la textura poiquilítica, así como bordes de reacción producto del proceso de laterización, desarrollando bordes de óxidos de hierro.

Mineralogía

Serpentina: Color pardo amarillento con color de interferencia gris de primer orden; se halla en forma de vetas reemplazando casi en su totalidad al ortopiroxeno. También se encuentra en forma de fibras alargadas correspondiéndose al hábito del crisotilo. Dicho mineral resulta de la alteración de los minerales ferromagnesianos, olivino y enstantita (Figura 6.22A). Presenta inclusiones de magnetita y cromita.

Ortopiroxeno (Enstantita): Incoloro, fenocristales deformados con maclado polisintético y extinción recta, con colores de interferencia de primer orden. Muestra bordes difusos producto de la alteración (Figura 6.22C), presenta microfrazas finas en cuyo interior se hallan inclusiones de cromita y magnetita; algunos cristales se encuentran embebidos dentro de la serpentina.

Óxido hidróxido de hierro: Debido a la meteorización química de los óxidos de hierro presentes en la roca producto de su hidratación, se encuentran óxidos que dan esa tonalidad terrosa a la muestra, en forma de retículas (Figura 6.22D).

Opacos: Se presenta la hematita de color marrón rojizo en los bordes de reacción. Por otra parte, se encuentra la magnetita de color negro con hábito octaédrico, producto de la alteración de la serpentina; mientras que la cromita, negra y amorfa, está, como asociación de la serpentina y como inclusión en la Cr-espinela.

Cr-espinela: Presenta hábito ameboidal, su color es castaño rojizo, muestra inclusiones de cromita.

Tabla 6.7. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M2-S3-1180.

% Minerales Primarios				% Minerales de Alteración y Accesorios			
Ol	Opx	Cpx	Pla	Srp	Op	Cr-sp	FeOx
0	10	0	0	70	2	2	16

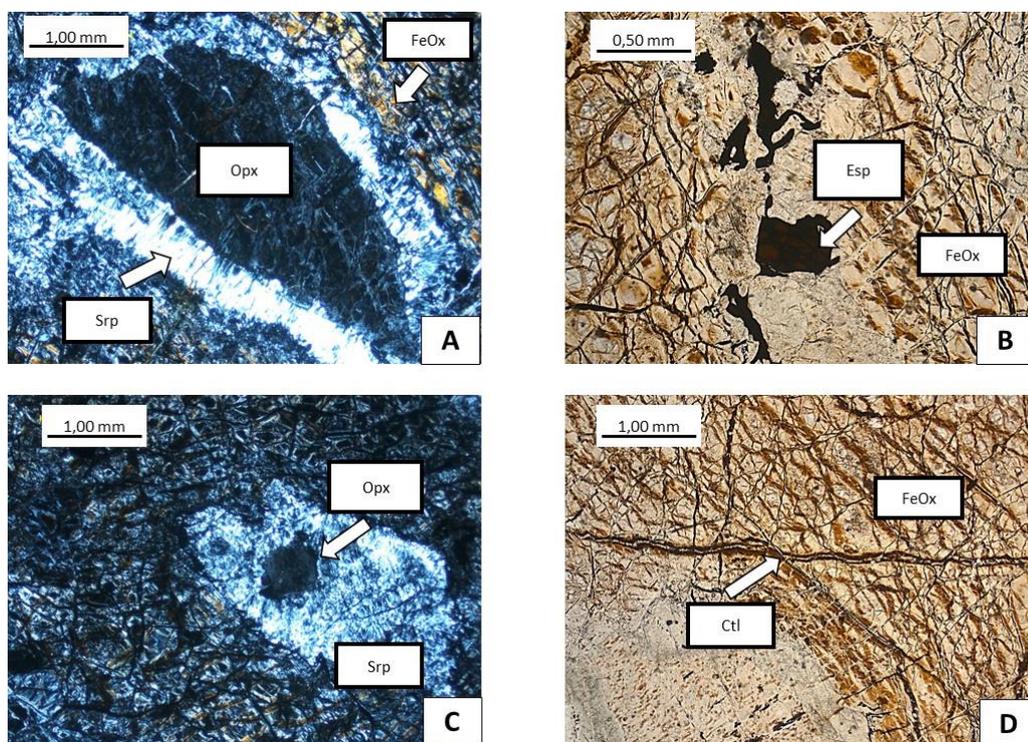


Figura 6.22. Representación petrográfica muestra de Serpentinita. A: Ortopyroxeno embebido en la aureola de alteración de la serpentinita B: Espinelas anhedrales, con óxidos de Fe. C: Ortopyroxeno embebido en un cristal de serpentinita. D: Alteración de la roca a óxidos de Fe, dándole el color terroso a la muestra, también se encuentra la magnetita, y fibras correspondientes al crisotilo.

M3-S3-1185

En la Figura 6.23 se observa la muestra de roca seleccionada para la realización de la sección fina con el objetivo de ser analizada petrográficamente.



Figura 6.23. Representación Serpentinita. Muestra M3-S3-1185.

➤ **Serpentinita**

Como se muestra en la Tabla 6.8, el mineral mayoritario de la roca es la serpentina, la cual presenta una estructura reticulada; se halla en forma de vetas y en fibras alargadas características del crisotilo. Seguido, están algunas pequeñas cantidades del mineral enstantita reemplazado casi por completo por la serpentina. Los minerales opacos hallados son: la hematita que se encuentra como bordes de reacción, la cromita asociada a la serpentina y la magnetita dentro de las vetas. Por otro lado, como mineral accesorio está la Cr-espinela.

El grado de meteorización de la roca es mayor con respecto al observado en los sectores I y II, respectivamente, debido a la alteración superficial de la limonita, producto de la hidratación que ha sufrido la roca. Por otra parte, de acuerdo a sus rasgos texturales, es holocristalina con cristales faneríticos de finos a gruesos; estos son anhedrales, es decir, presentan una textura alotriomórfica. También, se observan numerosas inclusiones de cristales correspondientes a la textura poiquilítica, así como bordes de reacción producto de la laterización en la roca, desarrollando bordes de óxidos de hierro.

Mineralogía

Serpentina: Color pardo amarillento con color de interferencia gris de primer orden; se halla en forma de vetas y alrededor del ortopiroxeno. También se encuentra en forma de fibras alargadas correspondiéndose al hábito del crisotilo. Dicho mineral resulta de la alteración de los minerales ferromagnesianos, olivino y enstantita. Presenta inclusiones de magnetita y cromita.

Ortopiroxeno (Enstantita): Incoloro, fenocristales deformados con machado polisintético y extinción recta, con color de interferencia de primer orden. Muestra bordes difusos producto de la alteración y presenta microfracturas finas en cuyo interior se halla la serpentina; tiene inclusiones de cromita y magnetita.

Óxido hidróxido de hierro: Debido a la meteorización del hierro, en la roca se encuentran óxidos que dan esa tonalidad terrosa a la muestra en forma de retículas, Figura 6.24C.

Opacos: Como se muestra en la Figura 6.24A, se presenta la hematita de color marrón rojizo en los bordes de reacción. Por otra parte, se encuentra la magnetita de color negro con hábito octaédrico, la cual se halla como residuo, producto de la alteración de la serpentina; mientras que la cromita, negra y amorfa, está como asociación de la serpentina y como inclusión en la Cr-espinela.

Cr-espinela: Presenta hábito ameboidal, su color es castaño rojizo, muestra inclusiones de cromita, Figura 6.24D.

Tabla 6.8. Valores correspondientes a la composición mineralógica (%). Serpentinita. Muestra M3-S3-1185.

% Minerales Primarios				% Minerales de Alteración y Accesorios			
Ol	Opx	Cpx	Pla	Srp	Op	Cr-sp	FeOx
0	8	0	0	79	1	2	10

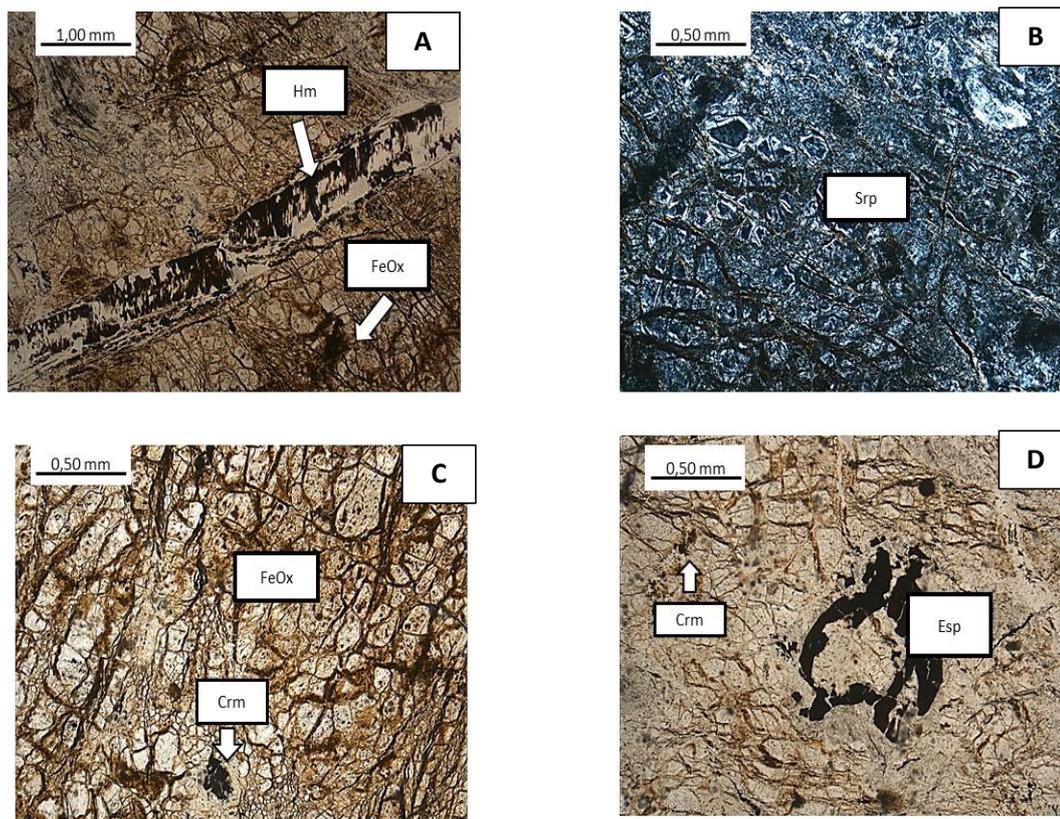


Figura 6.24. Representación petrográfica muestra de Serpentina. A: Veta asociada a eventos compresivos en la roca, donde producto a esta deformación ocurre un intercrecimiento mineral entre el crisotilo y la hematita. B: Serpentina en nicoles cruzados. C: Alteración de la roca producto de la limonitización superficial. D: Espinela anhedrales y con cristales de cromita.

6.2.4 Grado de alteración de la roca

El grado de alteración es explicado a través de la contribución hecha por Goldich (1938), la cual establece la estabilidad de los minerales que conforman a una roca, siendo la inversa de la serie de reacción de Bowen (1928). Según esta interpretación, se plantea cuáles minerales se alteran primero por la meteorización de la roca inicial y cuáles son los productos que se generan.

La roca madre es una harzburgita conformada por los minerales forsterita del grupo del olivino con un (65-70%) y la enstantita del grupo de los ortopiroxeno, con un (10-20%). Dicha roca se encuentra parcialmente serpentinizada por el crisotilo, el cual se observa entre las fracturas y bordes de los minerales principales, en menor proporción están la Cr-espinela y magnetita.

En este sentido, la estabilidad relativa de la roca madre se encuentra ligada por los minerales de las rocas ultrabásicas y básicas, como lo son el olivino y el ortopiroxeno, los cuales se caracterizan por su rápida alteración a minerales ferromagnesianos como los del grupo de la serpentina, ya que son más estables a las condiciones exógenas (Figura 6.25a, Figura 6.25b).

Durante el proceso de serpentinización en el horizonte inferior saprolítico, la porosidad y permeabilidad de las rocas aumentan, permitiendo el avance de las aguas de infiltración en las diaclasas formadas a causa de los esfuerzos dinámicos, facilitando la disolución progresiva del olivino y el ortopiroxeno, siendo estos alterados a una serpentina rica en níquel (Figura 6.25c, Figura 6.25d). En la zona superior del saprolito, el contenido de olivino y piroxeno es reemplazado casi en su totalidad por la alteración de la serpentina. Además, a medida que avanza el proceso de alteración, la roca pierde su mineralogía base, modificando su textura primaria por completo y se impermeabiliza, desfavoreciendo el enriquecimiento en níquel, y favoreciendo la concentración de la magnetita y la Cr-espinela (Figura 6.25e, Figura 6.25f).

Finalmente, según Soler et al. (2018) el horizonte laterítico resulta del residuo insoluble de las rocas, donde la sílice y el magnesio han sido lixiviados, quedando sólo productos de Fe y Al-oxihidróxidos y cuarzo (goethita, hematita, gibb-sita, cuarzo).

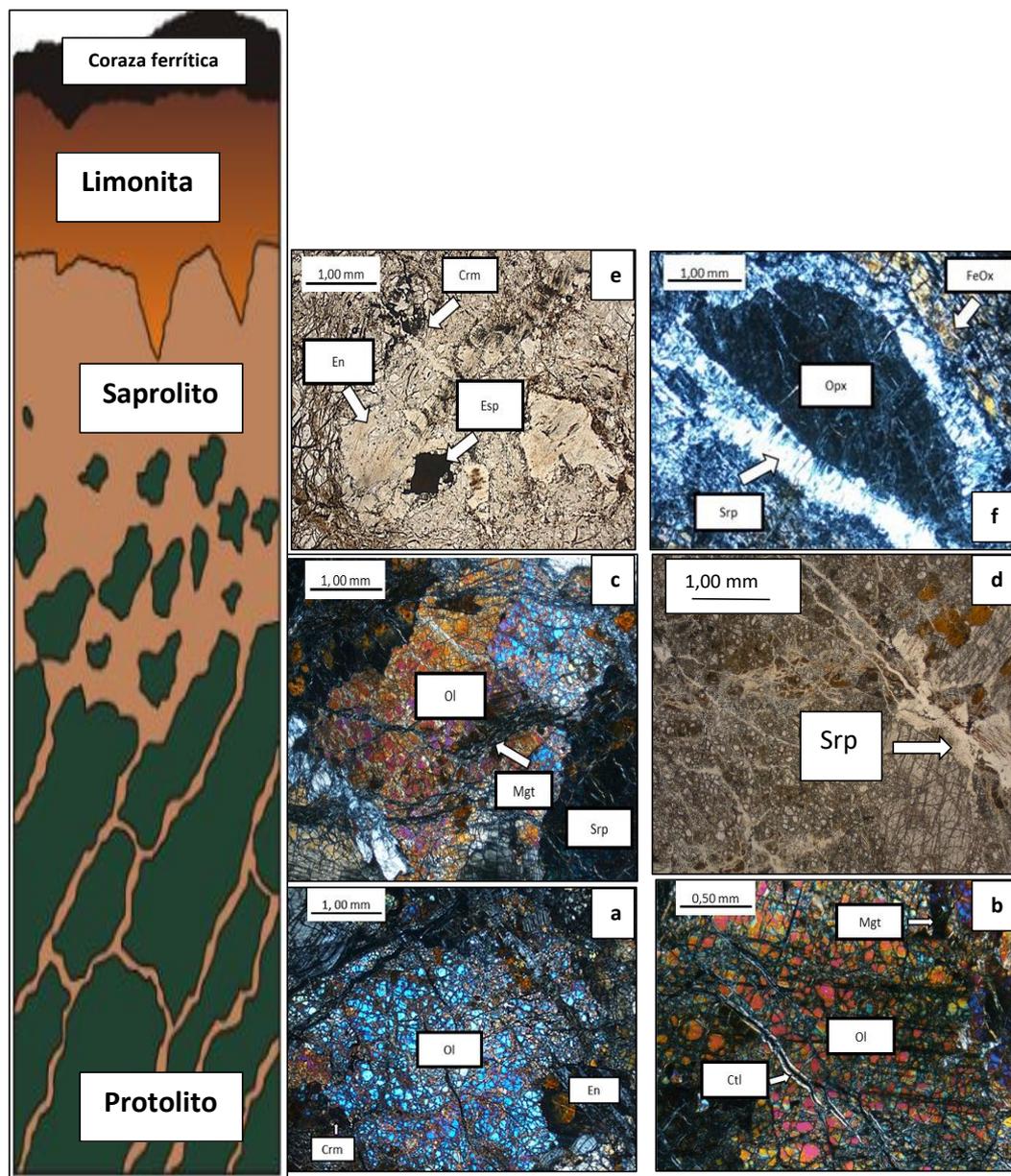


Figura 6.25. Perfil de alteración. Roca base (a, b): se observa el olivino y granos de enstatita fracturados y parcialmente serpentinizados. Horizonte saprolítico inferior (c, d): se observa un menor contenido de minerales de olivino y enstatita, debido a que la roca presenta un mayor grado de permeabilidad, favoreciendo a la circulación de las aguas de infiltración y por lo tanto el proceso de alteración, siendo la serpentina ahora el mineral mayoritario. Horizonte saprolítico superior (e, f): la serpentización reemplaza casi en su totalidad a los granos de olivino y enstatita, dentro del perfil el enriquecimiento de la magnetita y Cr-espinela es mayor, debido a que son el residuo producto de la serpentización. La roca toma un color más terroso, por la meteorización del hierro.

6.3 ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LA ROCA

Con la finalidad de establecer la resistencia de la roca ante el proceso de desintegración fue realizado el ensayo Slake Durability Test en tres (3) muestras de roca, representativas al perfil de alteración del yacimiento:

- La muestra M1-S1-1320 corresponde a la roca peridotita.
- La muestra M1-S2-1240 representa al horizonte saprolítico inferior, correspondiente a una serpentinita.
- La muestra M3-S3-1185 representa al horizonte saprolítico superior, correspondiente a una serpentinita.

Las Tabla 6.9, Tabla 6.10 y Tabla 6.11 mostradas, detallan los resultados del ensayo sequedad-humedad-desmoronamiento. La pérdida de masa de las muestras osciló entre 0,85% y 0,42%, siendo mayor el porcentaje de desgaste en el primer ciclo de cada una de las rocas ensayadas.

Dichos valores se corresponden, según la clasificación de Goodman (1980), como una pérdida total “Muy baja” de fragmentos de rocas, al ser sometidas éstas a los dos (2) ciclos de sequedad y humedad, correspondientes.

Al estar las muestras de rocas con un alto grado de alteración metamórfica afectadas principalmente por la alteración del olivino a minerales del grupo de la serpentina, se esperaba una mayor pérdida de peso. Las rocas estudiadas presentan como principal inconveniente el diaclasamiento, debido a que, al absorber agua a través de las fracturas, debilitan su estructura y meteorizan los minerales; por lo cual se infería un aumento en la pérdida de masa, por la manipulación en cada ciclo del ensayo.

Por consiguiente, los procesos erosivos y la producción de sedimentos resultan, más significativamente, de la acción integrada de otros criterios que condicionan al yacimiento mineral. Es decir, el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, la fuerza de arrastre del agua de escorrentía, la inclinación y longitud de la pendiente, además de los factores propios del suelo y la poca cobertura vegetal por

las acciones antrópicas actuales, generan fenómenos activos importantes.

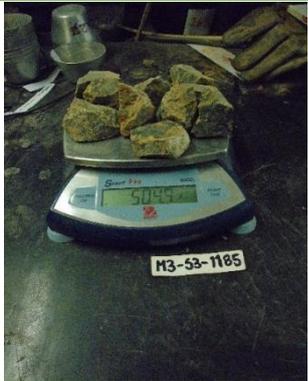
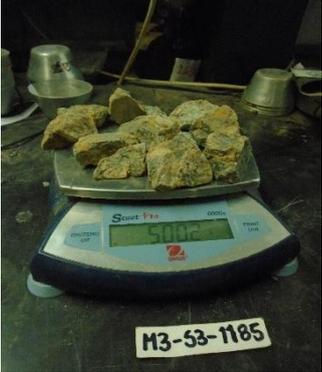
Tabla 6.9. Resultados correspondientes al ensayo Slake-Durability Index, realizado en el laboratorio de Mecánicas de Rocas (UCV). Muestras M1-S1-1320.

Normas	ISRM	1979 – Métodos sugeridos para determinar las propiedades del Slake-Durability Index		
	ASTM	D4644-04 - Método de prueba estándar para la durabilidad de lutitas y rocas débiles similares		
DATOS GENERALES				Registro
Espécimen	2616-4			
Origen del espécimen	División-Níquel, Tiara-Estado Aragua			
Localidad	Sector I			
Coordenadas	N: 1122909,645 m	E: 703263,221 m		
Cota	1320	m		
	Humedad		%	
Peso 1	466,99	g		
Peso 2	463,5	g	Id12	0,73
Peso 3	462,4	g	Id23	0,24
				Foto Etapa Inicial – Peso 1
				
				Foto Etapa Intermedia – Peso 2
				
				Foto Etapa Final – Peso 3
				

Tabla 6.10. Resultados correspondientes al ensayo Slake-Durability Index, realizado en el laboratorio de Mecánicas de Rocas (UCV). Muestras M1-S2-1240.

Normas	ISRM	1979 - Métodos sugeridos para determinar las propiedades del Slake-Durability Index		
	ASTM	D4644-04 - Método de prueba estándar para la durabilidad de lutitas y rocas débiles similares		
DATOS GENERALES		Registro		
Espécimen	2616-5			
Origen del espécimen	División-Níquel, Tiara-Estado Aragua			
Localidad	Sector II			
Coordenadas	N:	E:		
	1124126.291m	705221.924m		
Cota	1240	m		
	Humedad		%	
Peso 1	524,10	g		
Peso 2	519,50	g	Id12	0,88
Peso 3	515,70	g	Id23	0,73
				
		Foto Etapa Inicial – Peso 1		
				
		Foto Etapa Intermedia – Peso 2		
				
		Foto Etapa Final – Peso 3		

Tabla 6.11. Resultados correspondientes al ensayo Slake-Durability Index, realizado en el laboratorio de Mecánicas de Rocas (UCV). Muestras M3-S3-1185.

Normas	ISRM	1979 - Métodos sugeridos para determinar las propiedades del Slake-Durability Index		
	ASTM	D4644-04 - Método de prueba estándar para la durabilidad de lutitas y rocas débiles similares		
DATOS GENERALES				Registro
Espécimen	2616-6			
Origen del espécimen	División-Níquel, Tiara-Estado Aragua			
Localidad	Sector III			
Coordenadas	N:	E:		
	1124527.731m	706547.520m		
Cota	1185	m		
	Humedad		%	
Peso 1	504,9	g		
Peso 2	500,2	g	Id12	0,93
Peso 3	497,9	g	Id23	0,46
				
				Foto Etapa Inicial – Peso 1
				
				Foto Etapa Intermedia – Peso 2
				
				Foto Etapa Final – Peso 3

6.4 AMBIENTE MORFODINÁMICO

Los procesos de meteorización química y mecánica en las peridotitas serpentinizadas producto del intemperismo, constituyen en la localidad de Loma de Hierro el fenómeno más importante y marcado en estas rocas, siendo el grado de alteración superficial más activo hacia el Sector I, donde la topografía es más aplanada, las condiciones climáticas (alta concentración de precipitación) y altura son favorables, por lo cual la secuencia de meteorización es mayor. Por otro lado, hacia el sector II y III el grado de intemperismo es variado y dependen del fracturamiento de las rocas, así como del valor de la pendiente del terreno con inclinaciones mayores a los 30°.

Debido a la configuración morfogenética del paisaje, además de la acción de los agentes atmosféricos, hacen que el área sea susceptible a los procesos erosivos y en ellos intervienen las aguas del escurrimiento superficial, que han generado zonas de desarrollo de cárcavas sobre todo en los sectores (II y III), que presentan superficies inclinadas y fácilmente erosionables de las lateritas, se encuentra sumada la intervención antrópica, siendo la actividad minera uno de los principales modeladores en la modificación del relieve, ya que potencian la susceptibilidad a la erosión del terreno (erodabilidad), favoreciendo la generación y el aporte de sedimentos (Figura 6.26).



Figura 6.26. Fotografía escorrentía superficial causada por las intensas lluvias presentadas en el mes de agosto de 2019. Ubicado en la zona Norte del sector II.

6.4.1 Procesos erosivos

El proceso de erosión hídrica en la región, se presenta como producto de la acción de las gotas de lluvia, además de la energía de los cursos de agua. En consecuencia, dicho proceso morfodinámico activo, provoca la formación de surcos y cárcavas en pendientes desprovistas de vegetación, siendo la condición antrópica del área un agravante, ya que aumenta el desprendimiento y movilización de partículas de suelo y rocas.

En la zona de estudio se identificaron los siguientes tipos de erosión:

6.4.1.1 Erosión en surco

Este tipo de erosión se observa en las bermas mineras (Figura 6.27), producto de la escorrentía y su capacidad erosiva, la cual genera cortes y forma surcos. Seguidamente moviliza a las partículas desprendidas a través de la suspensión y rodamiento, para finalmente ser depositadas hacia las zonas más llanas.

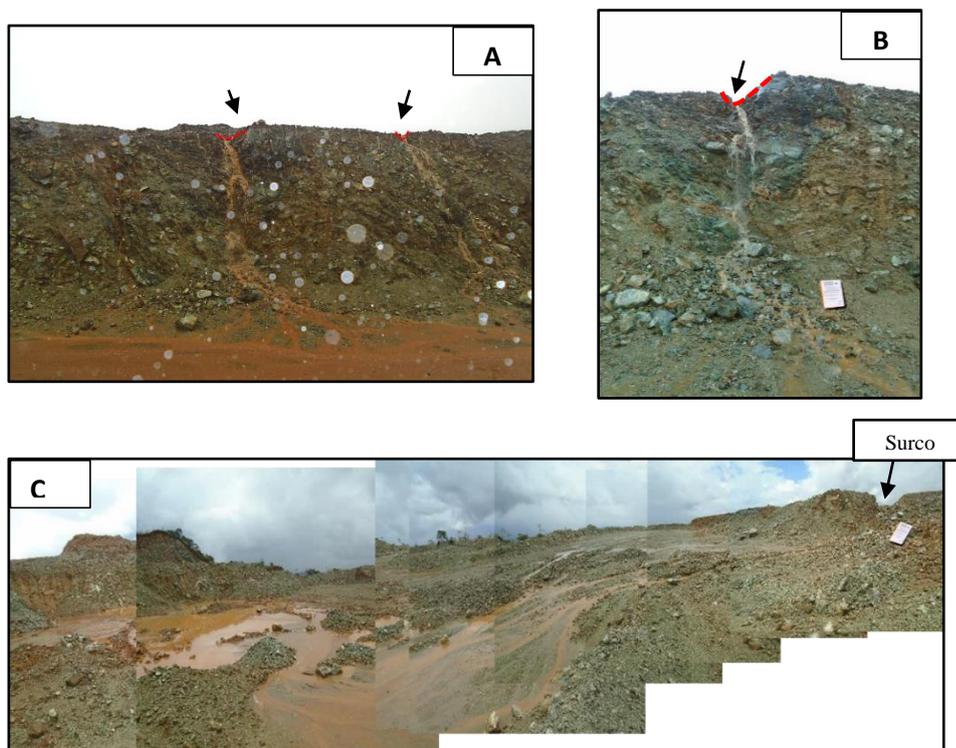


Figura 6.27. Fotografías A, B, C: Formación de surcos en bermas, taludes y vías de acceso minero, generando puntos de escurrimiento los cuales transportan sedimentos de distintas granulometrías, y finalmente se depositan en las zonas más llanas, formando pozos. Se puede observar la turbidez del agua debido a la cantidad de sedimentos finos provenientes de la capa superficial del suelo.

6.4.1.2 Erosión en cárcava

La erosión en cárcava se forma producto de las aguas de escorrentía producidas durante las precipitaciones intensas en la zona. Éstas se generan por el aumento en la capacidad de erosión del suelo, siendo las pendientes de las laderas mayores a los 30°, la incompetencia y el grado de meteorización del suelo tipo franco-arcilloso, además, de las rocas ígneo metamórficas fracturadas y meteorizadas, los factores condicionantes de este fenómeno en el área.

Asimismo, las cambiantes condiciones del terreno, generada por las operaciones mineras, tienen un control significativo en la generación de profundas cárcavas, porque requieren áreas desprovistas de la vegetación que protege al sistema suelo-roca (Figura 6.28), favoreciendo al proceso de erosión y, por consiguiente, a un mayor aporte en la cantidad de sedimentos en suspensión.

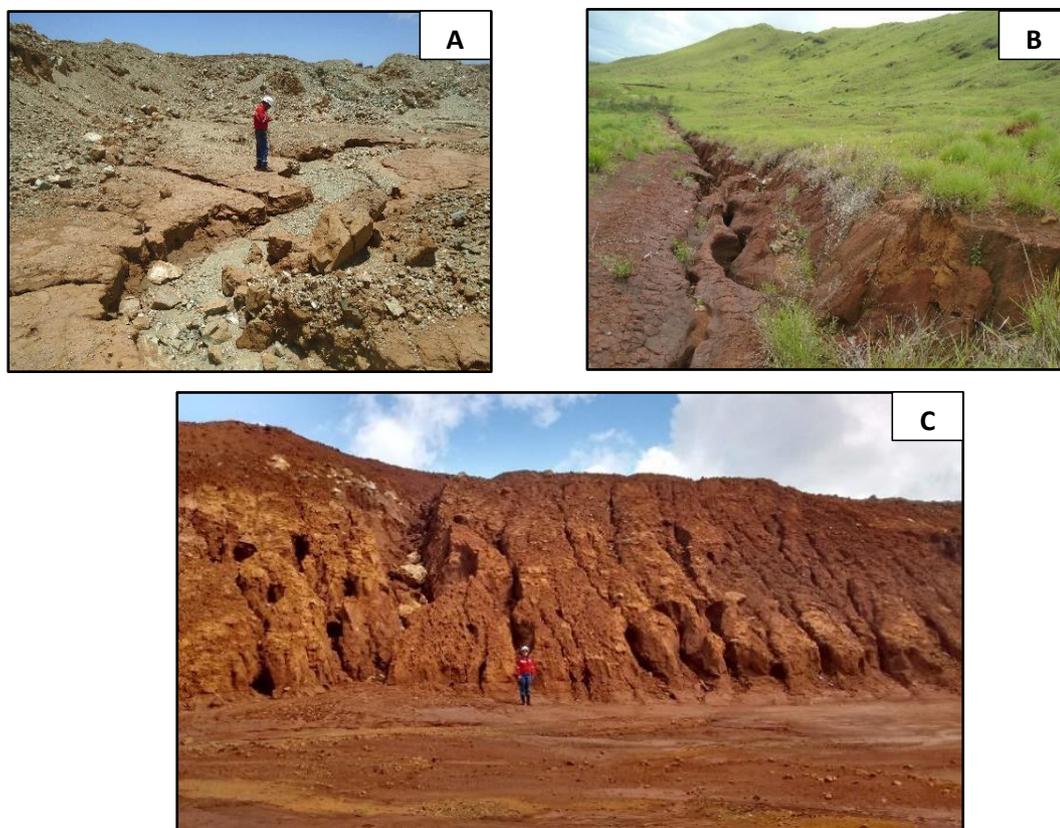


Figura 6.28. Fotografías: A: Formación de cárcava, producto de la energía de las aguas de escorrentía, además de la falta de la cubierta vegetal debido a los trabajos mineros. B: Cárcava formada en el sector III, generada en la capa desprovista de vegetación y pendiente con menor grado en donde las aguas de escorrentía finalmente se concentran. C: Cárcavas de erosión formadas en los taludes mineros.

6.5 MEDIDAS IMPLEMENTADAS PARA CONTROL DE EROSIÓN

Dentro del área de extracción minera se han implementado medidas de prevención, mitigación y conservación de los suelos afectados por los procesos de erosión hídrica desde el año 2003 aproximadamente. Los siguientes mecanismos, detallados a continuación, fueron los encontrados en la zona de estudio:

6.5.1 Lagunas de sedimentación

Las lagunas de sedimentación fueron construidas en los niveles más bajos del laboreo minero (*pit*), para la captación de los sedimentos transportados. Dichas lagunas están diseñadas a partir del área del *pit* planificado, además de la consideración de la máxima lluvias registradas, siendo ésta donde ocurre la mayor descarga de sedimentos generada por las fuerzas erosivas de las aguas de lluvia.

Estos sedimentos son controlados por cuatro (4) lagunas situadas en el sector I; ocho (8) en el sector II; y seis (6) en el sector III, como se observa en la Figura 6.29. Sin embargo, actualmente dichas lagunas se encuentran en mal estado, debido a que no se les ha realizado un mantenimiento adecuado, desde hace aproximadamente seis (6) años, por lo cual, las condiciones para la captación de los sedimentos, generados por la extracción minera, ocasionan un impacto significativo en el contenido de sólidos totales por el agua de escorrentía superficial, afectando la calidad del agua de los cursos naturales aguas abajo especialmente los afluentes del río Mesia y Tiara.

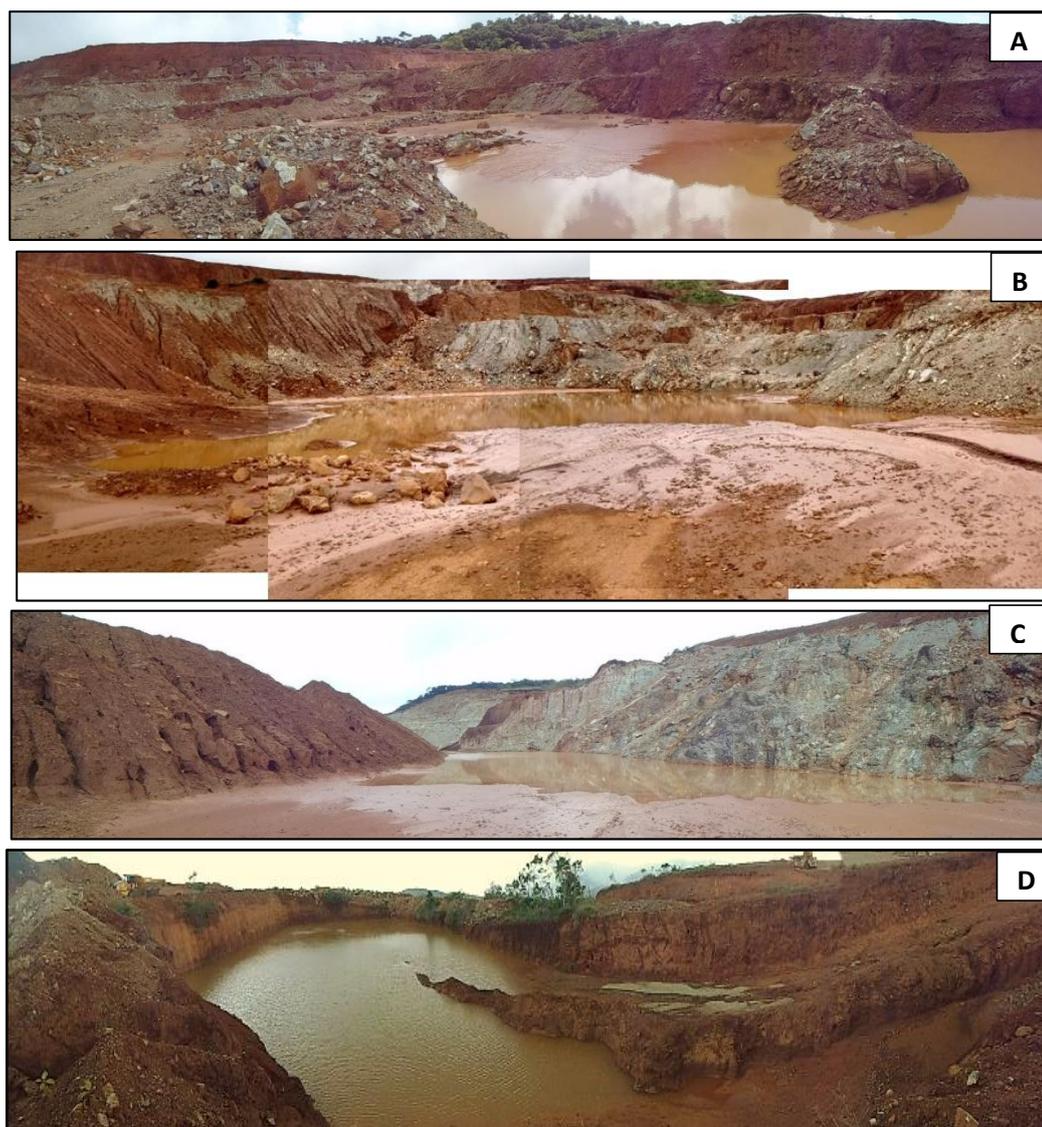


Figura 6.29. Fotografías: **A:** Laguna de sedimentación ubicada en el sector I, E: 703661.042m N: 1123117.275m Z: 1.306m. **B:** Condición actual de la laguna de sedimentación ubicada en el sector II cercano al campamento, E: 705080.495m N: 1123548.244m Z: 1.188,48m. Se muestran surcos y cárcavas causados por las aguas de escorrentía, además del poco mantenimiento de la misma. **C:** Laguna de sedimentación “botadero” ubicada en el sector II, E: 704839.540m N:1123699.947m Z: 1.246,71m. Dentro de la laguna se presentan sedimentos de diversas granulometrías, que son transportados por las fuerzas de las aguas de escorrentía, y finalmente son sedimentados. **D:** Laguna de sedimentación ubicada en el sector III, E: 706527.321m N: 114331.454m.

6.5.2 Gaviones

Los muros de gaviones son jaulas de alambres con forma prismática, llenados con material rocoso de alta resistencia mecánica, instalados en el sentido perpendicular al flujo de la escorrentía (similar a un dique), utilizados para retener los sedimentos transportados, además de reducir la velocidad y energía de las aguas con sólidos en suspensión. En cuanto a su ubicación, se dispone de cuatro (4) gaviones en el sector I, que tienen como función retener los sedimentos hacia la subcuenca del río Mesia, mientras que otros tres (3) están localizados al Norte del sector III, cerca del lecho de la quebrada Agua Amarilla.

Además del mantenimiento insuficiente de las obras de control de sedimentos, los gaviones fueron construidos con una estructura poco rígida, además teniendo como consecuencia el colapso, parcial y/o total, debido a la colmatación del geotextil, mientras otros dos (2) gaviones, localizados en el sector I, fueron afectados por la socavación en su cimentación. En efecto, los gaviones no cumplen en la actualidad con la función de minimizar la energía de las aguas de escorrentía (Figura 6.30); por lo cual existen problemas erosivos como la formación de cárcavas y surcos en el suelo, asimismo, no contrarresta el volumen de sedimentos generados por el aprovechamiento mineral y las condiciones naturales de Loma de Hierro.



Figura 6.30. Fotografía gaviones ubicados en el sector III, en donde se depositan los sedimentos provenientes de la quebrada Amarilla.

6.6 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN POR EROSIÓN HÍDRICA

El análisis de la erosión hídrica, fue llevado a cabo mediante la evaluación de los factores como: Longitud de Pendiente, Agresividad Climática, Erodabilidad del Suelo, Cobertura Vegetal. Donde se pudo apreciar de forma cualitativa el comportamiento de las variables.

Con el propósito de establecer la importancia relativa de las variables en el proceso de erosión hídrica, se aplicó un análisis multicriterio, el cual posibilita la elaboración de una cartografía, para la identificación de las áreas susceptibles a la erosión.

6.6.1 Mapa Longitud de Pendiente

El factor LS en la región de estudio va de 0 a 65,86°, siendo las mayores longitudes y gradientes de las pendientes ubicadas hacia las subcuencas de los ríos Mesia, Cagua y Paito, correspondientes a las unidades de filas y colinas, con laderas fuertes y moderadamente pronunciadas, como se observa en la Figura 6.31. Por otro lado, hacia la unidad central, donde sobresale la fila Loma de Hierro, se presenta un aumento de estos valores hacia el flanco sur de la ladera. Los valores de los factores LS más bajos se hallan principalmente, en: los valles intramontinos de pendientes suaves, localizados hacia el tope amesetado del yacimiento Loma de Hierro; en el suroeste, donde se encuentra la cuenca del río Tiara; y en las tierras cultivadas en el río Paito.

El Factor de Longitud de Pendiente indica que las zonas con alto potencial de susceptibilidad a la erosión hídrica se presentan en las regiones de pendientes pronunciadas, siendo éstas donde se concentra la mayor velocidad de las aguas, de modo que, la capacidad erosiva de la escorrentía induce un aumento en la movilización y transporte de los sedimentos.

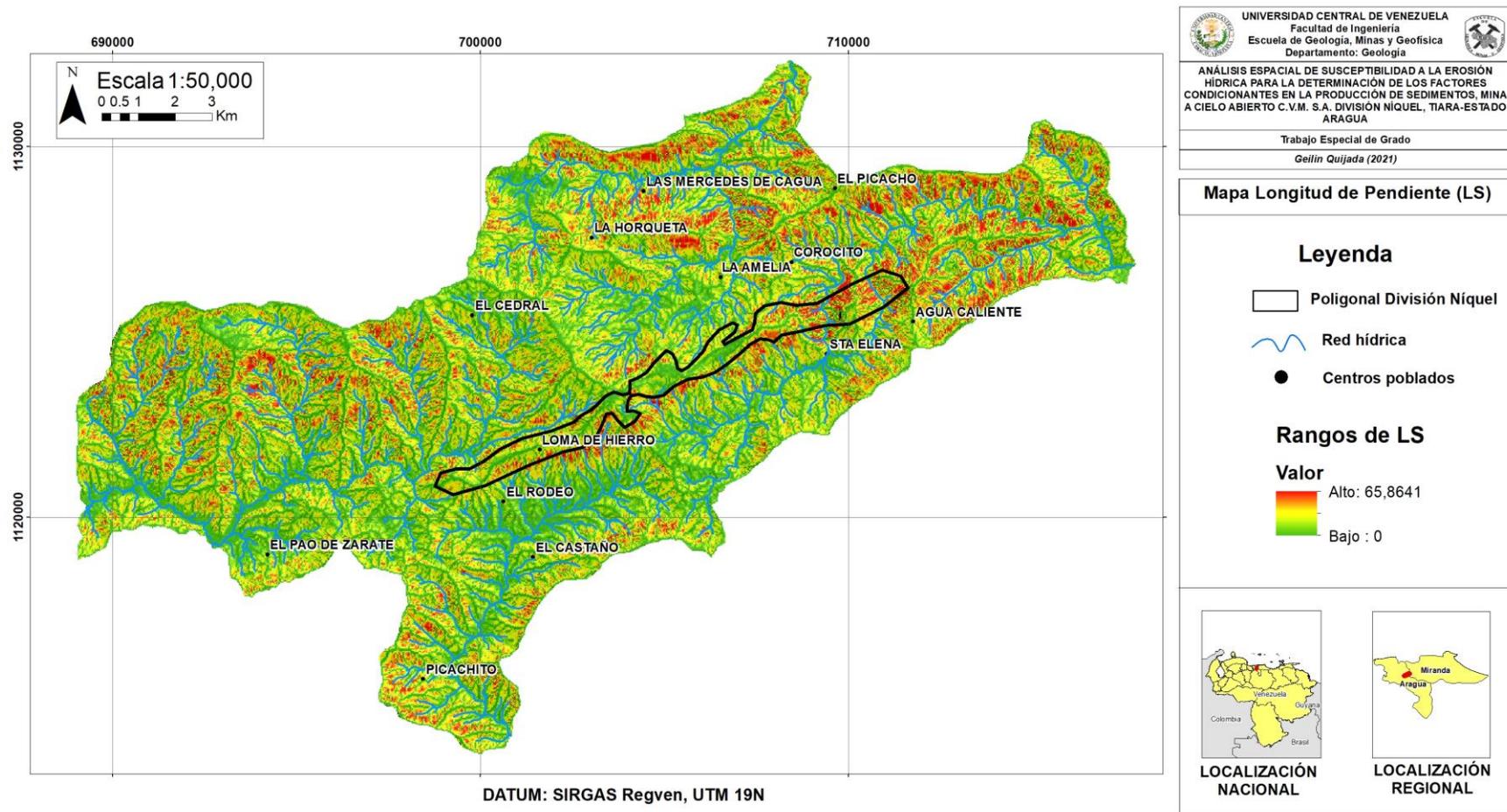


Figura 6.31. Mapa del Factor de longitud de pendiente (LS), en el mismo se observa como los valores más altos se hallan hacia la zona Este de estudio, con las pendientes más abruptas. Asimismo, hacia la fila de loma de hierro en su flanco sur, se observa dicha tendencia, por lo cual el proceso de erosión hídrica presenta mayor potencial.

6.6.2 Mapa Erodabilidad del Suelo

Con la finalidad de presentar cartográficamente el factor de erodabilidad del suelo, se evaluaron los valores tabulados por HILBORN (2012), mostrados en la Sección 2.9.2 del marco teórico.

Los suelos Ultisoles, correspondientes a una textura arcilloso limosa, cuyo contenido de materia orgánica es de 11,2%, presentan un valor de Erodabilidad de 0,58 ton/h; mientras que los suelos Inceptisoles del tipo franco-arcilloso y 2,15% de materia orgánica, tienen un valor de 0,74 ton/h.

En la Tabla 6.12, se presentan los resultados correspondientes al valor de erosividad en los suelos:

Tabla 6.12. Valores de erodabilidad de los suelos, en función a sus características, según Hilborn (2012).

Tipo de suelo	Textura	MO (%)	K (ton/h)	Erodabilidad	Superficie (km ²)	Superficie (%)
Ultisol	arcilloso limosa	11,2%	0,58	Baja	43,7	24,43
Inceptisol	franco-arcilloso	2,15%	0,74	Alta	124,3	69,476

Como se observa la Figura 6.32, en la zona de estudio, se estiman valores de Erodabilidad de Bajo a Alto. Los suelos Ultisoles abarcan una superficie del 24,43% y se encuentran en la categoría de baja erodabilidad, estos se desarrollan dentro de las unidades de Bosque y Matorral, por lo que la cobertura vegetal es mayor, permitiendo así a que la susceptibilidad a la erosión hídrica disminuya.

Por otro lado, los suelos Inceptisoles ocupan la mayor parte de la superficie con un 69,48%; se encuentran ubicados en la categoría de Erodabilidad Alta, siendo más susceptibles a los procesos de remoción de sedimentos. Este fenómeno se presenta, tanto por los usos socioeconómicos: forestal y minero en el área, así como de forma natural, debido a que estos suelos ocupan posiciones que van desde pendientes altas a abruptas, lo cual favorece a que los cursos de agua transporten gran cantidad de partículas finas y gruesas, siendo depositadas gradualmente en las partes

bajas de las subcuencas. Otro factor decisivo es la vegetación, puesto que, se corresponden a las coberturas vegetales más bajas, o completamente desprovistas por los usos antrópicos, lo cual implica que la estructura del suelo sea más débil, y, por ende, la resistencia a la acción de las gotas de lluvia sea menor y, el transporte facilitado para el trabajo de los agentes de erosión del suelo.

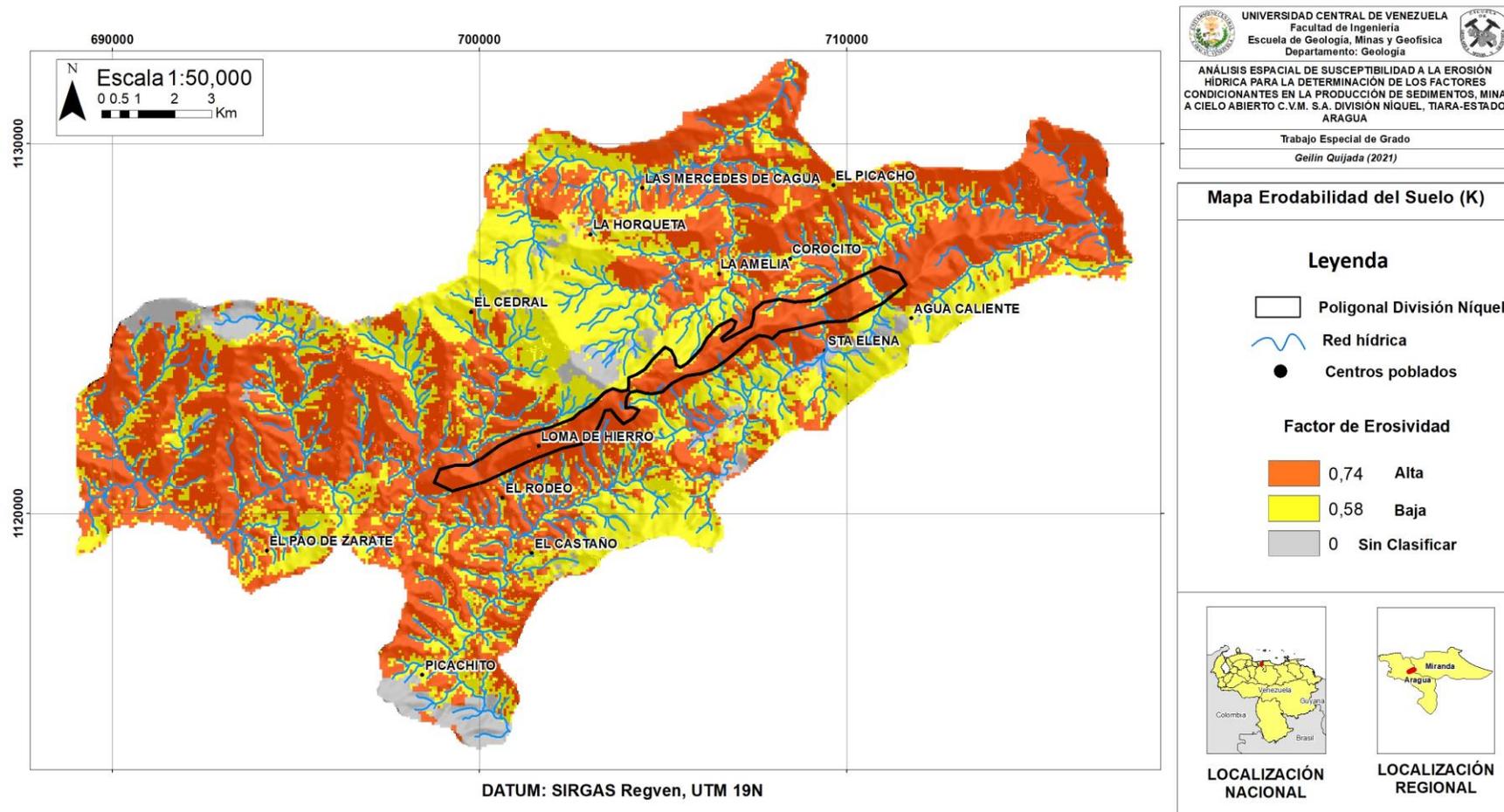


Figura 6.32. Mapa de erosividad del suelo (Factor K). Los suelos inceptisoles presentan la mayor erodabilidad, mientras que los ultisoles muestran valores más bajos. Los datos sin clasificar, corresponden a las nubes.

6.6.3 Mapa Agresividad Climática

En la tabla 6.13, se presentan los diferentes índices Modificado de Fournier-Arnoldus (IMF), obtenidos para cada una de las estaciones pluviométricas y los registros climatológicos: Tiara, Loma de Níquel, La Urbina-Quebrada Seca, San Francisco de Pao, Sebastián de Los Reyes, El Cortijo y San Diego.

En la Figura 6.33 correspondiente a El Mapa de Agresividad Climática, se observa como los índices de agresividad incrementan durante los meses de mayo a agosto, lo cual coincide con lo definido por Arnoldus (1980). Los mayores valores se ubican hacia la parte central y este, específicamente hacia las localidades de Loma de Hierro, Las Mercedes de Cagua, La Amelia, clasificándolo de acuerdo con los Índices Fournier-Arnoldus, presentados en la Tabla 2.9, como áreas de Moderado a Muy Alto potencial erosivo, para el periodo de lluvias analizados.

Debido a que la región de estudio se encuentra localizada en una estribación montañosa de la Serranía del Interior y dentro de la Zona de Convergencia Intertropical, dichos factores condicionan el comportamiento climático en el área, porque tienen un papel importante en la formación de abundantes nubes, así como en la cantidad, intensidad, además del tiempo y distribución de las precipitaciones. Por consiguiente, estos efectos explican el por qué las lluvias presentadas en combinación con el relieve, tienen una dinámica muy activa sobre las rocas y los suelos, lo cual genera valores muy altos de erosividad.

Tabla 6.13. Índices de Fournier-Arnoldus obtenidos para las estaciones pluviométricas y registros climatológicos, donde los valores más altos se encuentran hacia la zona de División Níquel y San Diego de los Altos.

Estación	X	Y	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	IFM (mm)
Tiara	701149,4	1119819,5	0,01	0,00	0,05	2,20	1,28	4,06	6,29	29,95	17,33	21,49	13,83	0,10	96,59
Loma de Níquel	704029,76	1122765,9	1,22	0,28	0,01	2,81	7,58	19,85	18,56	29,16	16,62	33,02	15,66	10,28	155,06
La Urbina-Quebrada Seca	690406,7	1136763,4	0,00	0,00	0,04	6,03	2,94	14,02	33,24	10,49	3,99	15,43	8,08	1,77	96,03
San Francisco de Pao	689996,4	1117236,4	0,00	0,00	0,00	3,94	1,88	6,71	13,96	27,40	26,39	11,89	11,56	1,35	105,07
San Sebastián de Los Reyes	701138,6	1100351,3	0,00	0,00	0,26	8,87	3,54	16,87	18,52	11,74	25,06	7,52	10,31	0,32	103,03
El Cortijo	674382,1	1114218,1	0,01	0,00	0,18	0,00	0,08	3,07	30,66	33,51	3,42	6,62	0,52	0,00	78,08
San Diego de los Altos	726428,3	1114257	0,31	0,30	0,48	2,39	8,17	33,27	20,50	18,99	36,02	18,07	8,69	0,03	147,21

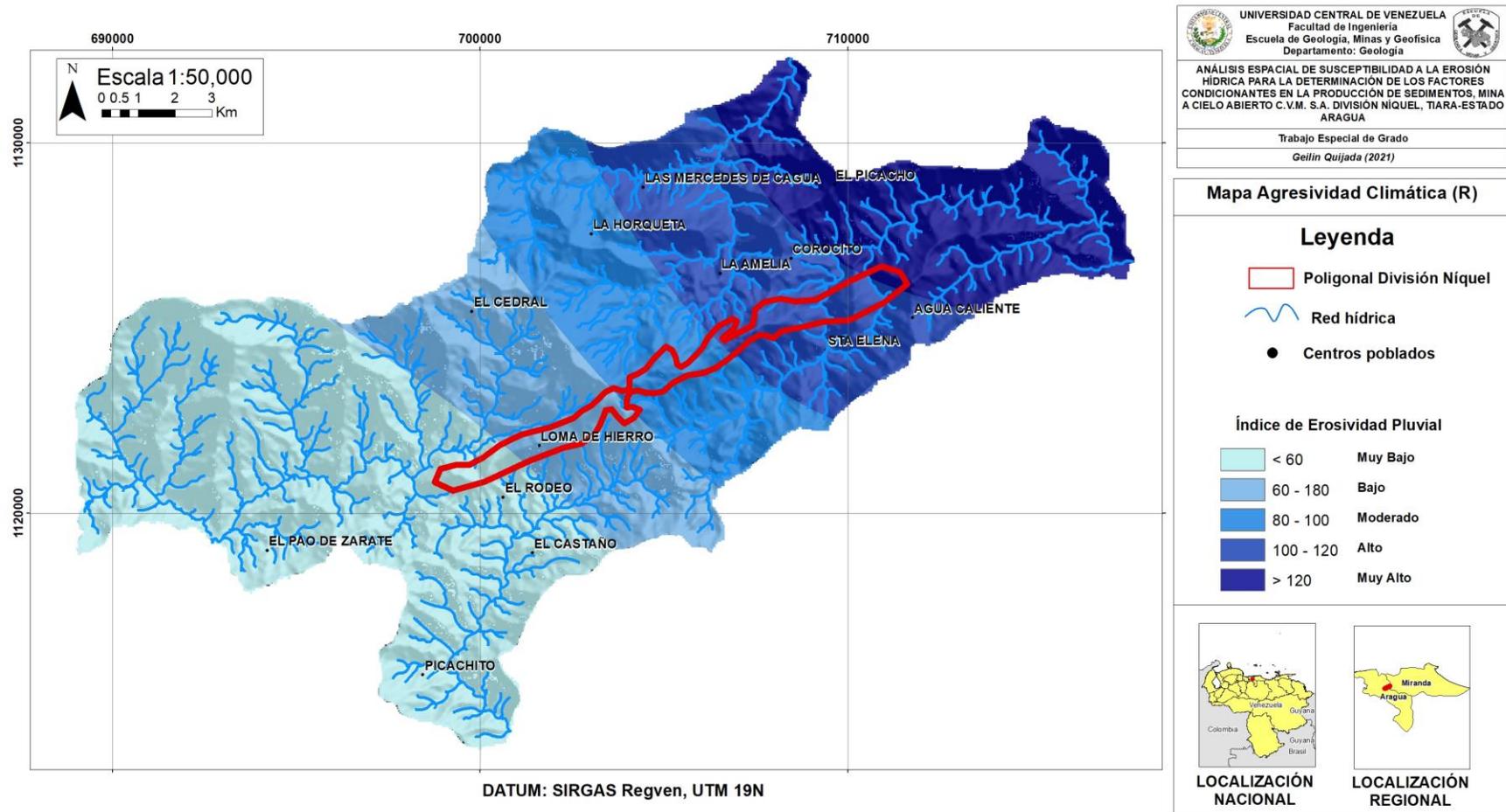


Figura 6.33. Mapa de Agresividad Climática, destacando mayor erosividad pluvial hacia la zona central y este.

6.6.4 Mapa Cobertura Vegetal

Los valores obtenidos para el factor C, acerca de la cobertura vegetal, oscilaron entre 0,91 y 0,076. En este sentido, los valores más altos; 0,91 y 0,51 se sitúan en la parte central (Figura 6.34), y corresponden con los asentamientos urbanos, la presa Santa Elena, la infraestructura industrial de División Níquel y el área enmarcada por la poligonal de extracción mineral, la cual además está situada dentro de la zona con vegetación más baja, es decir, la Sabana Abierta de Montaña (0,51-0,41). La intervención antrópica actual, generada por los frentes de explotación y las vías de acarreo, son más susceptibles al proceso de erosión hídrica, al ser suelos parcial y completamente descubiertos de vegetación.

Por otro lado, donde se encuentra la vegetación del tipo Herbáceo, se estiman valores desde 0,41 a 0,34 y se localizan hacia las unidades de Filas y Colinas, en las subcuencas de los ríos Mesía, Cagua y Paito, además de hallarse en los flancos de la fila de Loma de Hierro. En estas unidades, correspondientes a laderas de fuertes pendientes, ocurren fenómenos importantes de erosión, como los deslizamientos observados actualmente en taludes inestables dentro del área minera y en los cortes de carretera, sobre todo durante los periodos de lluvias. Esto es producto del escurrimiento superficial, el cual se infiltra por las fracturas de las rocas, resultando alteradas y produciendo suelo residual, contribuyendo así a los procesos de erosión, en un ciclo iterativo y expansivo.

La vegetación de Matorral presenta valores que oscilan entre 0,34 y 0,27 y se encuentra hacia las zonas altas de las unidades de Filas y Colinas, como sucesión del Bosque Nublado. En cuanto a los valores más bajos (0,27 a 0,007), estos se sitúan principalmente hacia la zona norte-central y corresponden al área Forestal de Bosque Nublado.

Como se observa en la Figura 6.34, el factor de cobertura vegetal (C), indica que los valores más altos se encuentran dentro del suelo con categoría de Erosividad Alta, además de ubicarse en las regiones de laderas pronunciadas, de modo que, son superficies potencialmente importantes en la generación y transporte de sedimentos en suspensión hídrica.

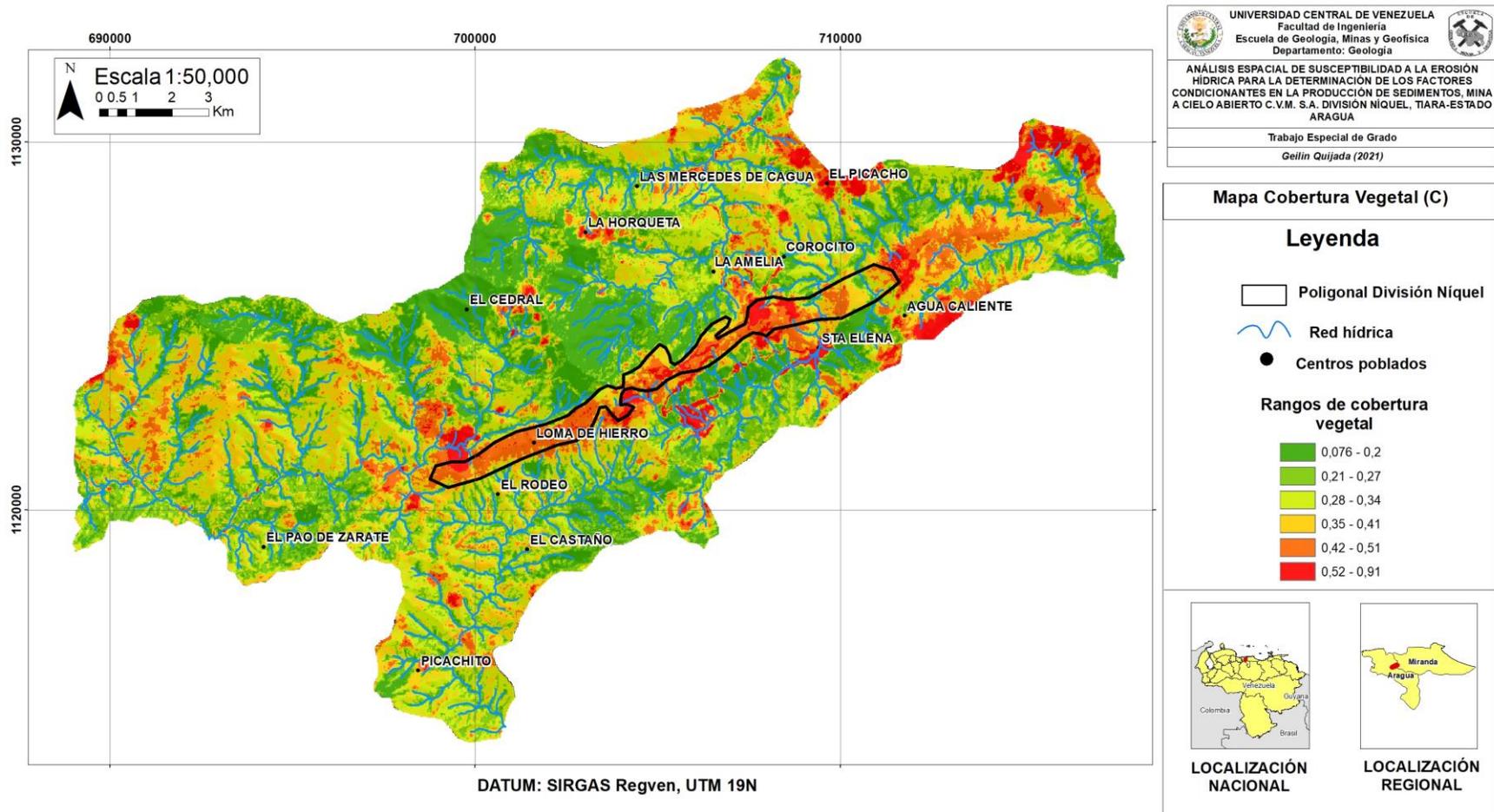


Figura 6.34. Mapa de Cobertura Vegetal (Factor C).

6.6.5 Asignación de pesos normalizados

Para la determinación de los pesos normalizados de cada factor, se utilizó la Matriz de Jerarquización Analítica (MJA). La jerarquía cada factor se obtuvo mediante la asignación de un puntaje, entre 1 y 9, establecido por Saaty (Tabla 2.11), mencionada en el marco teórico, de acuerdo con el nivel de importancia de los pares analizados, como se muestra en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14. Jerarquización de cada factor evaluado de acuerdo a su nivel de importancia en el proceso de erosión hídrica

Matriz de Jerarquización Analítica	Longitud de Pendientes (LS)	Agresividad Climática (R)	Erodabilidad del Suelo (K)	Cobertura Vegetal (C)
Longitud de Pendientes (LS)	1,00	4,00	3,00	3,00
Agresividad Climática (R)	0,25	1,00	0,50	0,33
Erodabilidad del Suelo (K)	0,33	2,00	1,00	0,50
Cobertura Vegetal (C)	0,33	3,00	2,00	1,00
Suma Columna	1,92	10,00	6,50	4,83

Una vez ingresados los valores de pares a la Matriz de Jerarquización (Saaty,198), se calculó el peso normalizado (W) para cada factor evaluado, presentados en la Tabla 6.15.

Tabla 6.15. Valores de pesos normalizados (W) obtenidos para cada factor.

Factor	Longitud de Pendientes (LS)	Agresividad Climática (R)	Erodabilidad del Suelo (K)	Cobertura Vegetal (C)	Peso Normalizado (W)
Longitud de Pendientes (LS)	$1/1,92=0,52$	$4/10=0,40$	$3/6,50=0,46$	$3/4,83=0,62$	$2/4=0,50$
Agresividad Climática (R)	0,13	0,10	0,08	0,07	0,09
Erodabilidad del Suelo (K)	0,17	0,20	0,15	0,10	0,16
Cobertura Vegetal (C)	0,17	0,30	0,31	0,21	0,25

Luego de obtener el peso normalizado, éstos fueron validados a través de la Relación de Consistencia (CR), de acuerdo a la ecuación (27) mostrada en el marco teórico, donde se necesitan obtener los valores de (CI), y (RI).

Donde (RI), es un Índice Aleatorio de Consistencia dependiente del orden de la matriz, el cual se obtuvo mediante la Tabla 2.12, detallada en el marco teórico. Mientras que el valor del Índice de Consistencia (CI), mediante la ecuación (28), mencionada en el marco teórico.

En la Tabla 6.16, se detallan los cálculos realizados para obtener el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares (λ_{max}), necesario para la obtención del valor de CI.

Tabla 6.16. Cálculo de λ_{max} , para la obtención del valor de CI.

Matriz de Jerarquización Analítica					*	Peso Normalizado (W)	λ_{max}
Longitud de Pendientes (LS)	1,00	4,00	3,00	3,00		0,50	2,09
Agresividad Climática (R)	0,25	1,00	0,50	0,33	0,09	0,38	
Erodabilidad del Suelo (K)	0,33	2,00	1,00	0,50	0,16	0,64	
Cobertura Vegetal (C)	0,33	3,00	2,00	1,00	0,25	1,01	
						Resultado	4,12

El valor de RI es 0,90 correspondiente a una matriz de orden $n=4$ (Saaty,1980), mientras que el valor obtenido para CI es 0,04. Por otro lado, la Relación de Consistencia (CR), debe ser menor a 0,10 para que los “pesos normalizados sean consistentes”; en caso contrario, los pesos deben ser recalculados para evitar errores (Saaty, 1980).

En este caso estudio, el valor obtenido de CR es 0,04 por lo que la Relación de Consistencia es correcta y, por lo tanto, los “pesos normalizados obtenidos son consistentes”.

6.6.6 Mapa de Susceptibilidad a la Erosión Hídrica

Las capas temáticas fueron combinadas a través de la herramienta Raster Calculator, en ArcGis, tomando en cuenta los pesos normalizados (W) calculados

a través de la Matriz de Jerarquización Analítica, de modo que el álgebra para la generación del Mapa de Susceptibilidad a la Erosión Hídrica es:

SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN HÍDRICA= 0,50 (LONGITUD DE PENDIENTES) + 0,09 (AGRESIVIDAD CLIMÁTICA) + 0,16 (ERODABILIDAD DEL SUELO) + 0,25 (COBERTURA VEGETAL)

Debido a que se consideró que la Susceptibilidad Intrínseca de las subcuencas (Mesia, Paito, etc.) tienen mayor incidencia en el proceso de erosión hídrica, que la ocurrencia de las precipitaciones; los mayores pesos asignados se corresponden a los factores: Longitud de Pendiente (LS), Cobertura Vegetal (C) y Erodabilidad Suelo (K).

Posteriormente, se clasificó el Mapa de Susceptibilidad a la Erosión Hídrica de acuerdo con cuatro (4) Categorías de Susceptibilidad: Baja, Moderada, Alta y Muy Alta.

6.7 VALIDACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN HÍDRICA

Para la Validación Cartográfica referente a la Susceptibilidad a la Erosión Hídrica; se realizó un mapa siguiendo la metodología propuesta por SHARMA (2010), la cual se basa en la Evaluación Espacial de Zonas con Potencial Topográfico de Erosión, utilizando los índices del terreno y la vegetación. En este sentido, los índices del terreno seleccionados corresponden al Factor Longitud-Pendiente (LS), el Índice de Humedad Topográfica (TWI) y el Índice de Potencial de Flujo (SPI), mientras que la vegetación se estudió a través del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI). Estos índices representan la física subyacente de los procesos naturales que tienen importantes consecuencias hidrológicas y geomorfológicas en muchos paisajes, según SHARMA (2010).

6.7.1 Mapa Factor de Longitud de Pendiente

El valor del Factor Topográfico (LS), se procedió como se explicó en la sección 6.6.1, por lo tanto, se tienen los mismos valores de 0 a 65,86°, siendo el

más alto correspondiente a las formas topográficas de Filas Altas y Cerros Medios, con pendientes pronunciadas, mientras que los más bajos se deben a los Valles Intramontinos de altitudes más bajas y pendientes suaves.

6.7.2 Mapa Índice de Potencial de Flujo

Como se muestra en la Figura 6.35, el valor de SPI, oscila entre -7,83 y 1,21. En general, el área se encuentra entre los valores altos, concordantes con la configuración de las unidades topográficas de pendientes pronunciadas, lo cual permite que el potencial erosivo de las aguas incremente, y, por lo tanto, sea mayor la incisión en el lecho rocoso ígneo metamórfico y el suelo local, incrementando así el transporte de sedimentos a través de la fuerza erosiva del flujo.

6.7.3 Mapa Índice de Humedad Topográfica

Como se muestra en la Figura 6.36, el valor de TWI en el área de estudio oscila entre -3,42 y 21,37. Los valores más altos están asociados a las zonas de pendientes suaves, en donde convergen las aguas formando a los ríos principales; mientras que los valores bajos se hallan hacia la parte alta de las subcuencas Mesia, Cagua y Paito, correspondientes a áreas topográficas de pendientes pronunciadas y divergentes.

Dentro del yacimiento Loma de Níquel, convergen diversos tributarios de los ríos principales, siendo Mesia el que presenta los mayores escurrimientos, principalmente hacia el sector II, donde se realiza la extracción mineral, a causa de ello, en el Mapa de Validación a la Erosión Hídrica se observan valores altos de TWI hacia esta zona. Esto es importante, debido a que se forman condiciones erosivas, con resultados como las cárcavas observadas en campo, producto de la saturación del suelo, el cual pierde su resistencia, para posteriormente hundirse por la infiltración. Seguidamente, los sedimentos son transportados por las aguas pluviales hacia la subcuenca de Mesia, las cuales socavan con mayor profundidad al suelo, agravando el proceso de erosión hídrica.

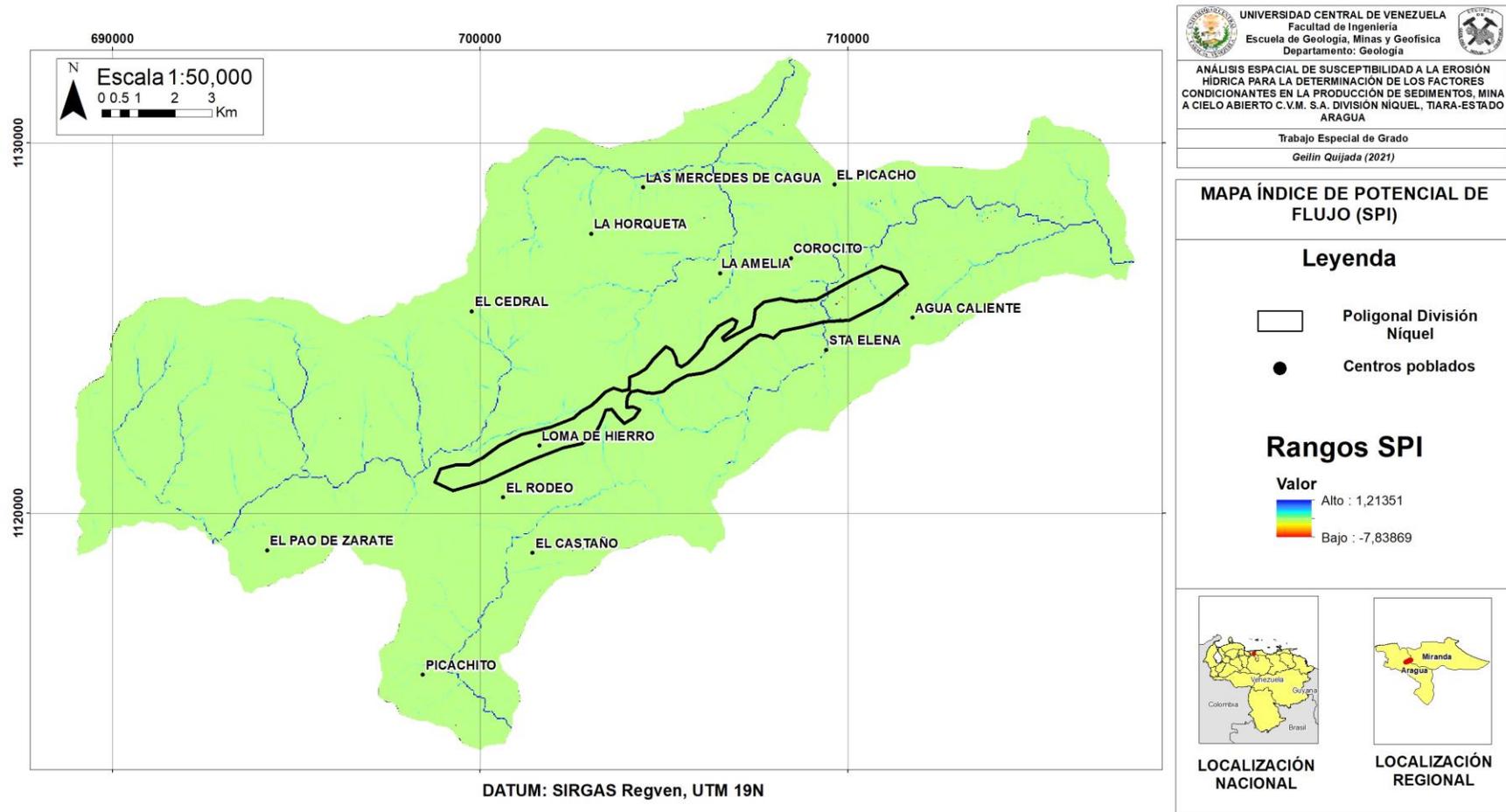


Figura 6.35. Mapa de Índice de Potencia del Flujo (SPI), aplicado al estudio de las subcuencas Mesia, Tiara, Cagua y Paito.

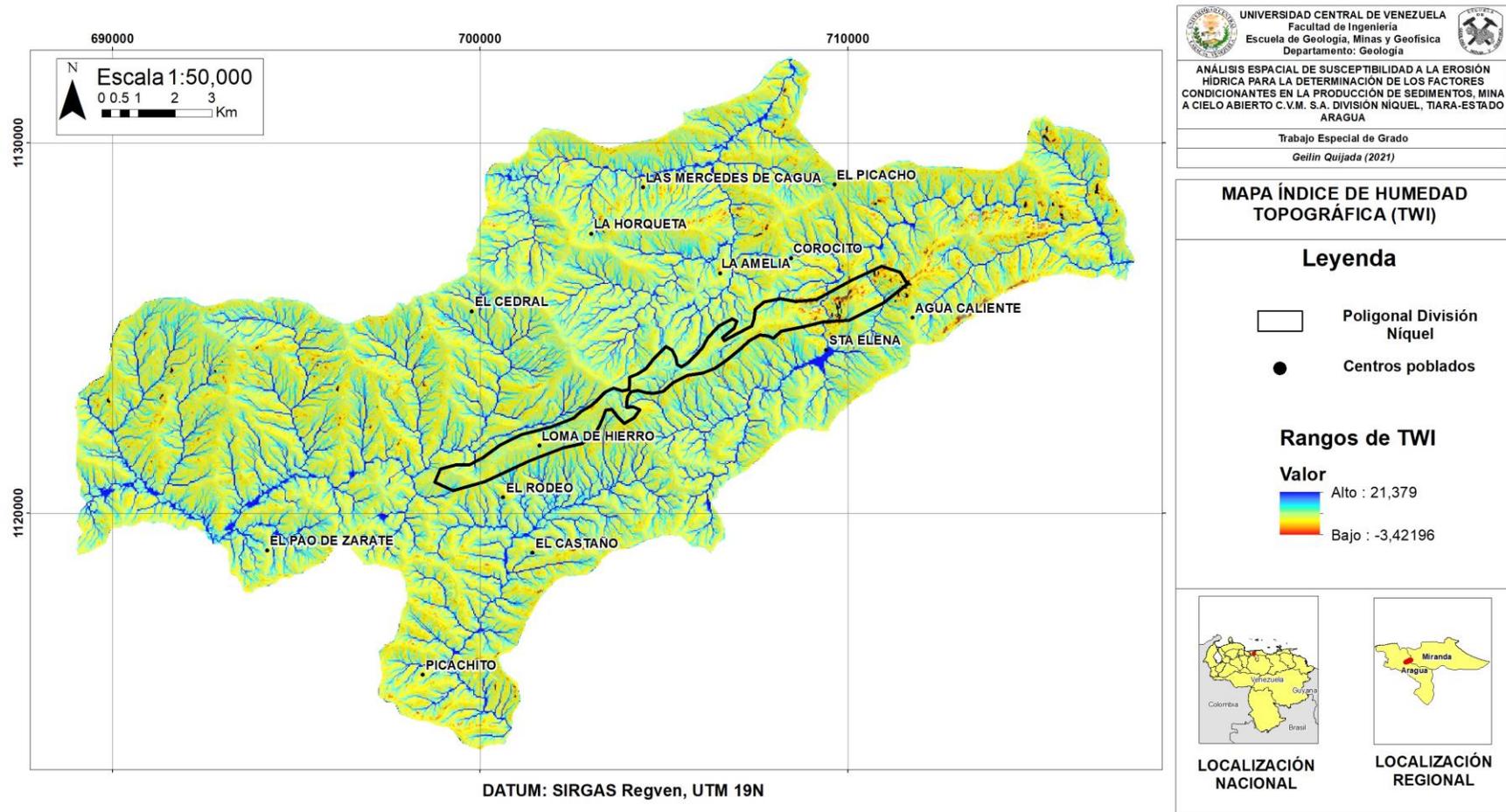


Figura 6.36. Mapa de Índice de Humedad Topográfica (TWI), aplicado al estudio de las subcuencas Mesia, Tiara, Cagua y Paito.

6.7.4 Mapa Índice Normalizado de Vegetación

El índice NDVI oscila entre, -0,4 a 0,74. Como se observa en la Figura 6.37, los valores más altos corresponden a las áreas con mayor cobertura vegetal, situadas en la formación de Bosque Nublado, mientras que, hacia las partes más altas de las Filas, se encuentra la vegetación Arbustiva (Matorrales), los cuales son etapas sucesionales del Bosque.

Por otro lado, se hallan los Herbazales, situados en las unidades topográficas de Filas y Colinas con pendientes pronunciadas, formadas por rocas residuales fuertemente fracturadas y el suelo, estando estos expuestos a fenómenos erosivos producto de la poca cobertura vegetal.

Los valores más bajos están relacionados con la Sabana Abierta de Montaña y la intervención antrópica; éstos se localizan hacia el área de extracción mineral ubicada en la fila de Loma de Hierro y los asentamientos urbanos y cultivos encontrados en las subcuencas de los ríos Paito, Mesia, Tiara y Cagua. En este sentido, la deforestación, además de la construcción sobre pendientes no adaptadas, como es el caso de los asentamientos y los cultivos, potencian el aumento en el proceso de erosión hídrica en las subcuencas, con la escasa cobertura vegetal.

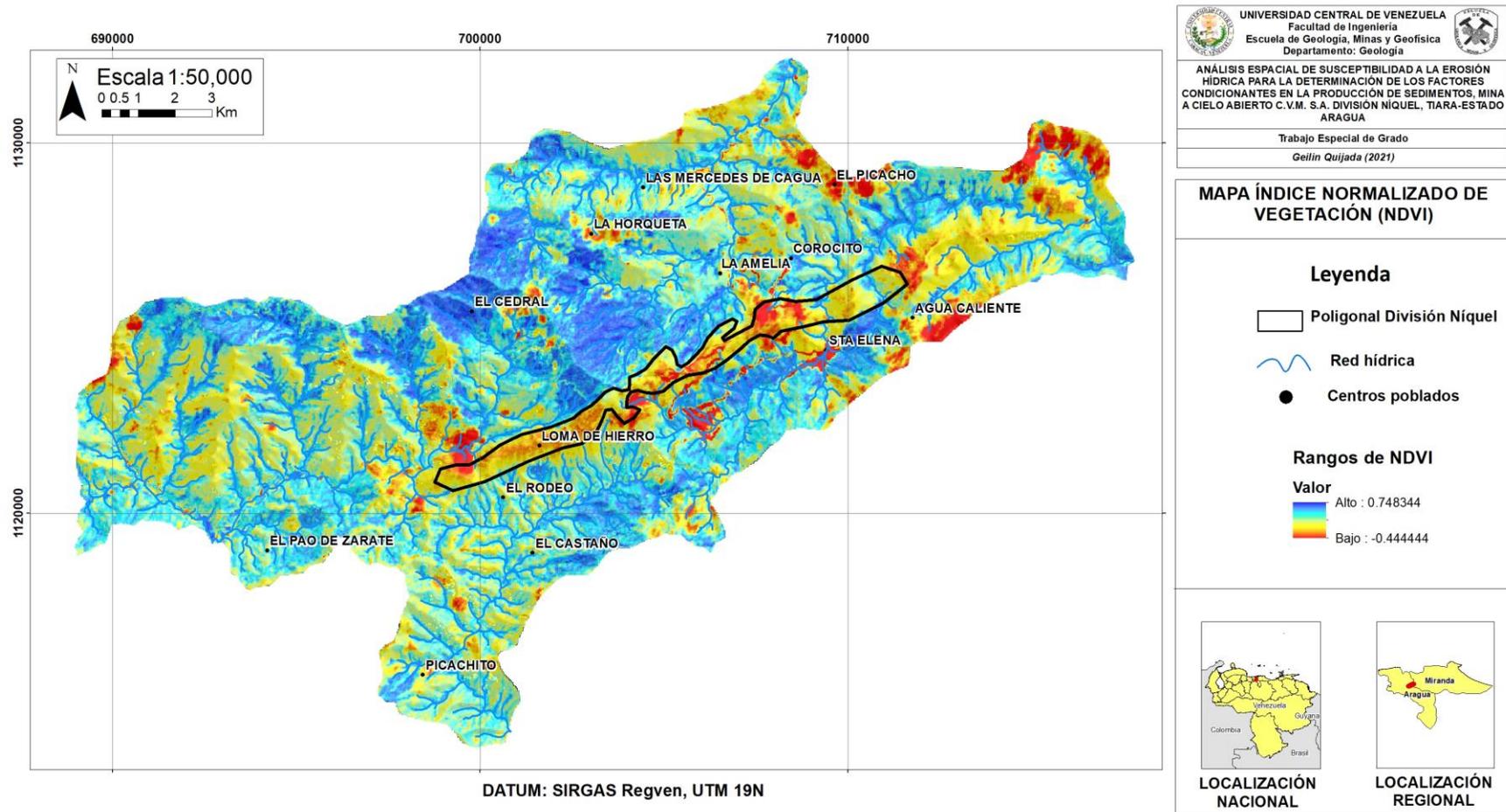


Figura 6.37. Mapa Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), aplicado al estudio de las subcuencas Mesia, Tiara, Cagua y Paito.

7 INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

En esta sección, se discute la integración del enfoque geológico en la degradación de la calidad de la roca primaria, con la pérdida de resistencia a la erosión, adicional, una vez que las operaciones mineras han iniciado y modificado la morfología del terreno, tras haber eliminado la vegetación y escarificado el suelo edáfico. Esto es, el proceso de intemperismo y meteorización, iniciales y naturales, se potencia por mecanismos de fracturación y desprendimiento de partículas: abrasión (shear), compresión, desgaste (attrition) e impacto, los cuales son ocasionados por la maquinaria minera rodante y excavadoras, así como por la propia acción de los sólidos desprendidos, friccionantes, en la pulpa agua-sólido, al ser transportada pendiente abajo.

Se establece un ciclo expansivo de desgaste de la roca primaria y del suelo residual, aun cuando hubiese pasado un largo período de tiempo sin actividad minera, porque este proceso ya ha sido catalizado con las acciones iniciales.

7.1 METEORIZACIÓN DE LA ROCA

Mediante la observación hecha en campo y el estudio petrográfico, se logró obtener la relación que existe entre el grado de alteración y descomposición de la roca, así como el aumento del fracturamiento, permitiendo el avance de la meteorización y la alteración de los minerales iniciales, constituyendo un ciclo inicial que condiciona el desgaste.

Al estar situado el yacimiento Loma de Hierro en un ambiente tropical, con lluvias continuas y abundantes, además de contar con temperaturas variables; genera en las rocas un alto grado de susceptibilidad al proceso de meteorización química, siendo éstos factores desencadenantes en función de otras variables como la mineralogía, la tectónica (levantamiento, fracturamiento), el grado de exposición y la topografía.

Las condiciones topográficas actuales de Loma de Hierro, indican tiempos de reposo y levantamiento tectónico, donde la exposición que representa la tectónica facilitó la activación de los procesos erosivos durante importantes periodos de tiempo transcurridos. De ello resultó, que los sedimentos provenientes del espesor laterítico fueran removidos y transportados hacia las áreas erosionadas, siendo esta zona característica por la presencia de capas de ferricreta (Figura 7.1b). Por esta razón, diversos autores, como Domenech et al. (2020), explican la existencia de una marcada discontinuidad del Mg entre los horizontes saprolita y laterítico, claramente distinguible por el cambio de color, textura, composición mineralógica, consistencia mecánica, etc. (Figura 7.1a).

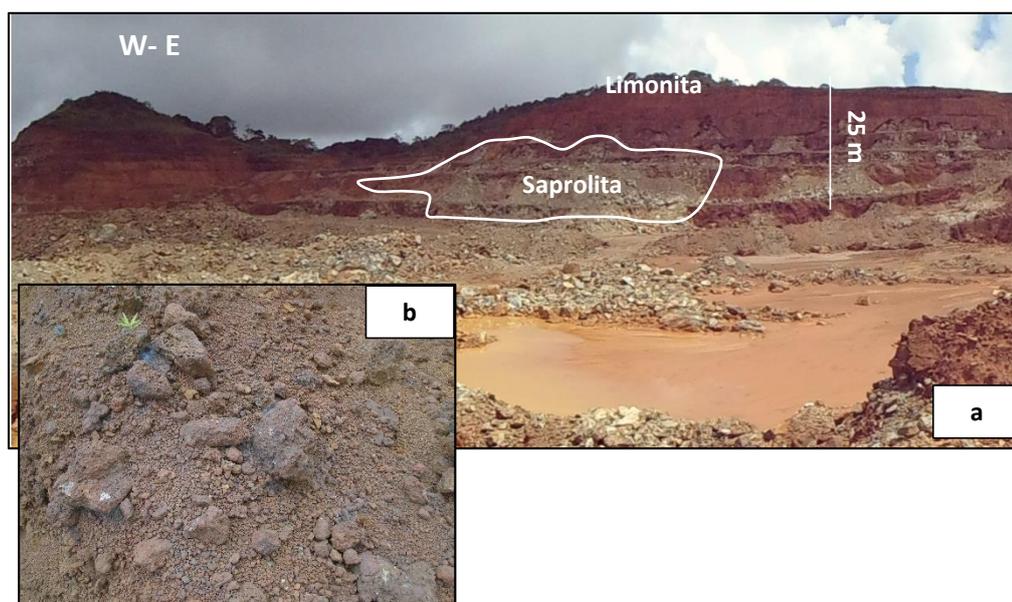


Figura 7.1. Fotografías: a: Perfil de meteorización del yacimiento, se puede observar el horizonte de saprolita dominado por la serpentina y la limonita "laterita", con colores más oscuros por la concentración de Fe. b: Ferricretas encontradas dentro del horizonte laterítico.

Con el transcurrir del tiempo, el proceso de meteorización se incrementa, formando la "Laterita", la cual es el residuo insoluble de la roca, dando lugar a una "costra endurecida" producto del enriquecimiento supergénico que ha concentrado cantidades apreciables de níquel y hierro. Temporalmente, ésta actúa como una capa protectora en la disminución y aporte de sedimentos dentro del sistema, aunque debido a sus valores más bajos de cohesión y fricción evaluados por Ochoa et al. (2011), le sugieren una estabilidad menor con respecto a la peridotita y serpentinita, lo que se traduce en costras agrietadas, producto de los esfuerzos dinámicos y la intervención antrópica.

En consecuencia, el proceso de erosión y transporte y deposición de sedimentos se reactiva, debido a que se potencia la infiltración (percolación) del agua por las grietas y se propaga el proceso de meteorización, para continuar el ciclo de alteración química y desgaste físico de la roca.

7.2 COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LA ROCA

Siendo que las muestras de rocas seleccionadas se encuentran serpentinizadas, producto de la transformación de la peridotita de olivino y ortopiroxeno a una serpentinita, principalmente formada de minerales del grupo de la serpentina como el crisotilo, se esperaba una mayor pérdida de peso como producto del ensayo de desgaste, desarrollado para tal fin.

La serpentización, a medida que avanza desfavorece progresivamente la permeabilización de las rocas, debido a que los minerales hidratados de magnesio son más resistentes a los procesos de meteorización superficial, razón por la cual se explica la mayor resistencia a los procesos de alteración superficial de las serpentinitas que las peridotitas. Esto, coincide con los resultados obtenidos por Ochoa et al. (2011), en el ensayo de Corte Directo, donde los valores de cohesión y fricción fueron elevados para las muestras de rocas. Por esta razón, la pérdida de masa en la manipulación de cada ciclo del ensayo no fue significativa.

Por consiguiente, los procesos erosivos y la producción de sedimentos resultan más significativamente de la acción integrada de otros factores que condicionan al yacimiento mineral, es decir, el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, la fuerza de arrastre del agua de escorrentía, la inclinación y longitud de la pendiente, además de los factores propios del suelo y la poca cobertura vegetal por las acciones antrópicas actuales, generando fenómenos activos importantes.

7.3 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN HÍDRICA

Las áreas menos susceptibles a la erosión hídrica se corresponden a los valles intramontinos, aunque estos son vulnerables a la acumulación de partículas finas y gruesas, generadas en las partes altas de las subcuencas y posteriormente transportadas por las aguas de escorrentía y los cursos de agua. Por otro lado, hacia

el Bosque Nublado se presenta la mayor cobertura vegetal y los suelos de baja erosividad correspondiente a los suelos tipo Ultisoles, permitiendo así una menor susceptibilidad.

Las subcuencas de los ríos Mesia y Cagua, ubicadas hacia la zona este del área de estudio, presentan distintos rasgos que incrementan potencialmente el proceso de erosión hídrica. Éstas muestran bruscos desniveles topográficos en sus cauces, que facilitan una mayor disección de las corrientes fluviales. De esto, resulta que los valores altos y muy altos de susceptibilidad se disponen a lo largo del río, mayormente, hacia las zonas media y baja de las subcuencas. Además, se concentra una cantidad considerable de escurrimientos, explicado por la fuerte inclinación y longitud de las laderas, de las unidades topográficas presentes, como las filas y las colinas.

Asimismo, el control litológico y el suelo juegan un papel decisivo, debido a que las rocas de la Metadiorita de la Guacamaya, el Esquistos de Tinapú y la Ofiolita de Loma de Hierro, son las litologías más alteradas por los procesos exógenos. El suelo tipo Inceptisol desarrollado en estas litologías, es bastante joven y con poco desarrollo en sus horizontes, por lo cual la capacidad erosiva de la escorrentía es mucho más severa.

Adicionalmente, la inexistente cobertura vegetal, producto de la intervención minera progresiva, afecta directamente a la subcuenca de Mesia, donde la alteración del relieve, causada por los frentes de explotación y las vías de acarreo, generan susceptibilidad del terreno a la erosión. Estando este situado en la dirección de las escorrentías, de modo que los sedimentos generados por los trabajos mineros, son movilizadas con mayor facilidad por las fuerzas de las aguas de escurrimiento.

Debido a que, las subcuencas de los ríos Tiara y Mesia presentan una geometría ligeramente alargada, razón por la cual presentan un potencial considerablemente menor en la generación de flujos y concentración de las aguas de escorrentía aportadas por los períodos de lluvias intensas. Debido a que el tiempo de viaje del agua es mucho más largo, y por consiguiente, los máximos picos de crecidas son

menos súbitos cuando ocurren lluvias concentradas, por esta razón, las características morfométricas, correspondientes al relieve accidentado, además de la escasa cobertura vegetal producto de la intervención antrópica son más preponderantes, debido a que permiten el aumento en la energía de la movilización y transporte de los sedimentos, al encontrarse las subcuencas dentro de los índices de mayor agresividad climática de la región.

Respecto a las subcuencas Cagua y Paito, éstas ocupan las superficies con mayor extensión, siendo las áreas de alta y muy alta susceptibilidad, correspondientes al relieve escarpado de montaña con laderas de pendientes pronunciadas. Estos patrones de susceptibilidad se hallan controlados, principalmente, por la poca cobertura vegetal, las pendientes, y las características morfométricas correspondientes a geometrías ensanchadas, condiciones por las cuales permiten concentrar mayores volúmenes de aguas de escorrentía. En este sentido, la subcuenca de Paito muestra los problemas más graves hacia las laderas descubiertas de vegetación, donde éstas aportan el material mediante el desprendimiento de rocas correspondientes al Esquito de Tinapú, siendo dicha litología susceptible al proceso de erosión.

De igual manera, la subcuenca del río Cagua se encuentra bajo las mismas condiciones, pero es de hacer notar que, según el mapa de Agresividad Climática, ésta se halla en la zona con las más altas precipitaciones. Por esta razón, el impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento es mayor, en consecuencia, debilita la estructura de los suelos del tipo Ultisoles, debido a que se encuentran en terrenos con poca cobertura vegetal. Por ende, la resistencia a la acción de los agentes de erosión del suelo es menor, con su consecuente transporte de partículas finas y gruesas, favoreciendo así en la alteración negativa del río Cagua.

Por lo tanto, todas estas propiedades características y condiciones de las rocas en el yacimiento mineral, así como el diseño de mina y la localización en el territorio, desde el punto de vista climatológico, resulta imprescindible aumentar y profundizar en las medidas de mitigación del proceso de erosión hídrica, las cuales faciliten la conducción del escurrimiento, mediante buenas prácticas de conservación ambiental, como: obras de infraestructura, hidrogeológica e hidráulica, ubicadas en las laderas con altas pendientes donde ocurre fuerte erosión. Es necesario

aumentar la atención, a aquellos lugares donde se observa el desarrollo de cárcavas y desprendimiento de sólidos en el yacimiento con mena níquelífera Loma de Hierro. Esto es resultado de la significativa agresividad pluvial, asociado también por la escasa cobertura vegetal y la sobreutilización de los suelos, incidiendo así en la desestabilización del paisaje y en la colmatación de los cauces de los ríos.

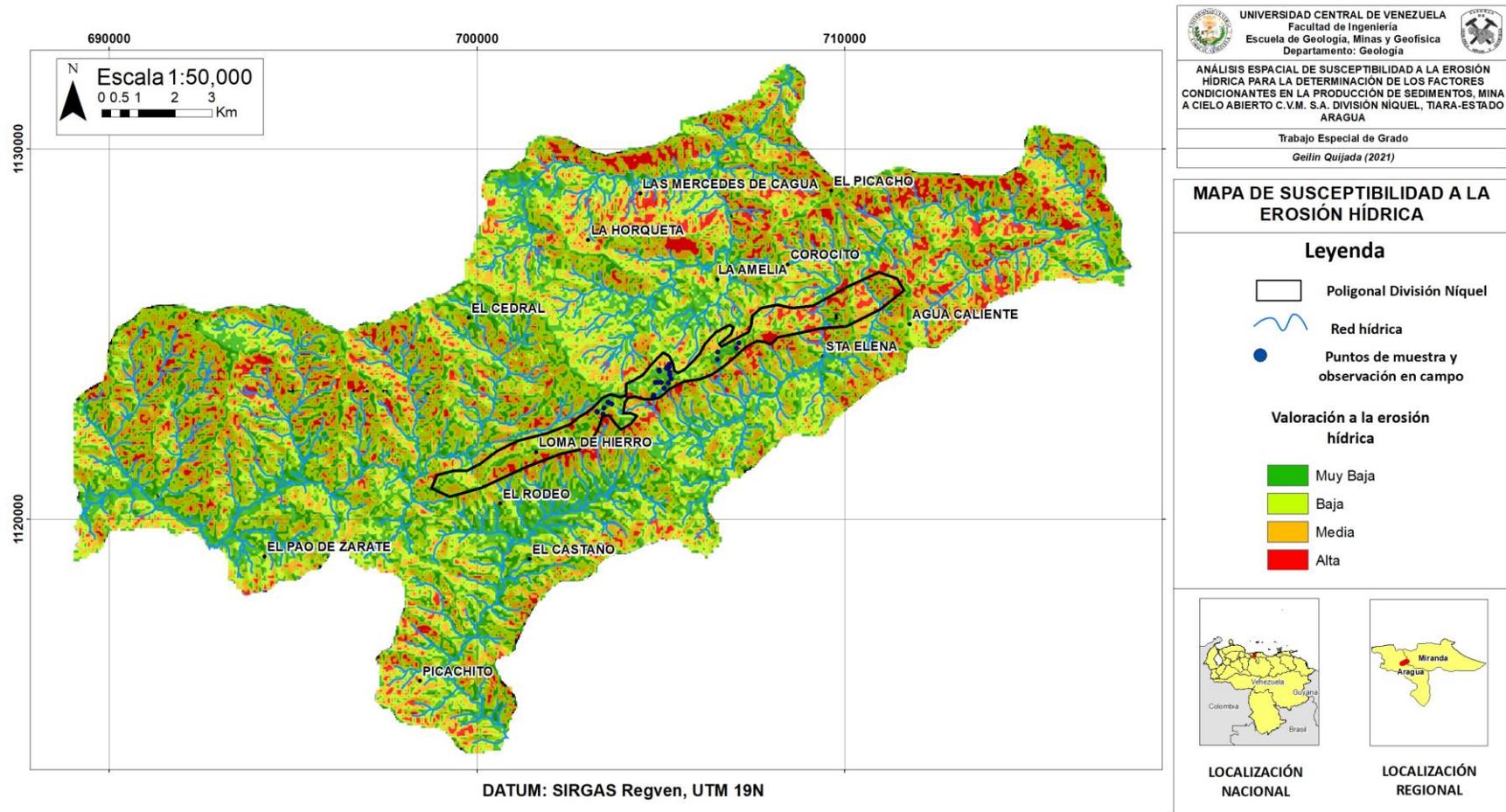


Figura 7.2. Susceptibilidad a la erosión hídrica actual dentro de las subcuencas Tiara, Mesia, Paito y Cagua.

7.4 MAPA POTENCIAL A LA EROSIÓN HÍDRICA

Los índices del terreno, junto con el NDVI, fueron reescalados del 0 a 255, donde los valores bajos corresponden a una erosión leve o nula, y los altos a una erosión más importante o alta. Posteriormente, fueron integrados en un análisis multivariado para el reconocimiento de las áreas con potencial a la erosión hídrica.

Se observa concordancia en el mapa final, obtenido a partir de dichas características, con el mapa de susceptibilidad a la erosión hídrica, a partir de los factores estudiados anteriormente, como: tipo de suelo, longitud e inclinación de la pendiente, agresividad de las precipitaciones y la cobertura vegetal. La Figura 7.3, muestra que las zonas con mayor probabilidad a la ocurrencia de la erosión hídrica se encuentran hacia la unidad de relieve alto, como las filas halladas hacia las subcuencas de Paito, Cagua y Mesia, las cuales tienen un alto valor en el factor LS, y asimismo, se corresponden con la escasa cobertura vegetal e incrementos en los índices de humedad topográfica y de potencial de corrientes. De ello, resulta que las condiciones sean favorables para el proceso erosivo, debido a que las rocas ígneas metamórficas se encuentran meteorizadas, facilitando el desprendimiento y transporte de las partículas, con subsecuente desgaste y reducción del tamaño, durante eventos de precipitaciones de corta duración, pero intensas, que se presentan en el área y producen inestabilidad del terreno.

Por otra parte, las subcuencas de los ríos Mesia y Tiara se encuentran dentro de la poligonal de extracción mineral, en la Fila de Loma de Hierro. Esta presenta la calificación más alta de erosividad, ya que sus laderas poseen altos ángulos de inclinación que facilitan la generación y eficacia de los escurrimientos, apreciados a través de los índices TWI y SPI. Además, son afectados por los periodos de lluvias intensas, que erosionan a las rocas, el saprolito y los suelos, consecuentemente formando las cárcavas en las áreas con muy poca cobertura vegetal.

Estas laderas, al estar sin ninguna una gestión específica para el control de sedimentos en minería a cielo abierto, hace que la problemática de los procesos erosivos naturales y los inducidos por la actividad minera sea aún mayor. Por lo

tanto, el transporte de los sedimentos a través de los flujos se incrementa, ocasionando un impacto significativo en la calidad del agua de los ríos cercanos.

Los valores más bajos de erosión están distribuidos hacia el Bosque Nublado y los Matorrales, donde la cobertura vegetal actúa como una capa protectora ante los procesos de erosión hídrica. Asimismo, la Unidad de Relieve Bajo correspondiente a los Valles Intramontinos muestran poca probabilidad de ocurrencia al proceso de erosión.

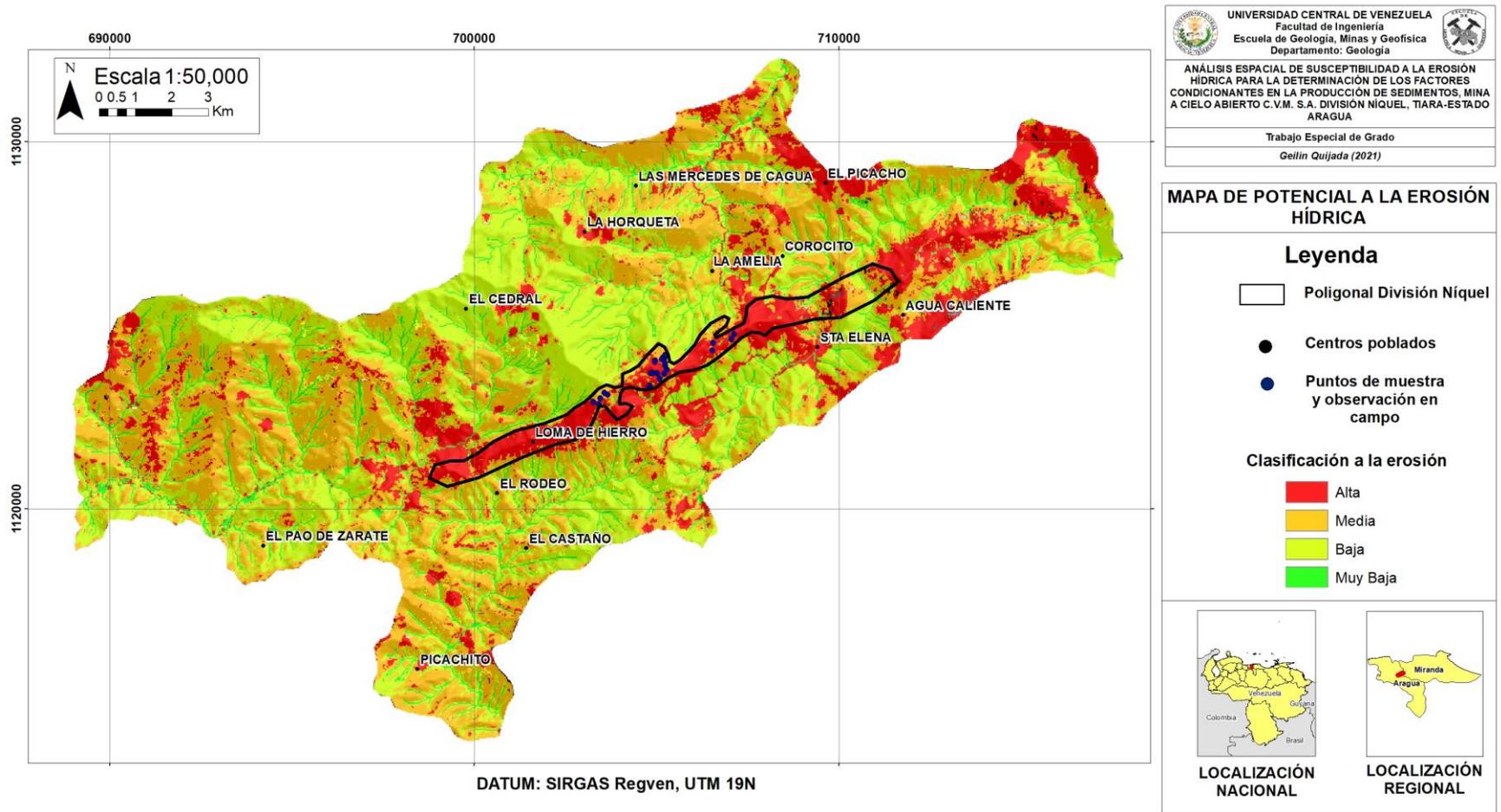


Figura 7.3. Erosión hídrica potencial en las subcuencas Tiara, Mesia, Paíto, Cagua.

8 CONCLUSIONES

8.1 GENERALIDADES

Con esta investigación de grado en Ingeniería Geológica, fue posible un Análisis Espacial de Susceptibilidad a la Erosión Hídrica (Erodabilidad), como componente de evaluación ambiental en las subcuencas hidrográficas donde ocurre el yacimiento de Loma de Hierro, con serie de tiempo 1999-2019.

Esto, con el objetivo de producir conocimiento Geoambiental, aplicando procesamiento de imágenes satelitales como método de gestión de información geográfica y de análisis, con la finalidad de integrar los factores geodinámicos que rigen el proceso de erosión y transporte en suspensión hídrica.

En lo relativo a la relación de Erodabilidad-Erosividad

Mediante geoprocusamiento digital, fue posible caracterizar morfométricamente cada una de las cuatro (04) subcuencas, de los respectivos ríos: Mesia, Tiara, Paito y Cagua. Entre los rangos morfométricos, se tiene que los mínimos y máximos más importantes son: 36km² y 80km², en área drenada; 32,96km y 44,57km, en perímetro; 12,98km y 31,8km, en pendiente media; en densidad de drenajes 2,06km/km² (mínima) y 2,18km/km² (máxima).

En cuanto a factores morfométricos, propuestos en referencias, se tiene que:

En lo relativo al Factor de Forma, las subcuencas de los ríos Tiara y Mesia presentan 0,37 y 0,27, respectivamente, lo cual indica geometrías alargadas, menos propensas a concentrar el escurrimiento superficial. Mientras que, para las subcuencas de los ríos Paito y Cagua, resultaron en 0,58 y 0,50, respectivamente, lo cual indica geometrías ligeramente ensanchadas, cuyas tendencias son altas a concentrar el escurrimiento de las aguas de lluvia.

En cuanto al Coeficiente de Compacidad, resultaron: 1,34 para la subcuenca del río Tiara y 1,63 para la subcuenca del río Mesia, clasificando como oval redonda a oval-oblonga y oval oblonga a rectangular oblonga, respectivamente; es decir, sus

capacidades para retener volúmenes de agua de escorrentía son bajos. Por otro lado, la subcuenca del río Paito presenta un valor de 1,35 y la subcuenca del río Cagua 1,30, valores que las clasifican como oval redonda a oval-oblonga, respectivamente, es decir, presentan una mayor rapidez relativa para concentrar volúmenes de agua de escorrentía.

Y, en cuanto al Coeficiente de Circularidad de Miller, resultaron: 0,50 para Tiara y 0,37 para Mesia, con formas ovaladas, indicativas de una producción de caudales altos, mientras que la susceptibilidad es baja antes los eventos potenciales de crecientes, Por otra parte, se determinaron valores de 0,53 para Paito y 0,58 para Cagua, con una forma oval para ambas, que siendo ésta geometría similar a un círculo, presentan potencialidad en la generación de crecientes, mientras que son bajas en las producciones de caudales.

El mayor Tiempo de Concentración fue de 2,78horas para la subcuenca del río Mesia, por lo que el agua de lluvia, tarda más en llegar a la parte más baja de la subcuenca. Por otra parte, el menor Tiempo de Concentración resultó en 1,34horas para la subcuenca del río Cagua.

En cuanto al Orden de las Corrientes, el mayor resultó en cinco (5), para las subcuencas de los ríos Paito y Cagua, indicando la presencia de gran cantidad de tributarios que alimentan al colector principal. Mientras que las subcuencas de los ríos Tiara y Mesia, presentan corrientes hasta de Orden igual a cuatro (4). Por lo cual, las diferencias de ordenes en los ríos principales no es significativa para producir desemejanza en la susceptibilidad de erosión.

En lo relativo a la Razón de Bifurcación, la mínima resultó para Tiara en 1,99, valor que se relaciona a una subcuenca bien drenada, con un menor tiempo de concentración de las aguas fluviales y, por ende, una concentración más rápida del agua, siendo ésta propensa a generar crecidas más violentas. Por otro lado, la máxima fue de 2,63 para Mesia, lo cual es indicativa de un drenaje eficiente, con un mayor tiempo de concentración de las aguas fluviales, y por ende, una concentración más lenta que la hace menos propensa a generar crecidas violentas.

Apoyada con registros de estaciones climatológicas locales y otros registros descargados del programa *Power-Larc* administrado por la *National Agency of Space and Aeronautics* (NASA), se realizó el análisis de las condiciones hidrometeorológicas, indicando que la región de estudio, al estar localizada en una estribación montañosa de la Serranía del Interior y dentro de la Zona de Convergencia Intertropical, presenta factores muy relevantes en la formación de abundantes nubes, así como en la cantidad, intensidad, duración y distribución de las precipitaciones, características del comportamiento climático. Los promedios anuales varían entre 363,67mm y 1.609,84mm, con Temperaturas Medias entre los 19°C y 24°C. Por otra parte, la Evapotranspiración Potencial varía entre los 8 y 11cm y, el Coeficiente de Humedad varía entre -0,28 y 12,24.

Mediante la observación realizada en campo y el estudio petrográfico en laboratorio, se logró relacionar el grado de descomposición de la roca en sitio con el grado de alteración mineral, así como el aumento del fracturamiento. La roca madre es una Harzburgita, conformada por los minerales: Forsterita del grupo del Olivino, en un 65 a 70% y, la Enstantita del grupo de los Ortopiroxenos, en un 10 a 20%. En este sentido, la estabilidad relativa de la roca madre se encuentra ligada por los minerales de las rocas ultrabásicas y básicas, los cuales se caracterizan por su rápida alteración a minerales ferromagnesianos como los del grupo de la Serpentina, ya que son más estables a las condiciones exógenas.

Consecuentemente, al estar situado el yacimiento Loma de Hierro en un ambiente con lluvias continuas y abundantes, además de contar con temperaturas variables, se produce en las rocas un alto grado de susceptibilidad al proceso de meteorización química. Con otros factores condicionantes y desencadenantes, como el fracturamiento y la topografía, inducen el avance de las aguas de infiltración en las diaclasas, facilitando la disolución progresiva del Olivino y el Ortopiroxeno, alterados a una Serpentinita impermeable, cubierta de manera ascendente por un horizonte de Sapolita y una Costra Laterítica.

Temporalmente, la Laterita actúa como una capa protectora en la disminución y aporte de sedimentos, aunque debido a sus valores bajos, de cohesión y fric-

ción, inducen costras agrietadas, producto de los esfuerzos dinámicos y la intervención de los trabajos mineros actuales, activándose muy dinámicamente el proceso de erosión.

Por consiguiente, estos efectos combinados permitieron explicar por qué las lluvias características para ese período de tiempo (1999-2017), en combinación con el relieve y litología, tienen una dinámica muy activa sobre las rocas primarias y los suelos resultantes.

En cuanto a lo georresistente, debido a que los minerales hidratados de magnesio de las Serpentinitas son más resistentes a los procesos de meteorización superficial, el desgaste de la roca determinado mediante el *Slake Durability Test*, en el laboratorio de Mecánica de Rocas, es bajo, con valores de 0,85% y 0,42%, en pérdida de masa.

En consecuencia, los procesos erosivos y la producción de sedimentos resultan más significativamente de la acción integrada de los factores condicionantes y desencadenantes en el yacimiento mineral, es decir, el material laterítico poco consolidado, el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, la fuerza de arrastre del agua de escorrentía, la inclinación y longitud de la pendiente, además de los factores propios del suelo y la poca cobertura o nula vegetal, debido a las operaciones mineras, favoreciendo así la alteración negativa de las subcuencas de los ríos Mesia, Tiara, Paito y Cagua.

En lo relativo a Susceptibilidad a la Erosión Hídrica

En las subcuencas de los ríos Mesia, Tiara, Paito y Cagua, concurren características típicas para el incremento potencial del proceso de erosión hídrica, tanto pendientes, agresividad climática, litología, comportamiento hidrogeológico como denudación de cobertura vegetal.

Las subcuencas de los ríos Cagua y Paito, presentan valores de susceptibilidad Alta y Muy Alta, en las áreas correspondientes al relieve escarpado de Montaña con laderas cuyas inclinaciones son pronunciadas hasta 65,86°. Estos patrones de susceptibilidad están controlados, principalmente, por la poca cobertura vegetal,

las pendientes, y sus características morfométricas, que permiten concentrar una cantidad considerable de escurrimientos.

La subcuenca del río Paito muestra los problemas más graves hacia las laderas descubiertas de vegetación, mientras que la subcuenca del río Cagua se encuentra bajo condiciones similares, además de ubicarse con las más altas precipitaciones según el Mapa de Agresividad Climática. Por esta razón, el impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento es mayor, y, en consecuencia, debilita la estructura de los suelos del tipo Ultisoles.

La subcuenca del río Mesia presenta bruscos desniveles topográficos en sus cauces, los cuales facilitan una mayor disección de las corrientes fluviales, explicado por la fuerte inclinación y longitud de las laderas, de las unidades topográficas presentes, como las Filas y las Colinas. De esto, resulta que los valores altos y muy altos de susceptibilidad se disponen a lo largo del río, mayormente, hacia las zonas media y baja de esta subcuenca.

Asimismo, el control litológico y el suelo son determinantes, debido a que las rocas de la Metadiorita de la Guacamaya, el Esquisto de Tinapú y la Ofiolita de Loma de Hierro, son las litologías con menor resistencia al proceso de meteorización. El suelo del orden Inceptisol se encuentra desarrollado en áreas con escasa cobertura vegetal y pendiente pronunciadas, lo cual conlleva que el material meteorizado sea rápidamente removido, siendo su capacidad de erodabilidad alta 0,74ton/h, generando una escorrentía mucho más severa.

Las características morfométricas de las subcuencas Tiara y Mesia, correspondientes al relieve accidentado, además de ser suelos, parcial y completamente descubiertos de vegetación, permiten el aumento en la energía de la movilización y transporte de los sedimentos, al encontrarse las subcuencas dentro de los índices de mayor agresividad climática.

Todas estas características, además de las condiciones actuales producto de la intervención minera progresiva, causada por los frentes de explotación, taludes

inestables y las vías de acarreo, generan una susceptibilidad alta al proceso de erosión hídrica en las subcuencas de los ríos Tiara y Mesia. Por lo tanto, el transporte de los sedimentos a través de los flujos se incrementa, ocasionando un impacto significativo en la calidad del agua de los ríos que delimitan al yacimiento.

Los Mapas de Susceptibilidad a la Erosión Hídrica demuestran que las zonas más susceptibles al proceso de erosión se encuentran en las subcuencas hidrográficas de los ríos Tiara y Mesia, donde las pendientes presentan inclinaciones hasta de $65,86^\circ$, las laderas mantienen escasa cobertura vegetal y se han desarrollado suelos jóvenes, con poco desarrollo de horizontes. Condicionado climáticamente el yacimiento mineral, estas características se combinan en valores altos y muy altos de susceptibilidad, adicionalmente inducida por la intervención de las operaciones mineras. Integradamente, en Loma de Hierro, se desencadena una escorrentía severa que induce el transporte de sedimentos en suspensión hídrica provenientes de los suelos lateríticos y rocas saprolíticas del yacimiento mineral.

Finalmente, la validez de cualquiera de los métodos utilizados depende de los datos disponibles correspondientes a las variables explicativas en el proceso de erosión hídrica que se desarrolla en la región de estudio.

9 RECOMENDACIONES

Conservar y, en lo posible, aumentar la densidad de las estaciones climatológicas, debido a la necesidad de tener datos con mayor exactitud de las variables meteorológicas, principalmente de la precipitación, específicamente en los meses de mayo a octubre, identificados con las mayores precipitaciones. Esto permitiría entender mejor los focos de escorrentía superficial en las subcuencas.

Evaluar el efecto de Encostramiento de la Laterita, como mecanismo activo en la producción de sólidos en suspensión hídrica, dando continuidad a esta línea de investigación Geoambiental Minera.

En investigaciones sucesivas, incorporar el factor Grado de Meteorización, como variable independiente en la disminución de la resistencia de las litologías identificadas en las subcuencas, apreciando el efecto de una variable adicional a las cuatro (4) integradas, aplicando la metodología empleada en esta investigación.

Realizar Estudios de Susceptibilidad en las subcuencas de estos ríos, al menos cada 10 años, o con mayor frecuencia, si los trabajos mineros y el urbanismo siguen creciendo aceleradamente, a los fines de conocer sus variaciones a través del tiempo, factor que resulta determinante en cualquier estudio geomorfológico.

Con estos Mapas de Susceptibilidad a la Erosión Hídrica, es posible complementar con trabajos de campo más específicos en lo litológico, morfométrico y georesistente, para un análisis más profundo de las relaciones entre factores desencadenantes, potenciando los resultados obtenidos, apoyados en diversas investigaciones precedentes.

La metodología empleada en esta investigación representó un esfuerzo importante en el objetivo de alcanzar una mejor gestión en el proceso de control de la erosión hídrica. La implementación y uso de esta herramienta de pronóstico, debe ser considerada como parte de las acciones de prevención y mitigación de impactos ambientales sobre los recursos hídricos, tal como en el efecto social que este proceso conlleva.

10 BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE SALAZAR, I. (2012). Estudio de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y de los hongos septados oscuros (HSO), y su relación con el suelo en dos litologías diferentes en la localidad de Loma de Hierro, estado Aragua. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

ARABINDA S. (2010). Integrating terrain and vegetation indices for identify potential soil erosion risk área. Obtenida el 16 de mayo 2020, de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1007/s11806-010-0342-6>.

ARNOLDUS, H. (1978). An aproximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. Gran Bretaña: John Wiley y Sons, Inc. Chichester. 127-132p.

BASTIDAS, Y. (2018). Propuesta de rediseño del manejo de agua de mina Colombia como aporte a la gestión integral de aguas, Municipio El Callao, estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

BECK, C. (1985). *La Chaîne Caraïbe Au Meridien de Caracas: Geologie, Tectogenese, Place Dans L' Evolution Geodynamique Mesozoique-Cenozoique Des Caraïbes Meridionales*. Geos, Caracas (44). 159-290.

BESTEIRO, S. & DELGADO, M. I. (2011). Evaluación de la agresividad de las precipitaciones en la cuenca del Arroyo El Pescado, provincia de Buenos Aires (Argentina). Obtenida el 21 de noviembre de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/261425389_Evaluacion_de_la_agresividad_de_las_precipitaciones_en_la_cuenca_del_Arroyo_El_Pescado_provincia_de_Buenos_Aires_Argentina.

BIRBE, N. V. (2009). Actualización geológica de la zona de explotación del yacimiento Loma de Hierro, estado Miranda. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

BUITRAGO, J.Y. (2011). Desarrollo de un modelo de visualización de erosión hídrica en el municipio de Samacá (Boyacá). Estudio de caso. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Disponible: http://bdigital.unal.edu.co/5098/1/JEINER_YOBANY_BUITRAGO_pte._1.pdf [Consulta: 2019, marzo 15].

CABRERA, O. Y FERNÁNDEZ. L. (2008). Transporte y sedimentación en el delta de San Ignacio, laguna de Tacarigua, estado Miranda. Venezuela. Terra. Nueva Etapa, XXIV (35), 141-166. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=721/72103506> [Consulta: 2020, febrero 5].

CAMACHO, C. (2016). Modelamiento de la escorrentía en cuencas de montaña: caso de estudio río Vilcanota. Trabajo Especial de Grado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/5936>.

CAMARGO, C. Y OTROS. (2013). Evaluación multitemporal de procesos de erosión en ladera mediante el uso de SIG y sensores remotos en la micro-cuenca torrencial “La Macharí”, estado Táchira-Venezuela. Obtenida el 27 de agosto de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/279204549_Evaluacion_multitemporal_de_procesos_de_erosion_en_ladera_mediante_el_uso_de_SIG_y_sensores_remotos_en_la_micro-cuenca_torrencial_'La_Machiri'_estado_Tachira-Venezuela.

CAMARGO, C. Y OTROS. (2017). Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica. Obtenida el 5 de septiembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/328342438_Erosion_hidrica_fundamentos_evaluacion_y_representacion_cartografica_una_revision_con_énfasis_en_el_uso_de_sensores_remotos_y_Sistemas_de_Informacion_Geografica.

CASTILLO, A.J. (2017). Control de sedimentos en minería venezolana a cielo abierto. Trabajo de Ascenso, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

CEBALLOS, D. Y TORO, L. J. (2012). Evaluación de susceptibilidad a la erosión por el cambio de cobertura debido a la minería, en el municipio de Anorí, Antioquia, Colombia. [Revista en línea]. 15. Disponible: <https://n9.cl/nlxe>.

COLLELA M. (1986). Análisis de los factores que determina el límite sabana-bosque en la región de Loma de Hierro. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

COLÍN, G. Y OTROS. (2013). Diagnóstico de la erosión hídrica de la cuenca del río Pichucalco. [Revista en línea]. 5. Disponible: <https://revistas.chapingo.mx/inagbi/revista/articulos/viewer.html?file=r.inagbi.2013.04.002.pdf>.

COVA, J. R. (2018). Propuesta de un sistema de control integral de sólidos en suspensión hídrica, mina a cielo abierto C.V.M. S.A. División-Níquel, Tiara – estado Aragua. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

DE REGOYOS, M. (2003). Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo GeoWepp a dos pequeñas cuencas de Madrid. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Disponible: <http://oa.upm.es/450/1/02200329.pdf> [Consulta: 2019, enero 23].

DOMENECH, C. Y OTROS. (2017). *Geology, geochemistry and mineralogy of the Loma de Hierro Ni-laterite deposit*, Venezuela. [Revista en línea]. 22. Disponible: <http://www.ehu.eus/sem/revista/macla.htm> [Consulta: 2020, febrero 8].

DOMENECH, C. Y OTROS. (2020). The Loma de Hierro Ni-laterite-deposit (Venezuela): Mineralogical and chemical composition. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexica* [Revista en línea]. 72 (. Disponible: <http://www.ehu.eus/sem/revista/macla.htm> [Consulta: 2020, noviembre 5].

DOMENICO, P. Y SCHWARTZ, F.W. (1998). Hidrogeología física y química, 2da edición. Nueva York: Jhon Wiley & Sons Inc., Nueva York.

FAO, (1997). “Manejo integrado de cuencas: Documento de referencia para los países de América Latina”. Santiago, Chile. 542p.

FATORELLI, S. Y FERNÁNDEZ, P.C. (2011). Diseño hidrológico [Libro en línea]. Water Assesment & Advisory Global Network. Disponible: <https://marianiztli.files.wordpress.com/2016/06/disenio-hidrologico.pdf> [Consulta: 2020, septiembre 20].

FREYSSINET, PH. y otros. (2005). *One-forming processes related to latheritic weathering*. Society of Economic Geologist, Inc. Economic Geology 100th Aniversary Volume. pp 681-722.

GALLARDO, T. (2008). Caracterización mineralógica del perfil laterítico de Ni de Loma Ortega. República Dominicana. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Barcelona, Barcelona.

GLEESON S. A. (2005). Nickel laterites through geological time. Salt Lake City Annual Meeting (October 16–19, 2005).

GOLIGHTLY J.P. (1981). *Nickeliferous laterite deposits*. *Economic Geology* 75th Anniversary Volume, 710-735.

HOOKE, R. (1994) *On the efficacy of humans as geomorphic agents.*: *GSA Today*, V. 4, no. 9. 217, 224–225 p.

LAVIÉ, H. (1967). Evaluación de los yacimientos de lateritas níquelíferas en Loma de Hierro, estados Aragua y Miranda. *Bol. Geol.* 8(16): 199-214. Caracas: Ministerio de Minas e Hidrocarburos.

MENDOZA, P. (s.f.). Perforadora de Rocas. Trabajo de Grado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Disponible: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/8748/PIERO_MENDOZA_PERFORADORA_ROCAS_ANEXOS.pdf?sequence=2 [Consulta: 2019, abril 2].

MONTOYA, J. J. (2009). Marco histórico y estado del arte de los modelos de evolución del paisaje y de erosión. *Revista Ingeniería Universidad de Medellín*.

Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/trium/v8n15s1/v8n15s1a06.pdf> [Consulta: 2019, enero 23].

OCHOA, K Y REYES, R. E. (2011). Propuesta de los parámetros para el diseño de estabilidad de taludes y de los depósitos finales en minera Loma de Níquel, C.A. municipio Guaicaipuro, estado Miranda. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

PEÑA, C. (2015). Estudio morfométrico y estimación de caudal de creciente de la quebrada La Caya hasta la desembocadura en río San Pablín del municipio de Guican-Boyacá utilizando el método racional. Trabajo Especial de Grado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Disponible: <https://n9.cl/lsvv>.

PROENZA, J.A. (2015). Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en Yacimientos Lateríticos. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía. Disponible: http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla20/Macla20_003-9.pdf [Consulta: 2019, marzo 15].

ROA, J. (2005). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. [Revista en línea]. 48. Disponible: http://www.saber.ula.ve/cgi-win/be_alex.exe?Acceso=T016300004888/3&Nombrebd=Saber.

RODRÍGUEZ, J. Y MARTÍNEZ, J. L. (2016). Cartografía geológica y cálculo de balance hídrico para la construcción de la represa de la hidroeléctrica de Santander-Municipio de los Santos, Santander. Trabajo Especial de Grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Disponible: <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1881/1/TGT-447.pdf>.

ROFFE, T. Y OTROS. (s.f.). Análisis del factor LS en diferentes modelos de predicción de la erosión hídrica del suelo. Obtenida el 5 de mayo de 2020, de <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal15/Nuevastechnologias/Sig/18.pdf>.

SÁNCHEZ, J. (s.f.). Hidrología superficial (III): Relación de precipitación - escorrentía. Consultado el 20 de agosto de 2020, de https://hidrologia.usal.es/temas/Hid_Sup_3.pdf.

SÁNCHEZ, J. (s.f.). Cálculo de la precipitación neta mediante el método del S.C.S. Consultado el 20 de agosto de 2020, de https://hidrologia.usal.es/practicas/Pneta_SCS/Pneta_SCS_fundam.pdf.

SAATY, T. (1990). Cómo tomar una decisión: El proceso de jerarquía analítica. *Revista Europea de Investigación Operativa [Revista en línea]*. 48 (1). Disponible: [sci-hub.se/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://sci-hub.se/10.1016/0377-2217(90)90057-I). [Consulta: 2020, junio 29].

SANTOS, L. & GONZÁLEZ, C. A. (1999). Mapa de índice de erodabilidad en la cuenca alta del río Bogotá utilizando el sistema de información geográfica ARC-INFO. Consultado el 2 de febrero de 2020, Universidad Nacional de Colombia: <https://doi.org/10.15446/inginvestig.v0n43.21078>.

SUÁREZ, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. 1era ed. Colombia. 545 p.

STONE R. Y HILBORN, D. (2012). Hoja informativa de la ecuación de Pérdida Universal del Suelo (USLE). Consultado el 1 de junio 2020, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Asuntos Rurales, Ontario: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-051.htm>.

TAROLLI, P & GIULIA, S. (2016). *Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes*. Consultado el 01 de junio de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/290390408_Human_topographic_signatures_and_derived_geomorphic_processes_across_landscapes.

THORNTHWAITE, C., & MATHER, J. (1955). *The Water Balance*. *Climatology*, 1-104.

THORNTHWAITE, C., & MATHER, J. (1957). Instructions and Tables for Computing Potencial Evapotranspiration and the Water Balance. *Climatology*, 181-11.

URBANI, F. (2012). La Cordillera de la Costa de Venezuela: Evolución de su conocimiento geológico desde el siglo XVI al XXI. Ediciones electrónicas Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, Caracas. Disponible: http://www.acading.org.ve/info/publicaciones/TRABAJOS_INCORPORACION/TI_FRANCO_URBANI.pdf [Consulta: 2019, enero 22].

URBANI, F. (2018). Una revisión de los terrenos geológicos del sistema montañoso del Caribe, norte de Venezuela. Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas. Disponible: https://www.researchgate.net/profile/Franco_Urbani/publication/326834892_UNA_REVISION_DE_LOS_TERRANOS_GEOLOGICOS_DEL_SISTEMA_MONTANOSO_DEL_CARIBE_NORTE_DE_VENEZUELA_-_A_REVIEW_OF_GEOLOGICAL_TERRANES_OF_THE_CARIBBEAN_MOUNTAIN_SYSTEM_NORTHERN_VENEZUELA/links/5b6787db92851ca497cd0f36/UNA-REVISION-DE-LOS-TERRANOS-GEOLOGICOS-DEL-SISTEMA-MONTANOSO-DEL-CARIBE-NORTE-DE-VENEZUELA-A-REVIEW-OF-GEOLOGICAL-TERRANES-OF-THE-CARIBBEAN-MOUNTAIN-SYSTEM-NORTHERN-VENEZUELA.pdf [Consulta: 2019, enero 22].

VAN ZANTEN, J.O. (2004). Diseño de manejo de aguas de mina, en el pit baqueta de la mina Paso Diablo, edo. Zulia. Trabajo de Grado, Universidad de Venezuela, Caracas.

VIVAS, W.V. (2005). Propuesta de un modelo estratégico de gestión ambiental para las empresas productoras de ferroníquel. Trabajo de Maestría, Universidad Simón Bolívar, Caracas.

YAPUR, S. M. (2010). Determinación de la Erosión Hídrica Potencial de los Suelos de la Cuenca Inferior del Río Bermejo, Salta- Jujuy. Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Salta. Disponible: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-mp-inta-_erosionh_cirb_salta_jujuy.pdf [Consulta: 2019, marzo 15].

YOUNG, J.E (1992). Mining the Earth.: Brown, L.R., et al. (Eds.), State of the World – 1992, (citado por Johnson and Lewis, 1995).

ANEXO I

HISTORICO DE PRECIPITACIÓN (1999-2017) DE LAS ESTACIONES CERCANAS A LA ZONA DE ESTUDIO

Tabla I. 1. Datos de precipitación registrados en la estación Tiara.

MES	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Precipitación Mensual
Ene	0	0,2	0	10,2	0	0	4,4	0	1,6	2
Feb	0	0,2	0	0,0	0,4	0	0	0	0,2	0
Mar	0	0,4	17,8	20,8	2,2	0	0	0	0	5
Abr	135,8	187,2	111,2	41,8	91,2	0	15,6	0	7,6	66
May	88,8	104	0	30	63,2	0	61,2	0	49,6	44
Jun	94,4	55,8	0	71	69,2	0	106	0	117,4	57
Jul	102	95	51,4	124,6	65,8	63,4	77,8	70	69,6	80
Ago	210,6	145,6	62	244,8	109,8	101	178,8	158,2	132,6	149
Sep	203	192,8	0	172	97	99,2	177,6	177	28,2	127
Oct	169,2	121,8	125,6	216,2	65,6	180,2	0	156	92,6	125
Nov	102,0	102,0	72,2	102,0	105,4	103,4	96,2	102,4	34,8	91
Dic	13	12,6	0,4	0,8	1,8	11,6	12,6	14,8	16,2	9

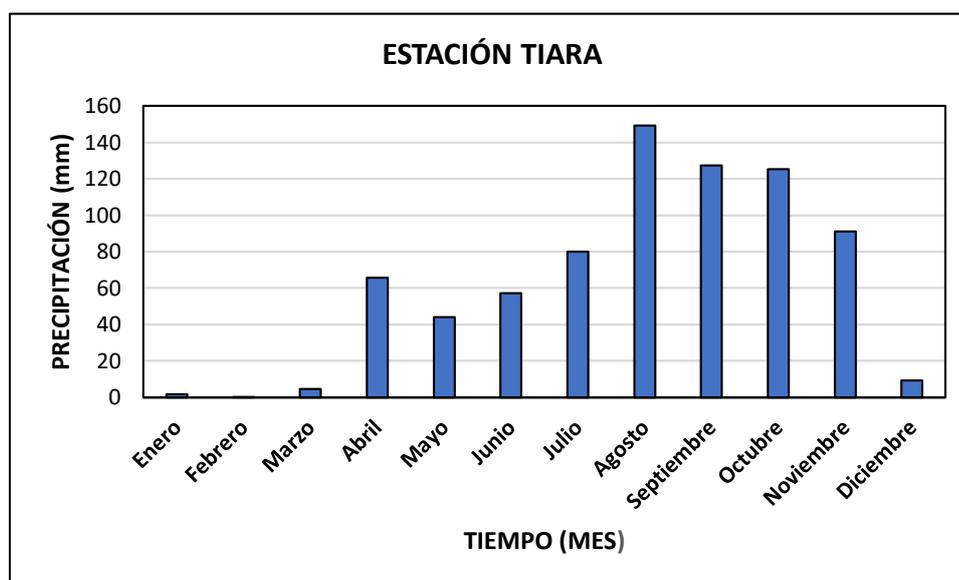


Figura I. 1. Histograma de precipitación de la estación Tiara.

Tabla I. 2. Datos de precipitación registrados en la estación Loma de Níquel.

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prec Mensual
1999	89,0	24	0	63,0	20,0	151	485,0	446,0	358,0	404,0	274,0	246,0	213,3
2000	47	15	41	75	85	306	138,0	252,0	313,0	254,0	249,0	79,0	154,5
2001	62,0	19	9	66	102,0	359	190,0	354,3	116,0	258,0	53,0	115,0	141,9
2002	62	19	9	66	310	311	214,0	268,0	316,0	162,0	155,0	74,0	163,8
2003	0,0	32	0	63,0	165,0	276	323,0	288,0	175,0	217,0	95,0	80,0	142,8
2004	43	22	4	134	295	312	175,0	256,0	147,0	219,0	126,0	80,2	151,1
2005	39,0	36	0	128,0	310,0	378	269,0	312,0	122,0	151,0	162,0	97,0	167,0
2006	112	17	10	27	97	237	282,0	272,0	145,0	160,0	125,0	32,0	126,3
2007	44,0	0	70	13,0	78,0	143	120,0	247,0	199,0	148,5	55,5	108,6	102,2
2008	45	26	0	102	84	189	255,0	116,0	104,0	275,4	88,3	57,3	111,8
2009	48,4	38	9	14,0	110,0	66	145,5	343,7	69,4	22,0	16,9	48,2	77,6
2010	24	0	22	253	255	254	120,0	246,0	180,0	209,0	249,0	44,1	154,7
2011	34,5	19	5	153,9	211,7	154	328,2	110,6	189,5	98,1	78,2	116,0	124,9
2012	38	29	25	76	140	159	176,0	182,9	197,0	194,0	108,8	94,5	118,4
2013	37,3	0	5	88,6	132,3	177	215,0	153,3	148,5	107,9	141,8	70,7	106,5
2014	41,84	15,22	0	93,68	108,42	189,45	105,89	222,94	116,04	334,57	98,11	152,44	123,2
2015	42,96	28	0	68	86,42	93,71	111,98	77,81	129,25	73,41	0	0	59,3
2016	43	36	10	0	84	205	210,26	352,12	214,77	341,92	350,98	255,45	175,3

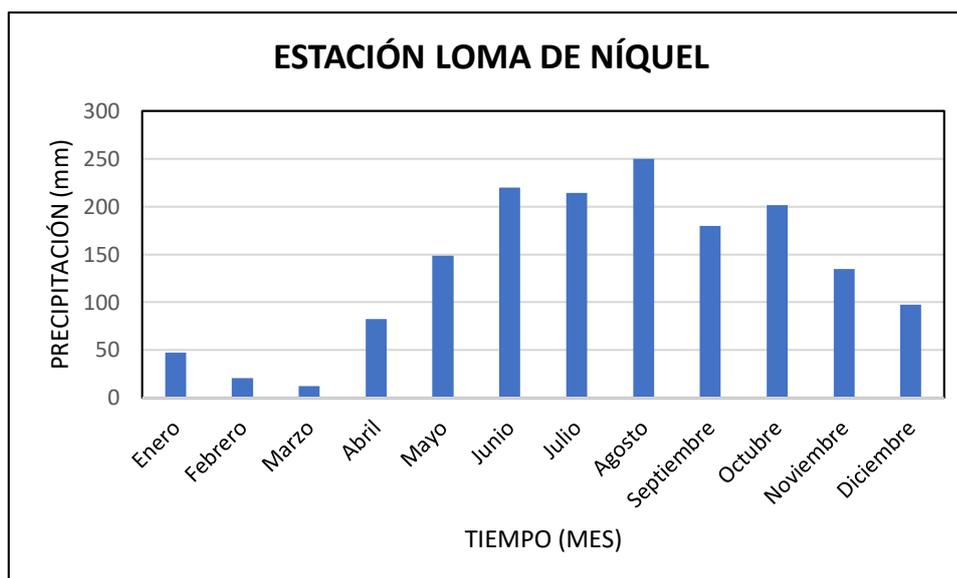


Figura I. 2. Histograma de precipitación de la estación Loma de Níquel.

Tabla I. 3. Datos de precipitación registrados en la estación La Urbina-Quebrada Seca.

MES	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Precipitación Mensual
Ene	3,6	0	0	0,2	3,8	2,2	0	0	1,2
Feb	0,6	0,2	0	0	11	0	0	0	1,5
Mar	0	19,6	0	0	34,2	0	0	0	6,7
Abr	3,6	84,6	0	232,6	132,2	3,4	34,4	0	61,4
May	13,2	141,2	0	163	113,4	5	0	0	54,5
Jun	0	46,4	135,4	136,2	56,8	173,6	0	112	82,6
Jul	67,8	106,4	274,8	128,6	241,2	0	154,2	146,6	140,0
Ago	0	0	169,6	0	0	211	0	150,4	66,4
Sept	171	116,2	138,6	0	0	119,6	0	69,2	76,8
Oct	0	90,6	143,2	0	227,6	165,6	0	107,8	91,9
Nov	81,8	121	93	87,4	169,2	46,2	0	116,2	89,4
Dic	36,6	4,4	40,8	49,2	55,2	6,4	6,4	60,2	32,4

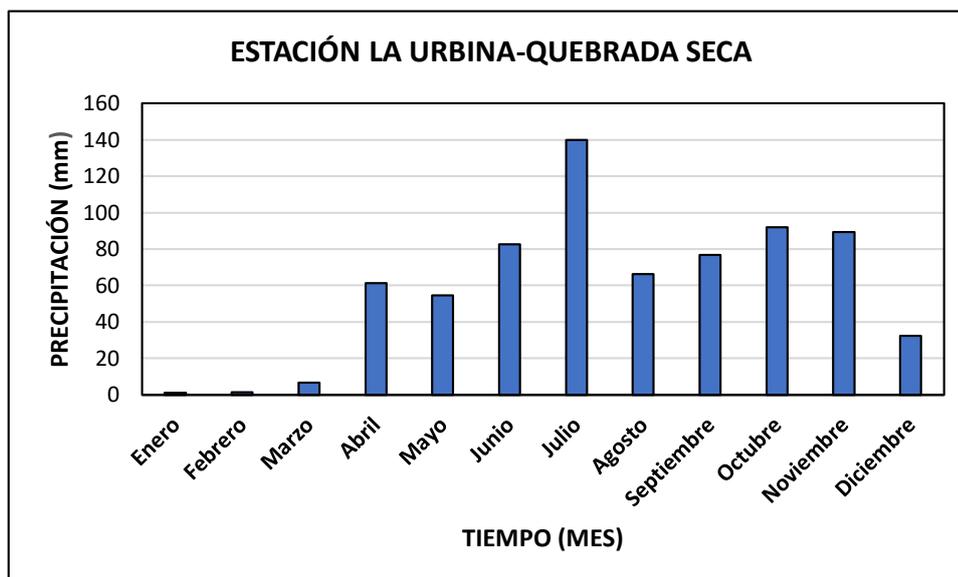


Figura I. 3. Histograma de precipitación de la estación La Urbina-Quebrada Seca.

Tabla I. 4. Datos de precipitación registrados en la estación San Francisco de Pao.

MES	2010	2011	2013	2014	2018	2019	Precipitación Mensual
Ene	0	0,2	2,8	0	0	3,6	1
Feb	0	0,2	0,6	0	0	0	0
Mar	0	0,2	11,6	0	0	0	2
Abr	6,4	37,8	291,4	0	0	0	56
May	77,8	42,8	111	0	0	0	39
Jun	73,8	54,8	73,8	81,4	107,4	46,6	73
Jul	0	60,4	102	89,8	139	95,9	81
Ago	237,8	95,4	107	145,4	299,2	0	147
Sept	122	97,2	123,5	125	156,4	124	125
Oct	100	125,2	145,8	88,4	123,4	0	97
Nov	62,8	47,6	55,2	107,6	45,4	0	53
Dic	7,6	7,8	87,4	93,4	0	0	33

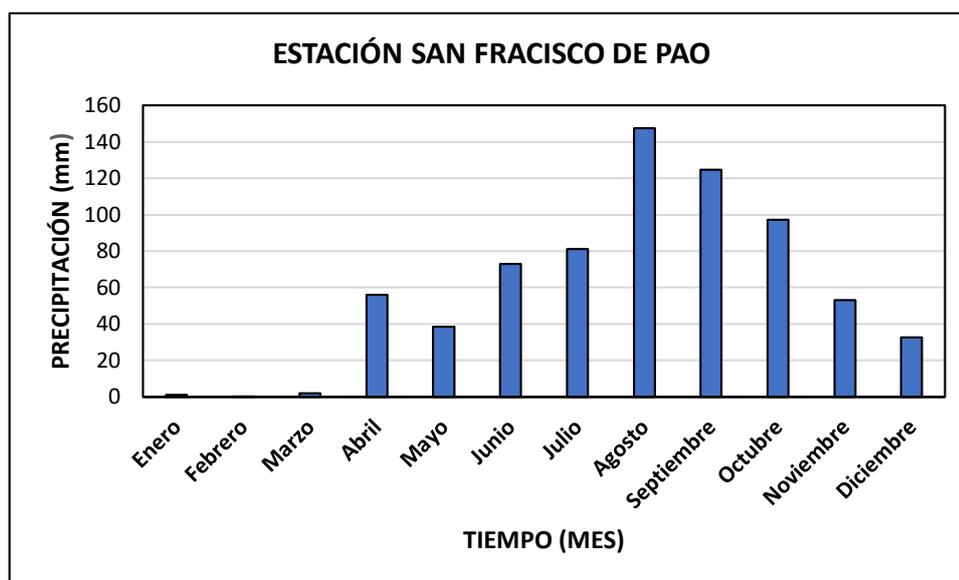


Figura I. 4. Histograma de precipitación de la estación San Francisco de Pao.

Tabla I. 5. Datos de precipitación registrados en la estación San Sebastián de los Reyes.

MES	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Precipitación Mensual
Ene	10,8	4,8	0,2	0,8	0	1	0,6	0	6,6	2,8
Feb	11	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2
Mar	1,8	0	0	58,2	0	44,6	0	0	0,8	11,7
Abr	10,6	1,6	11,6	0	0	47,6	181,8	223,8	135,2	68,0
May	91,2	11,2	8,4	34,4	0	53,8	85,4	99,8	97,4	53,5
Jun	81	151,6	70,4	117,4	198,8	79,6	105,8	120,0	135,4	117,8
Jul	0	0	0	102	238,4	106,6	83,8	205	131,2	96,3
Ago	0	208,4	0	0	129,2	169,8	78	173,4	140	99,9
Sep	0	147,2	43	0	145,2	148,4	288	195,2	188,8	128,4
Oct	0	220,6	0	0	2,4	69	147,2	207,4	126,6	85,9
Nov	158,8	22,8	74,4	0	2,6	18,4	356	161	34,6	92,1
Dic	18,4	18,8	19,6	2,4	2,6	2,6	25,6	29,6	30,8	16,7

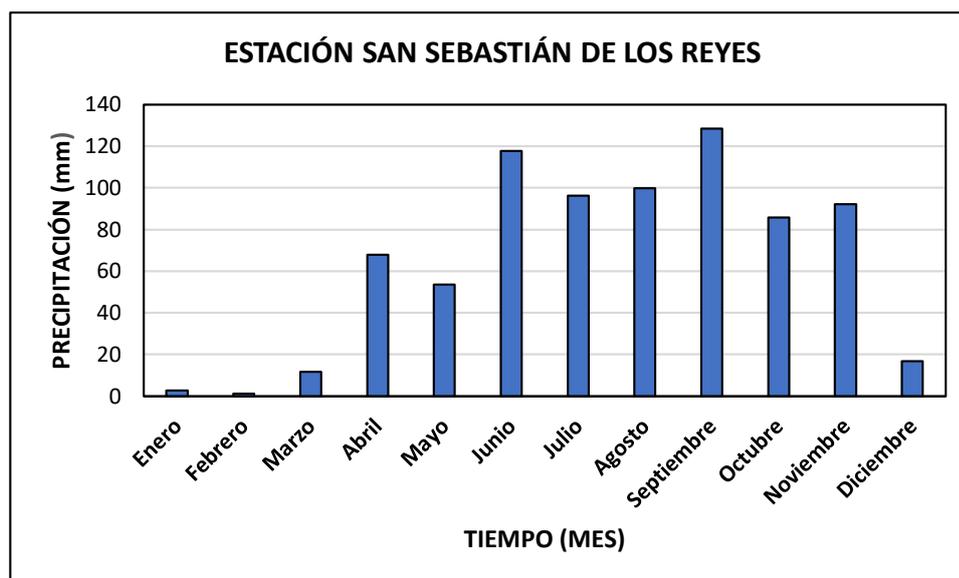


Figura I. 5. Histograma de precipitación de la estación San Sebastián de los Reyes.

Tabla I. 6. Datos de precipitación registrados en la estación El Cortijo.

MES	2014	2015	2018	Precipitación Mensual
Ene	0	6,6	0	2
Feb	0	1,4	0	0
Mar	0	21,4	3	8
Abr	0	0	0	0
May	0	16	0	5
Jun	98,8	1,4	0	33
Jul	141,6	0,4	174,8	106
Ago	182,6	0	148,6	110
Sep	105,8	0	0	35
Oct	147,2	0	0	49
Nov	41,4	0	0	14
Dic	0	0	0	0

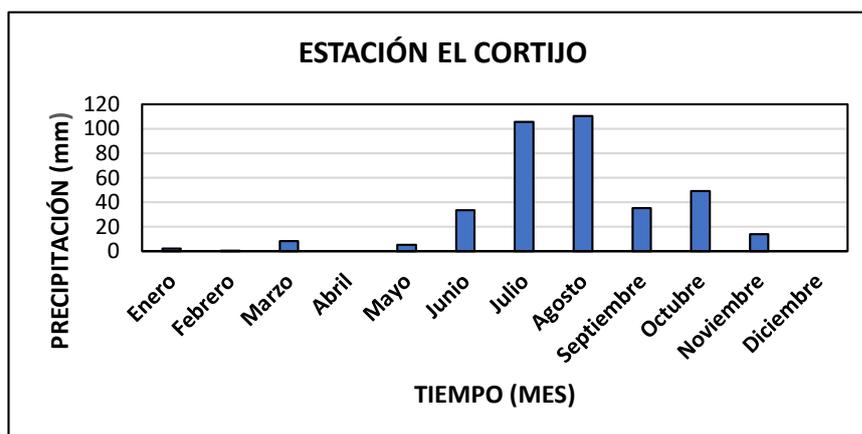


Figura I. 6. Histograma de precipitación de la estación El Cortijo.

Tabla I. 7. Datos de precipitación registrados en la estación San Diego de los Altos.

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1999	11,32	16,53	6,92	136,29	60,54	115,14	156,31	331,56	191,09	178,12	124,69	112,96
2000	35,03	14,31	30,36	11,92	64,17	87,98	133,47	139,98	179,46	139,82	115,09	12,88
2001	0,58	22,77	2,52	12,81	69,95	205,54	179,7	285,65	104,28	172,15	84,88	94,17
2002	10,77	0,66	12,48	61,75	100,39	207,84	104	314,93	282,44	120,95	50,81	5,69
2003	0,55	0,51	0,2	110,21	86,12	163,78	224,7	125,62	70,44	163,65	110,8	19,49
2004	8,7	1,98	1,44	23,14	131,24	51,24	132,47	118,17	164,57	94,61	125,92	40,23
2005	69,17	84,34	0,02	56,97	171,28	136,42	209,55	117,64	65,49	54,38	97,98	42,85
2006	54,77	50,65	2,83	90,58	217,2	96,89	165,8	179,9	23,87	55,07	34,63	5,27
2007	9,15	4,6	15,8	5,4	44,74	75	34,69	151,01	97,22	157,66	24,22	49,17
2008	16,96	12,87	1,6	58,67	65,07	78,32	149,8	112,29	73,89	181,68	81	37,61
2009	13,09	29,94	9,6	3,95	43,14	65,82	81,69	94,91	74,76	43,47	46,76	21,71
2010	1,66	0,36	6,23	104,14	136,31	133,99	97,87	155	122,39	77,07	119,29	66,94
2011	7,62	50,05	21,43	114,13	124,07	112,89	157,7	85,97	112,6	77,05	108,94	123,31
2012	28,98	4,58	20,54	47,49	102,68	96,47	86,59	229,53	131,26	107,71	23,37	39,74
2013	10,23	0,42	14,93	55,73	68,27	62,49	62,18	91,25	87,22	87,89	73,57	32,06
2014	5,11	5,76	0,01	5,28	8,62	88,43	68,99	114,13	59,4	72,36	26,86	12,31
2015	23,34	8,12	6,56	26,47	34,49	39,36	113,3	127,78	82,34	80,05	30,95	28,68
2016	3,46	0,11	1,72	38,39	24,31	39,66	61,7	16,42	55,91	39,24	223,43	224,87

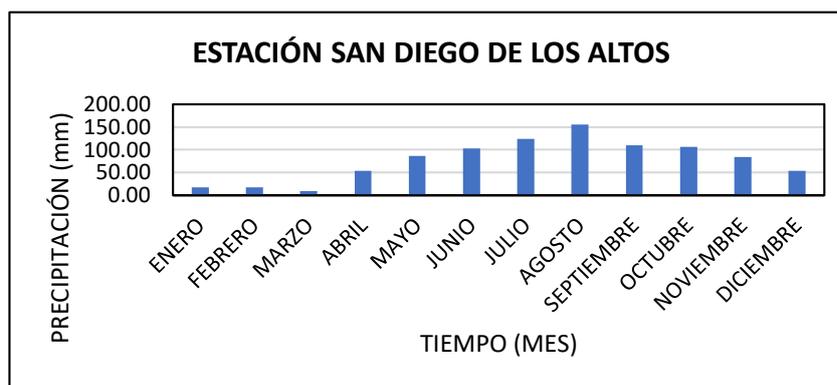


Figura I. 7. Histograma de precipitación de la estación San Diego de los Altos.

Tabla I. 8. Datos de precipitación registrados del programa Larc-Power, satélite NASA.

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	PREC MEN-SUAL
1999	12,16	18,74	9,95	156,2	73,36	113,64	152,25	291,51	201,26	160,94	126,93	108,23	118,7641667
2000	44,92	19,94	41,11	16,19	66,02	85,89	137,66	144,32	196,76	146,5	120,77	13,49	86,13083333
2001	1,2	21,83	3,17	16,31	62,82	191,68	162,42	245,25	92,09	147,97	72,26	82,04	91,58666667
2002	10,95	0,8	14,16	68,4	104,57	197,16	109,46	292,05	242,43	118,68	52,66	5,61	101,4108333
2003	1,55	0,86	0,53	110,12	95,35	169,54	214,45	130,83	74,2	172,59	110,29	16,71	91,41833333
2004	7,18	1,75	2,02	30,93	132,56	49,34	134,88	124,85	158,2	89,09	112,11	35,93	73,23666667
2005	73,66	65,41	0,04	59,5	173,02	137,83	229,51	122,54	66,56	56,54	105,1	40,55	94,18833333
2006	47,55	38,57	2,45	82,37	221,55	98,65	159,03	192,45	23,96	57,4	32,16	6,4	80,21166667
2007	10,32	4,14	16,05	7,34	46,05	71,23	33,15	135,51	104,61	161,97	21,48	47,17	54,91833333
2008	14,18	9,85	1,34	65,61	66,86	69,08	152,54	108,67	80,04	177,34	85,52	32,26	71,94083333
2009	13,42	26,75	8,22	5,21	41,09	68,71	82,31	91,85	90,75	43,65	50,76	14,31	44,7525
2010	1,2	0,29	5,81	115,97	134,12	130,86	95,85	147,4	118,52	81,44	111,74	55,66	83,23833333
2011	6,47	40,64	18,31	115,18	125,93	117,67	179,32	83,54	124,82	75,13	112,38	110,91	92,525
2012	23,09	3,84	22,7	48,35	104,32	102,19	84,94	231,65	146,93	111,47	22,09	32,01	77,79833333
2013	10,04	0,22	14,94	54,39	76,54	66,29	60,53	95,53	89,92	101,39	74,23	29,21	56,1025
2014	4,56	4,7	0,01	6,25	8,73	82,37	65,46	113,77	64,62	78,33	28,8	13,78	39,28166667
2015	15,67	4,92	4,99	24,69	39,73	38,89	105,26	136,4	78,04	87	34,69	21,71	49,3325
2016	1,97	0,05	1,06	24,22	15,14	27,86	51,09	10,65	55,02	36,49	183,89	160,73	47,3475
2017	126,91	16,87	18,5	9,68	16,96	42,58	73,26	47,27	38,55	56,42	37,27	97,19	48,455

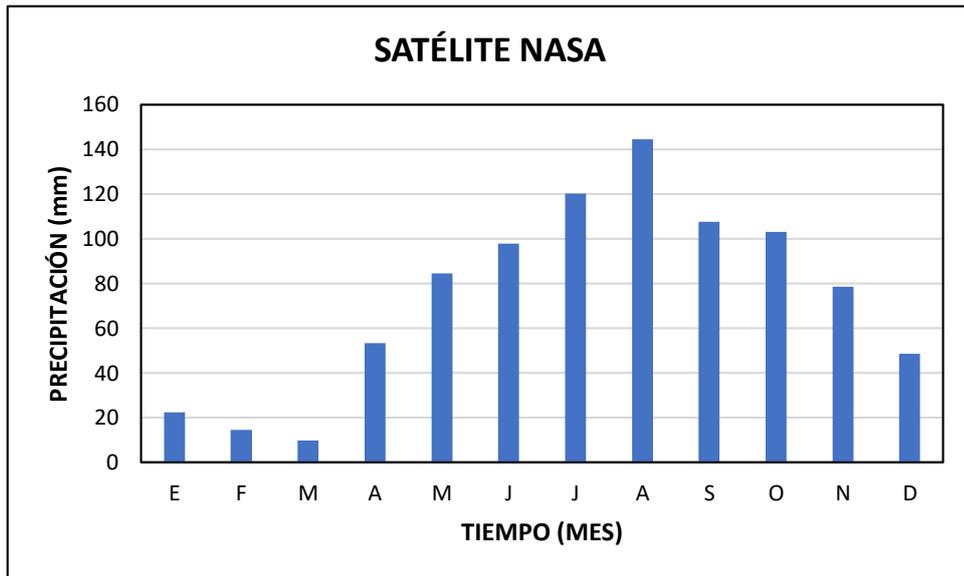


Figura I. 8. Histograma de precipitación del programa Larc-Power, satélite NASA.

ANEXO II

VALORES TOTALES MENSUALES POR AÑO DE PRECIPITACIÓN, Y VARIACIÓN TEMPORAL DE LOS DATOS TOTALES ANUALES DE PRECIPITACIÓN PARA EL PERÍODO (1999-2017)

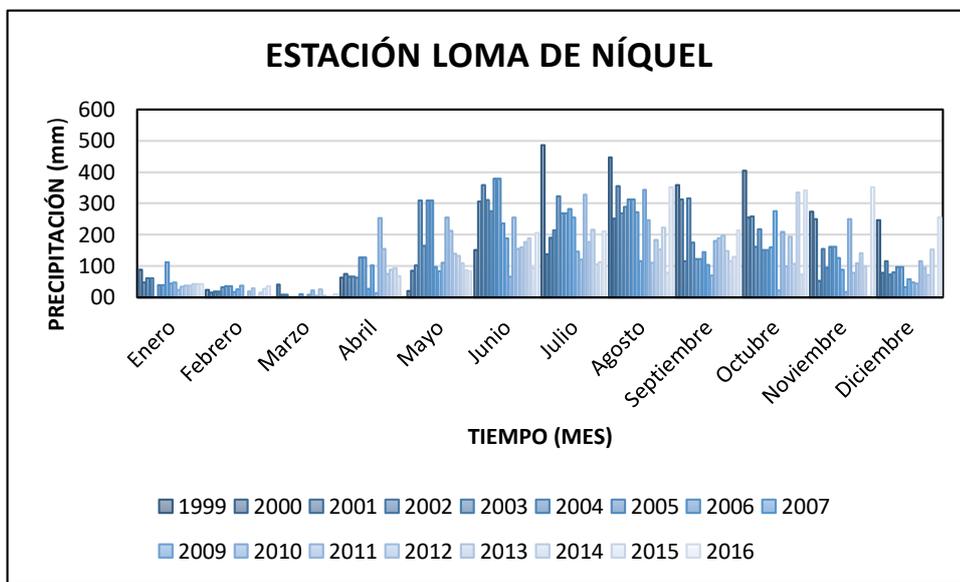


Figura II. 2. Gráfico valores totales mensuales por año de precipitación estación Loma de Níquel.

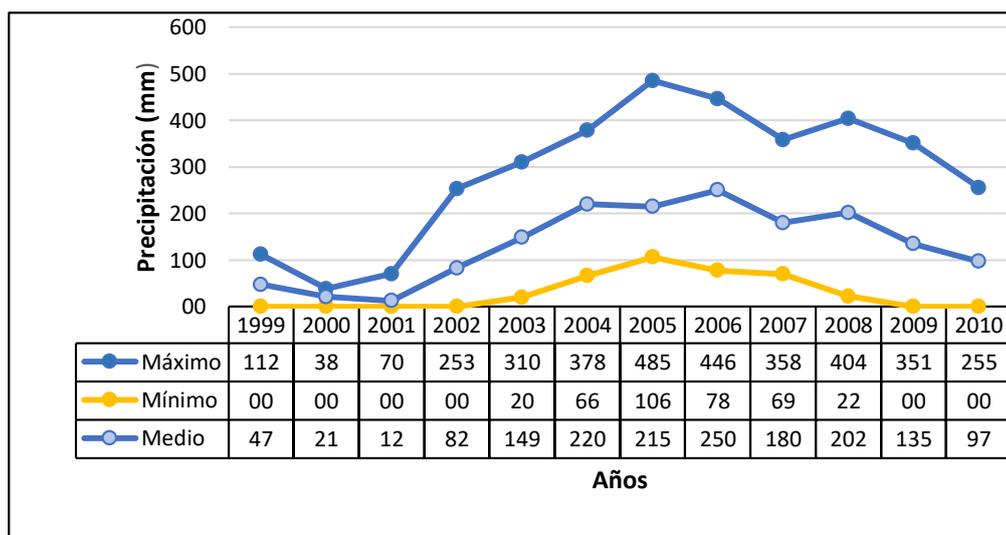


Figura II. 1. Gráfico variación temporal de los datos totales anuales de precipitación estación Loma de Níquel.

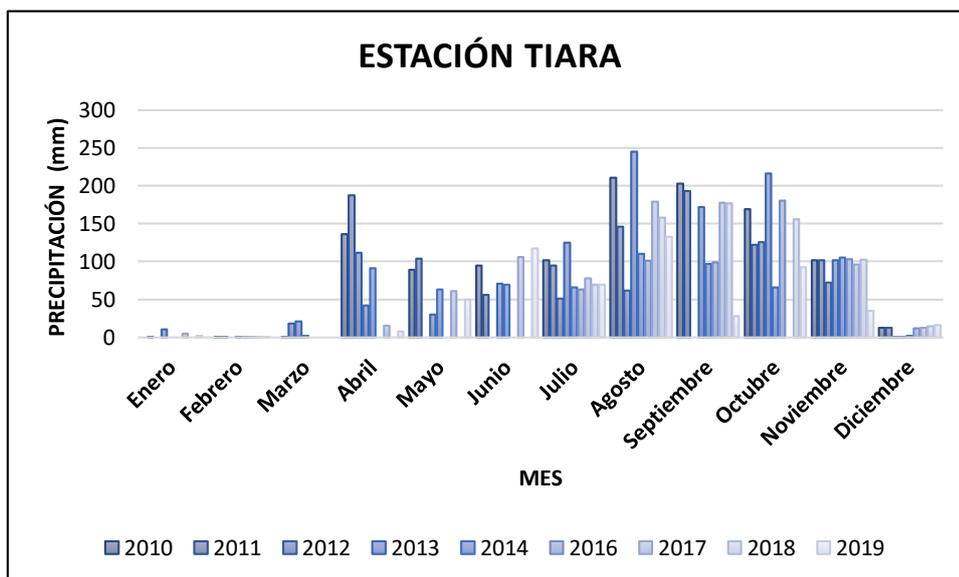


Figura II. 3. Gráfico valores totales mensuales por año de precipitación estación Tiara.

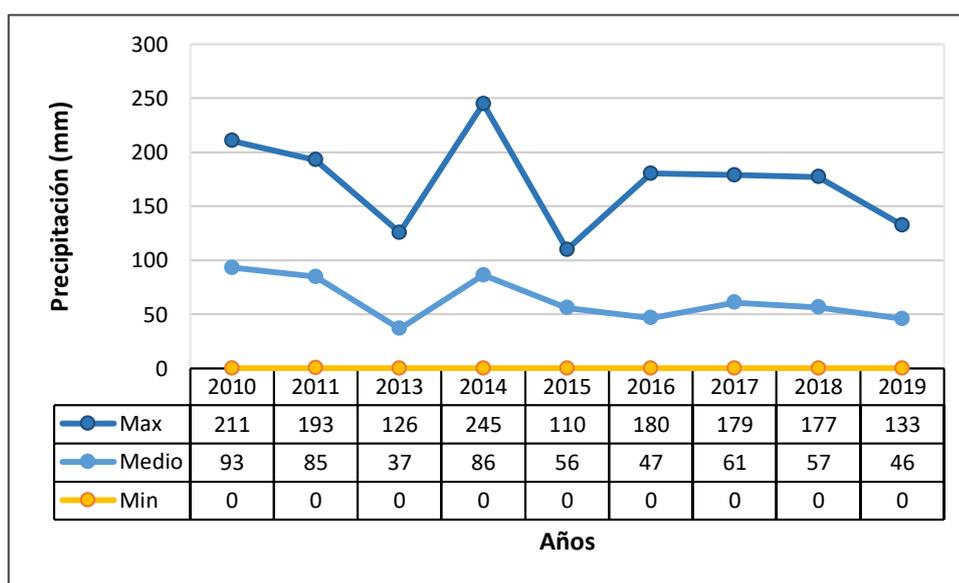


Figura II. 4. Gráfico variación temporal de los datos totales anuales de precipitación en la estación Tiara.

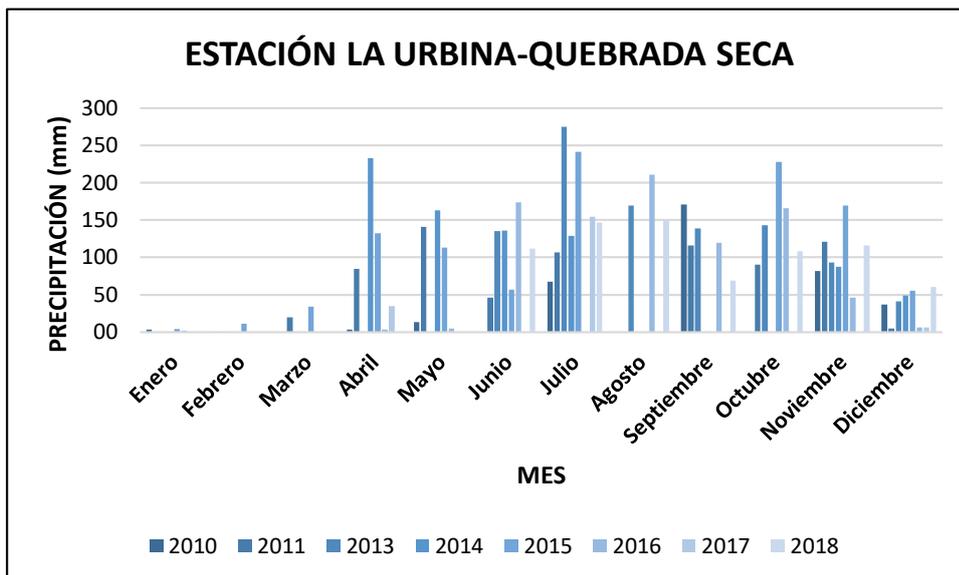


Figura II. 6. Gráfico valores totales mensuales por año de precipitación estación La Urbina-Quebrada Seca.

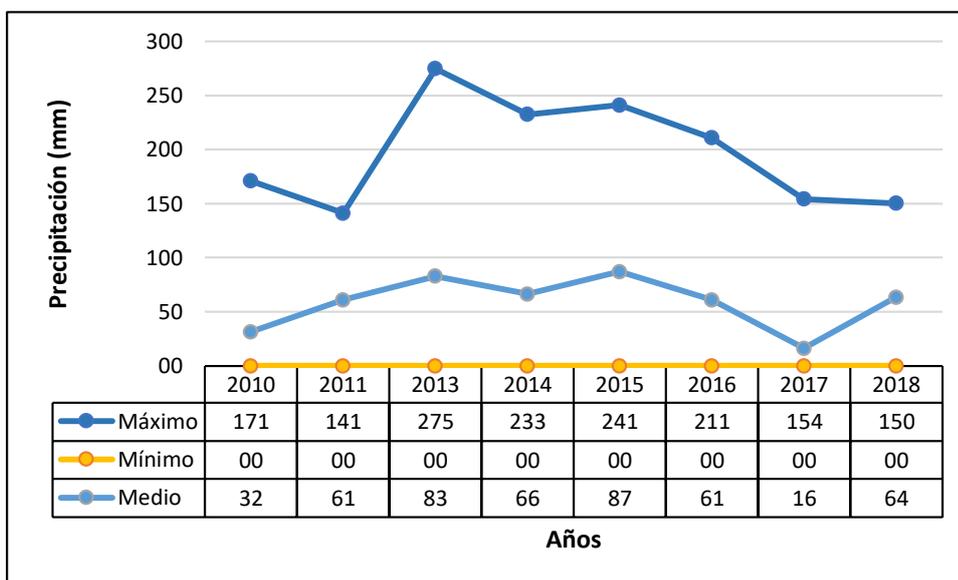


Figura II. 5. Gráfico variación temporal de los datos totales anuales de precipitación en la estación La Urbina-Quebrada Seca.

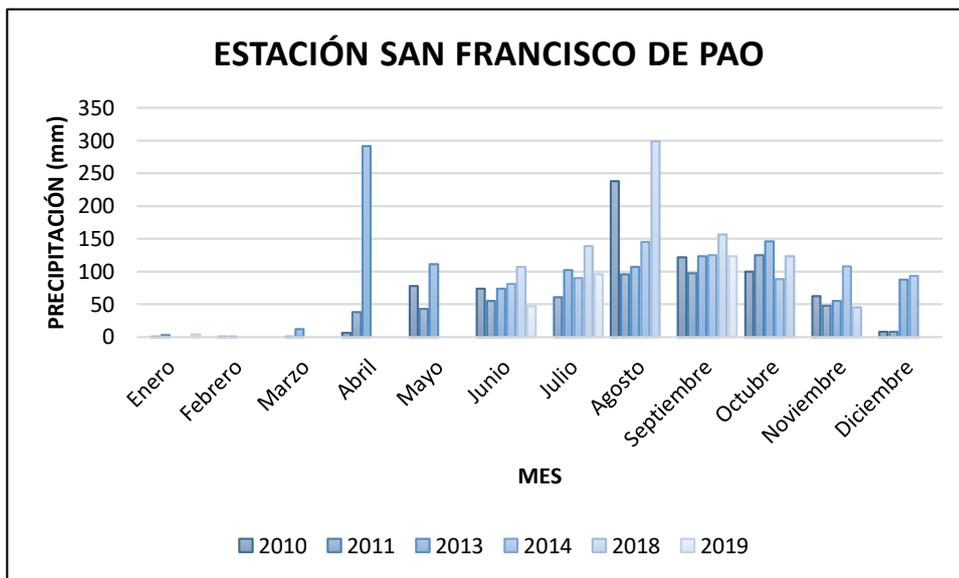


Figura II. 7. Gráfico valores totales mensuales por año de precipitación estación San Francisco de Pao.

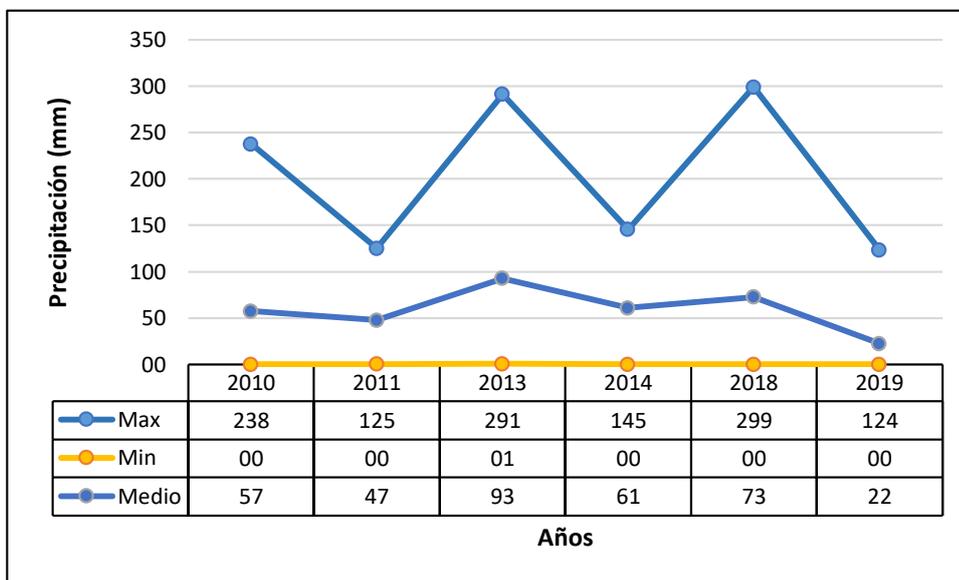


Figura II. 8. Gráfico variación temporal de los datos totales anuales de precipitación en la estación San Francisco de Pao.

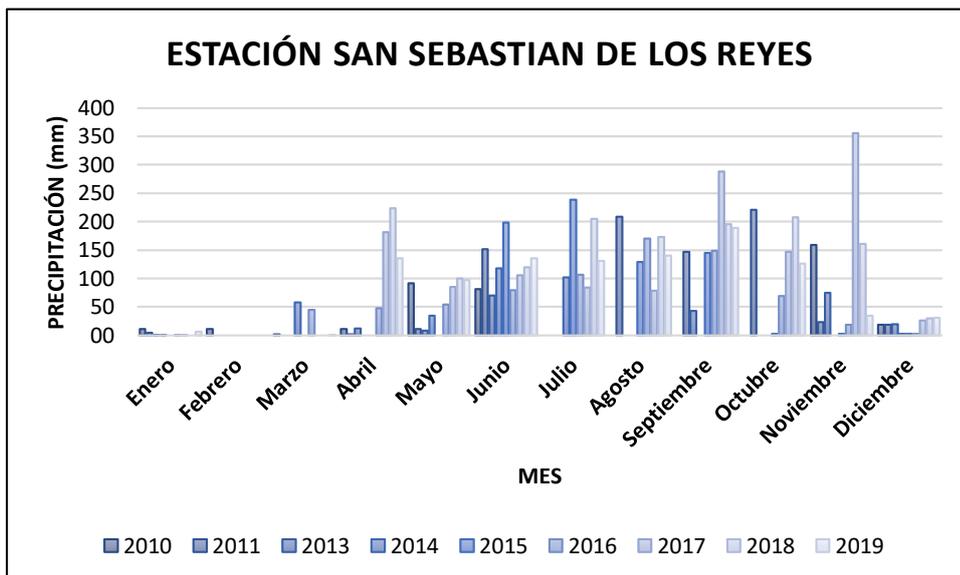


Figura II. 9. Gráfico valores totales mensuales por año de precipitación estación San Sebastián de los Reyes.

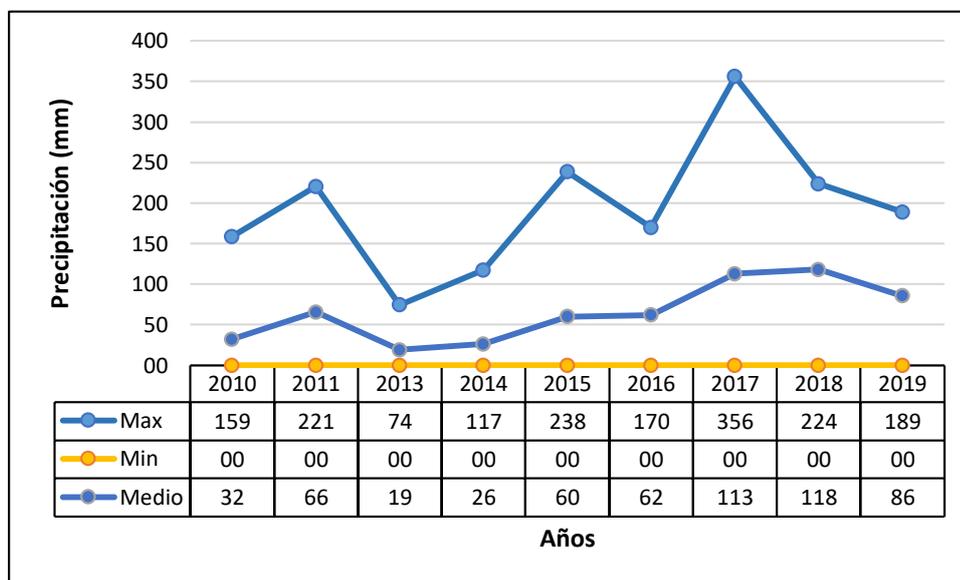


Figura II. 10. Gráfico variación temporal de los datos totales anuales de precipitación en la estación San Sebastián de los Reyes.

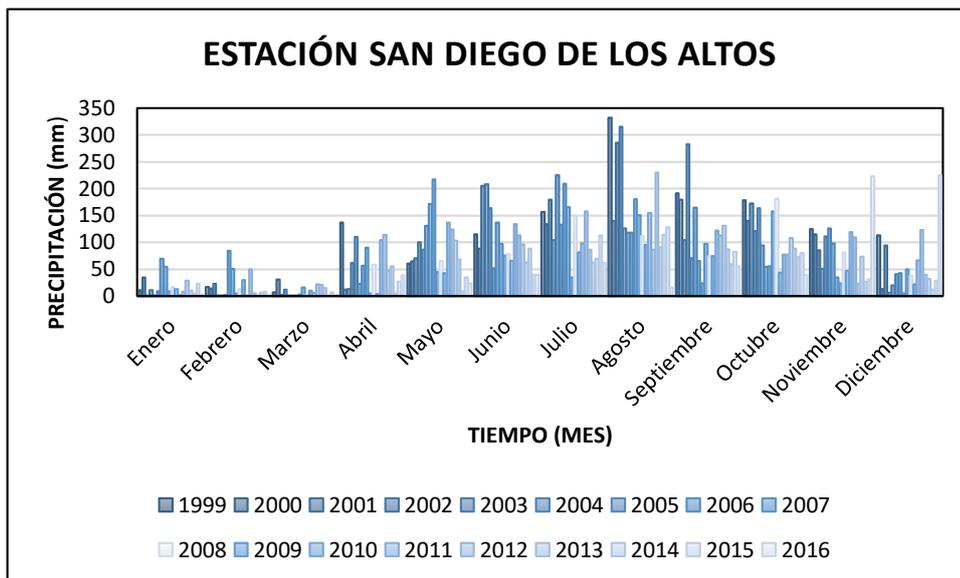


Figura II. 11. Gráfico valores totales mensuales por año de precipitación estación San Diego de los Altos.

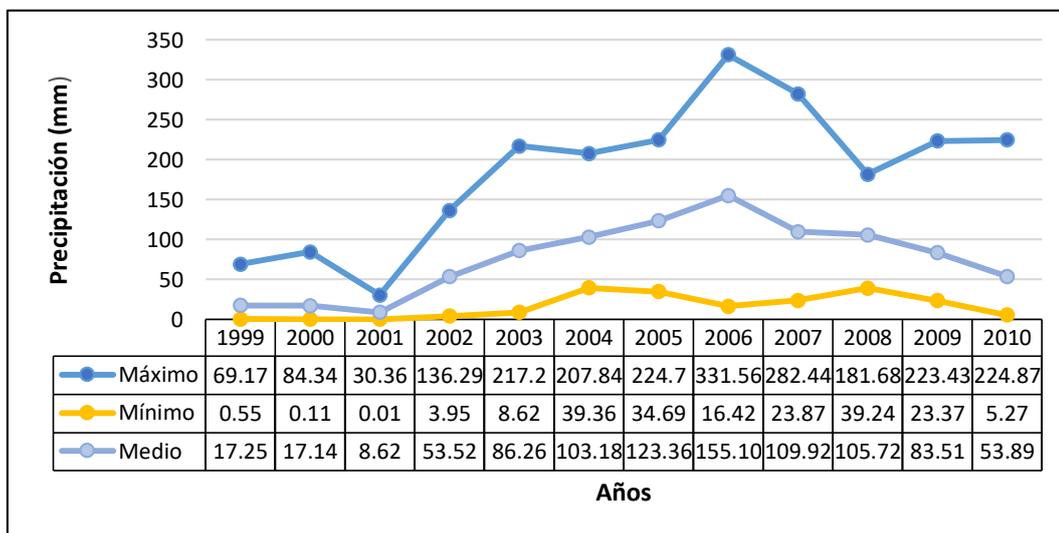


Figura II. 12. Gráfico variación temporal de los datos totales anuales de precipitación en la estación San Diego de los Altos.

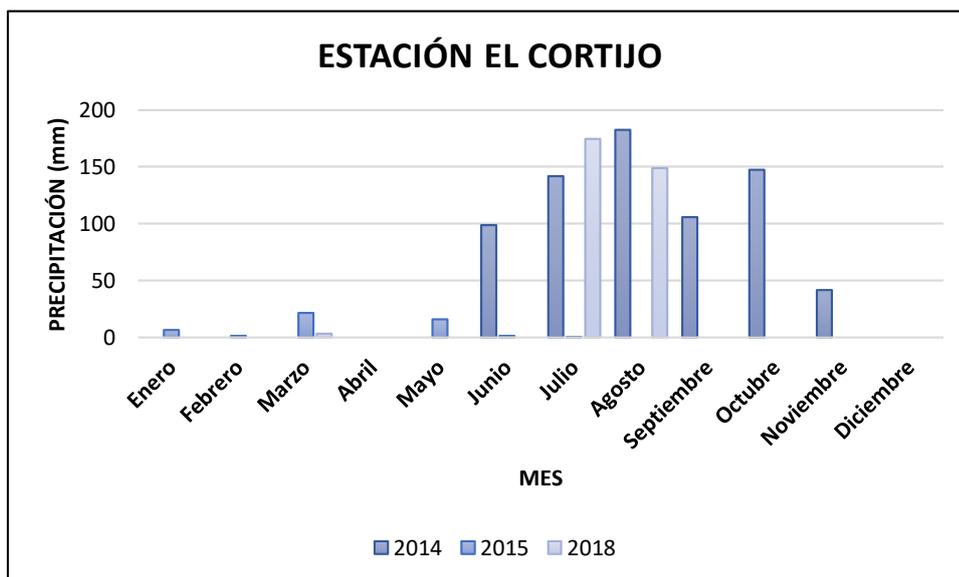


Figura II. 13. Gráfico valores totales mensuales por año de precipitación estación El Cortijo.

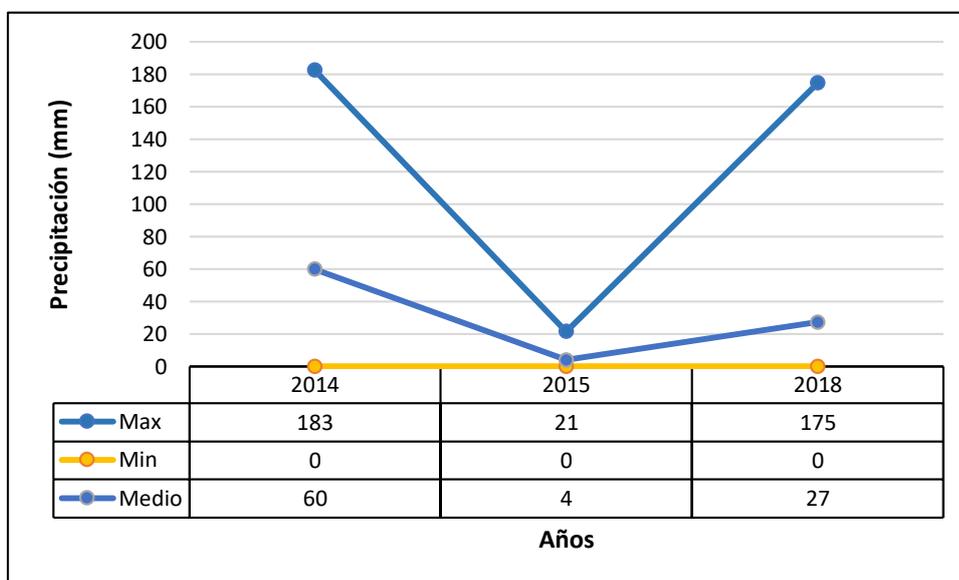


Figura II. 14. Gráfico variación temporal de los datos totales anuales de precipitación en la estación El Cortijo.

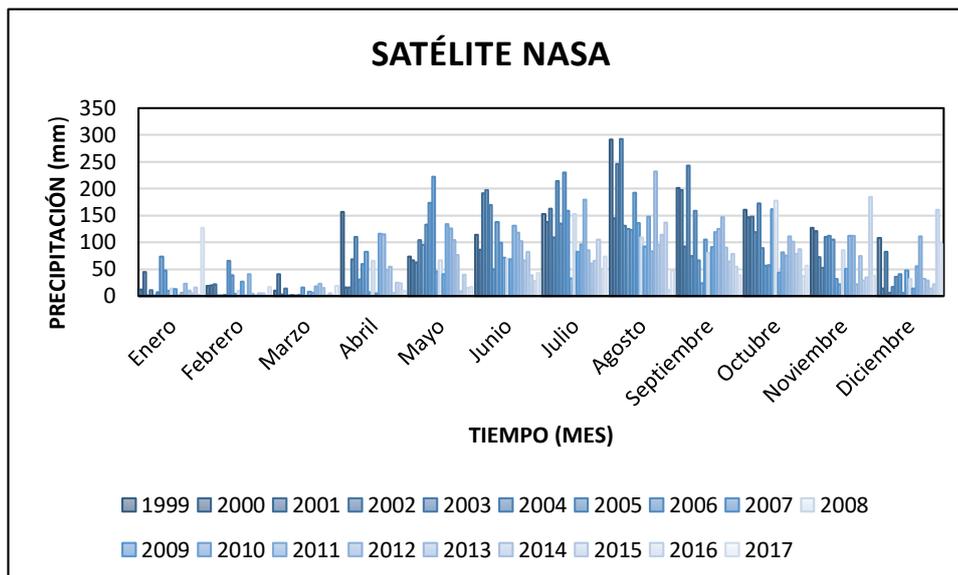


Figura II. 15. Gráfico valores totales mensuales por año de precipitación del programa Larc-Power, satélite NASA.

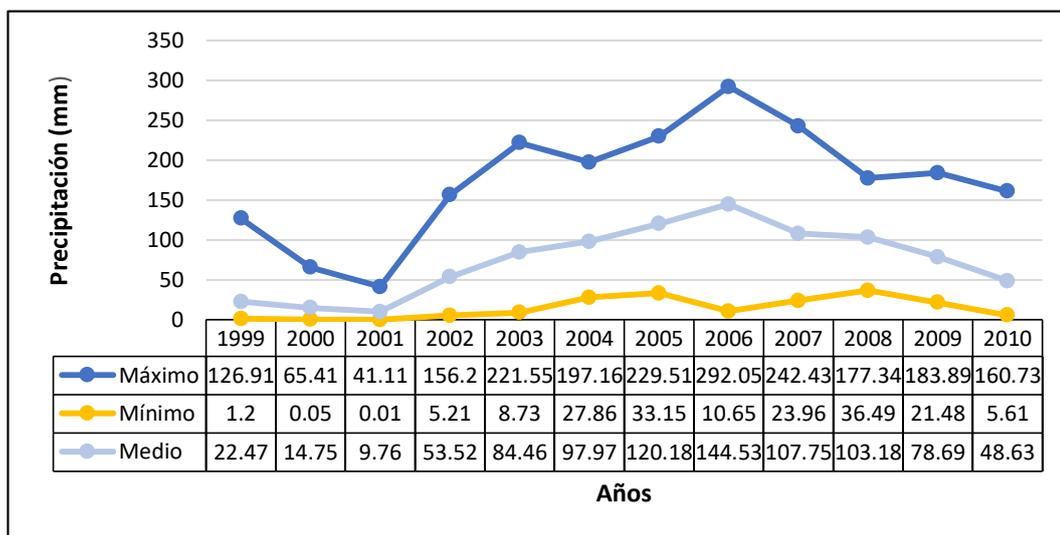


Figura II. 16. Gráfico variación temporal de los datos totales anuales de precipitación del programa Larc-Power, satélite NASA.

ANEXO III

DATOS CORRESPONDIENTES A LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y COEFICIENTE DE HUMEDAD PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES ESTUDIADAS. PERÍODO (1999-2019)

Tabla III. 1. Valores correspondientes a la evapotranspiración y coeficiente de humedad del programa Larc-Power, satélite NASA.

	Periodo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Pp. Media (cm)	1999-2017	22,5	14,7	9,8	53,5	84,5	98,0	120,2	144,5	107,8	103,2	78,7	48,6	885,9
Temp. Media (°C)	1999-2017	23,6	24,1	25,1	25,8	25,8	25,3	24,8	24,8	25,1	25,0	24,6	24,0	24,8
Índice Calórico		10,5	10,8	11,5	12,0	12,0	11,6	11,3	11,3	11,5	11,4	11,2	10,7	135,8
ETP Sin Corregir		9,4	10,0	11,4	12,4	12,5	11,6	10,9	11,0	11,3	11,2	10,7	9,8	132,2
F. Fotoperiodo		1,0	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	12,3
ETP (cm)		9,5	9,2	11,7	12,6	13,3	12,2	11,7	11,6	11,6	11,4	10,6	9,9	135,4
C. Humedad		1,4	0,6	-0,2	3,2	5,3	7,0	9,3	11,4	8,3	8,0	6,4	3,9	64,8

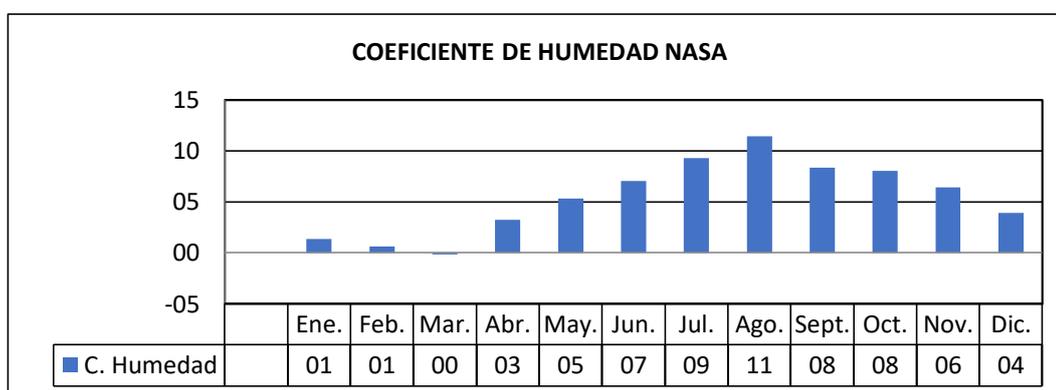


Figura III. 1. Gráfico valores medio mensuales del coeficiente de humedad. Programa Larc-Power, satélite NASA.

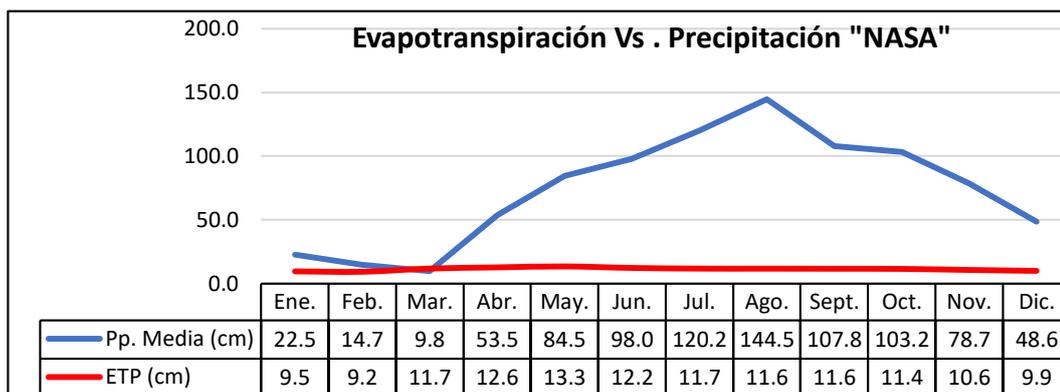


Figura III. 2. Gráfico de Evapotranspiración Vs Precipitación. del programa. Larc-Power, satélite NASA.

Tabla III. 2. Valores correspondientes a la evapotranspiración y coeficiente de humedad de la estación El Cortijo.

	Periodo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Pp. Media (cm)	2014-2018	0,2	0,0	0,8	0,0	0,5	3,3	10,6	11,0	3,5	4,9	1,4	0,0	36,2
Temp. Media (°C) (Calculado)	1999-2017	22,3	22,7	23,7	24,4	24,4	23,9	23,4	23,4	23,7	23,6	23,2	22,6	23,4
Índice Calórico		9,6	9,9	10,6	11,0	11,0	10,7	10,3	10,4	10,5	10,5	10,2	9,8	124,5
ETP Sin Corregir		8,3	8,8	9,9	10,7	10,8	10,1	9,5	9,6	9,9	9,8	9,4	8,6	115,3
F. Fotoperiodo		1,0	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	12,3
ETP (cm)		8,4	8,1	10,2	10,9	11,5	10,6	10,2	10,1	10,1	10,0	9,3	8,7	118,1
C. Humedad		-1,0	-1,0	-0,9	-1,0	-1,0	-0,7	0,0	0,1	-0,7	-0,5	-0,8	-1,0	-8,4

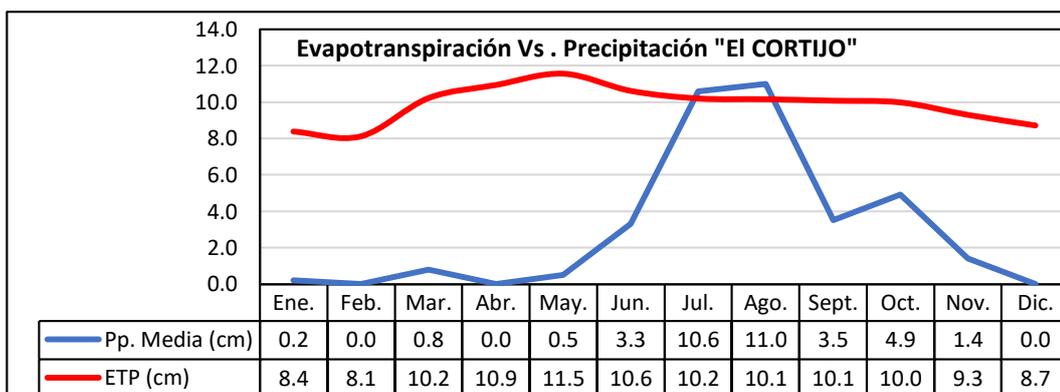


Figura III. 3. Gráfico de Evapotranspiración Vs Precipitación. Estación El Cortijo.

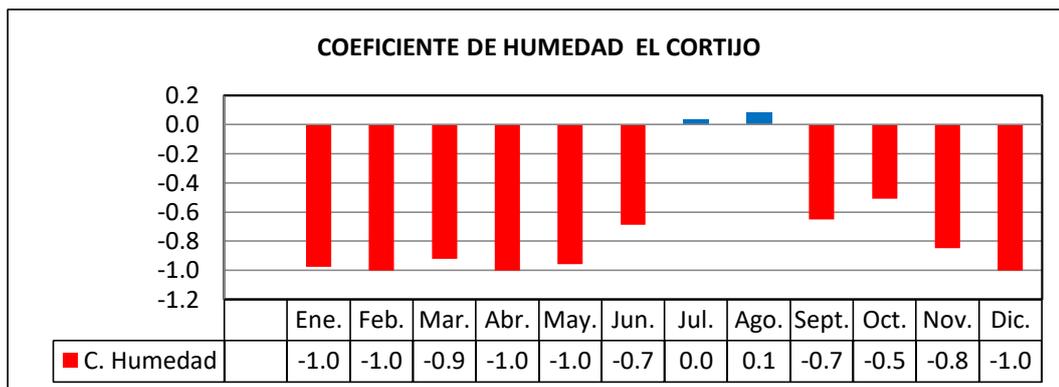


Figura III. 4. Gráfico valores medio mensuales del coeficiente de humedad. Estación El Cortijo.

Tabla III. 3. Valores correspondientes a la evapotranspiración y coeficiente de humedad de la estación San Sebastián de los Reyes.

	Periodo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Pp. Media (cm)		2,8	1,2	11,7	68,0	53,2	117,8	96,3	99,9	128,4	92,1	85,9	92,1	849,4
Temp. Media (°C)		23,0	23,5	24,4	25,1	25,2	24,6	24,1	24,2	24,4	24,3	24,0	23,3	24,2
Índice Calórico		10,1	10,4	11,1	11,5	11,6	11,2	10,8	10,9	11,0	11,0	10,7	10,3	130,5
ETP Sin Corregir		8,8	9,4	10,6	11,5	11,6	10,8	10,2	10,3	10,6	10,5	10,1	9,2	123,7
F. Fotoperiodo		1,0	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	12,3
ETP (cm)		8,9	8,7	11,0	11,8	12,4	11,4	10,9	10,9	10,8	10,7	9,9	9,3	126,7
C. Humedad		-0,7	-0,9	0,1	4,8	3,3	9,3	7,8	8,2	10,9	7,6	7,6	8,9	66,9

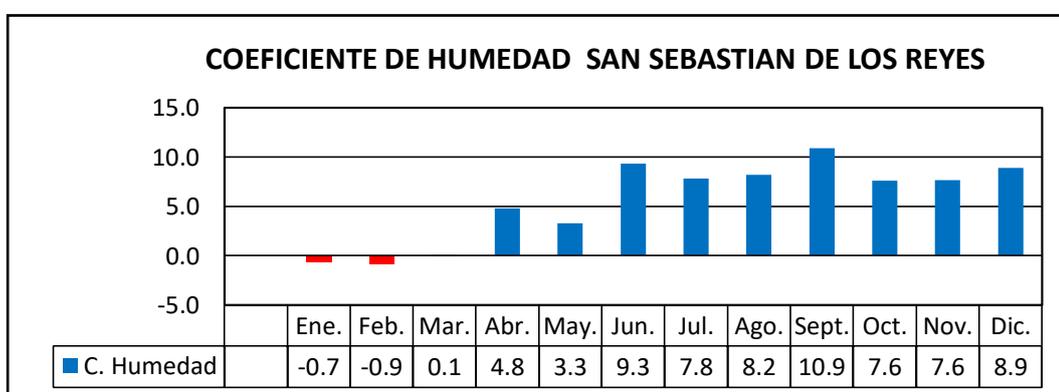


Figura III. 5. Gráfico valores medio mensuales del coeficiente de humedad. Estación San Sebastián de los Reyes.

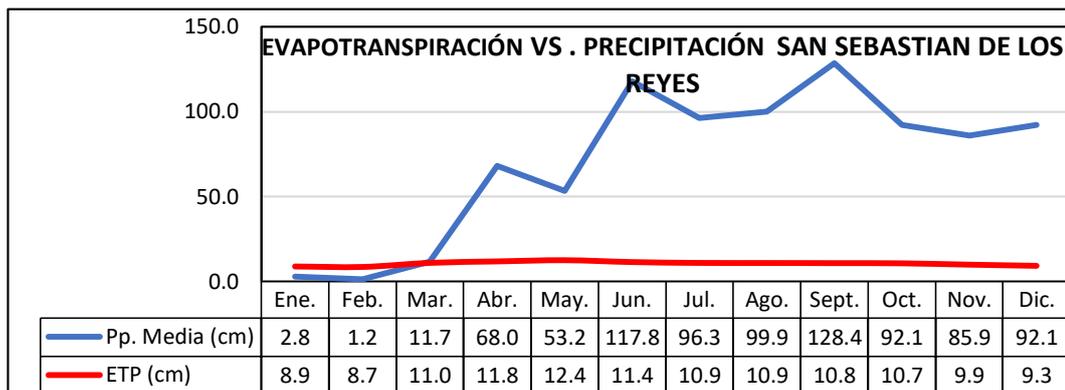


Figura III. 6. Gráfico de Evapotranspiración Vs Precipitación. Estación San Sebastián de los Reyes

Tabla III. 4. Valores correspondientes a la evapotranspiración y coeficiente de humedad de la estación San Francisco del Pao.

	Periodo	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Pp. Media (cm)		1,0	0,0	2,0	56,0	39,0	73,0	81,0	147,0	125,0	97,0	53,0	33,0	707,0
Temp. Media (°C)		22,8	23,3	24,3	24,9	25,0	24,4	23,9	24,0	24,2	24,2	23,8	23,1	24,0
Índice Calórico		10,0	10,3	10,9	11,4	11,4	11,0	10,7	10,7	10,9	10,9	10,6	10,2	129,0
ETP Sin Corregir		8,7	9,3	10,4	11,3	11,4	10,7	10,0	10,1	10,4	10,3	9,9	9,1	121,6
F. Fotoperiodo		1,0	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	12,3
ETP (cm)		8,8	8,5	10,8	11,5	12,2	11,2	10,7	10,7	10,6	10,5	9,8	9,1	124,5
C. Humedad		-0,9	-1,0	-0,8	3,9	2,2	5,5	6,5	12,8	10,8	8,2	4,4	2,6	54,2

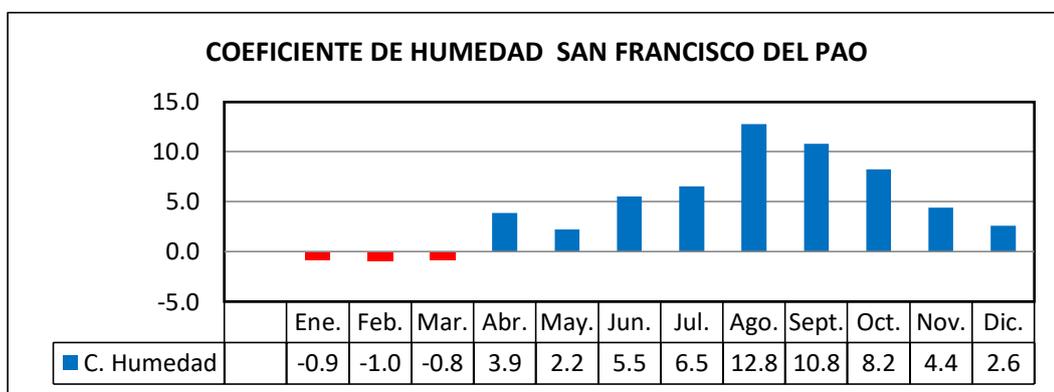


Figura III. 7. Gráfico valores medio mensuales del coeficiente de humedad. Estación San Francisco del Pao.

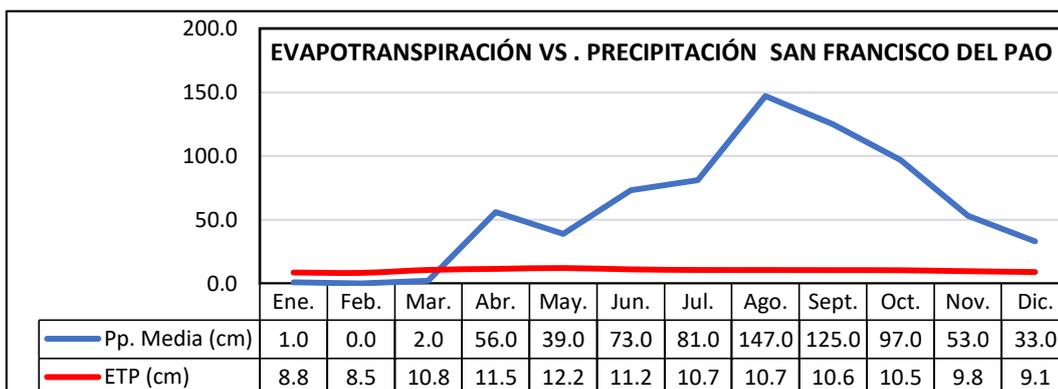


Figura III. 8. Gráfico de Evapotranspiración Vs Precipitación. Estación San Francisco del Pao.

Tabla III. 5. Valores correspondientes a la evapotranspiración y coeficiente de humedad de la estación La Urbina Qda Seca.

	Periodo	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Pp. Media (cm)		1,2	1,5	6,7	61,6	54,5	82,6	140,0	66,4	76,8	91,9	89,4	32,4	705,0
Temp. Media (°C)		21,7	22,2	23,2	23,8	23,9	23,3	22,8	22,9	23,1	23,0	22,7	22,0	22,9
Índice Calórico		9,2	9,5	10,2	10,6	10,7	10,3	10,0	10,0	10,2	10,1	9,9	9,4	120,1
ETP Sin Corregir		7,9	8,4	9,4	10,2	10,3	9,6	9,1	9,1	9,4	9,3	8,9	8,2	109,8
F. Fotoperiodo		1,0	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	12,3
ETP (cm)		8,0	7,7	9,7	10,4	11,0	10,1	9,7	9,7	9,6	9,5	8,8	8,3	112,5
C. Humedad		-0,8	-0,8	-0,3	4,9	4,0	7,2	13,4	5,9	7,0	8,7	9,1	2,9	61,1

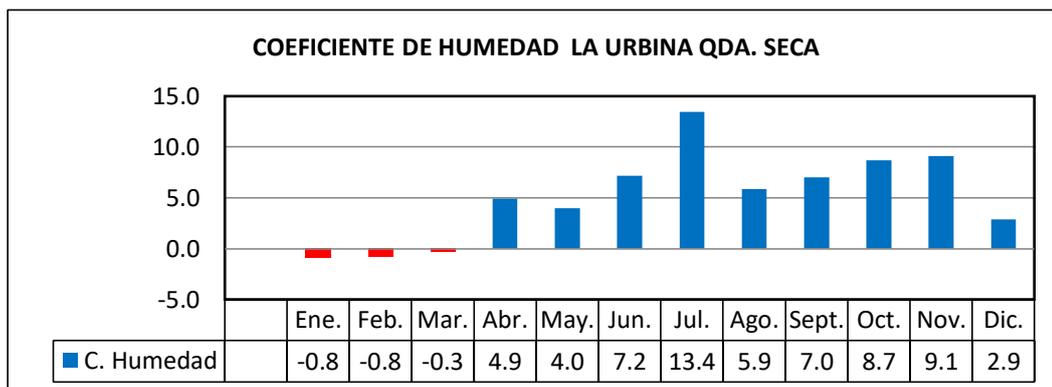


Figura III. 9. Gráfico valores medio mensuales del coeficiente de humedad. Estación La Urbina Qda Seca.

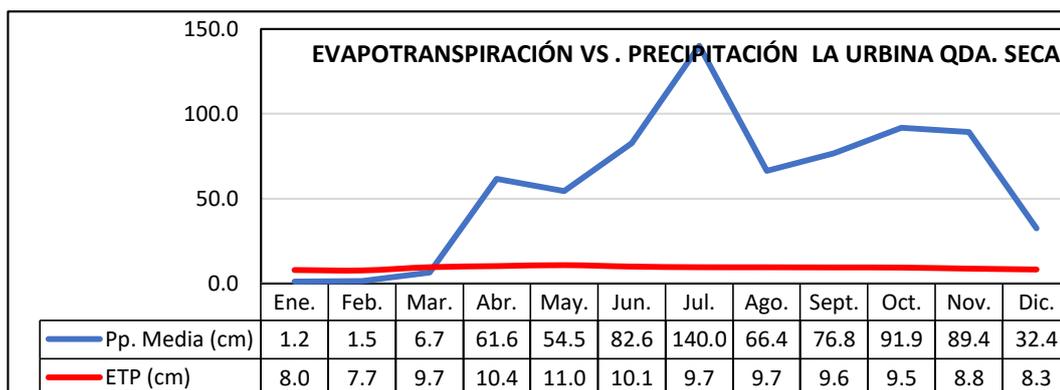


Figura III. 10. Gráfico de Evapotranspiración Vs Precipitación. Estación La Urbina Qda Seca.

Tabla III. 6. Valores correspondientes a la evapotranspiración y coeficiente de humedad de la estación San Diego de los Altos.

	Periodo	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Pp. Media (cm)		17,2	17,1	8,6	53,5	86,3	103,2	123,4	155,1	109,9	105,7	83,5	53,9	917,5
Temp. Media (°C)		23,5	23,9	24,8	25,5	25,6	25,0	24,5	24,6	24,9	24,8	24,5	23,9	24,6
Índice Calórico		10,4	10,7	11,3	11,8	11,8	11,5	11,1	11,2	11,4	11,3	11,1	10,7	134,3
ETP Sin Corregir		9,3	9,8	11,0	12,0	12,1	11,3	10,6	10,8	11,2	11,1	10,7	9,8	129,6
F. Fotoperíodo		1,0	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	12,3
ETP (cm)		9,4	9,0	11,4	12,2	12,9	11,9	11,4	11,4	11,4	11,3	10,5	9,9	132,7
C. Humedad		0,8	0,9	-0,2	3,4	5,7	7,7	9,8	12,6	8,6	8,4	6,9	4,5	69,1

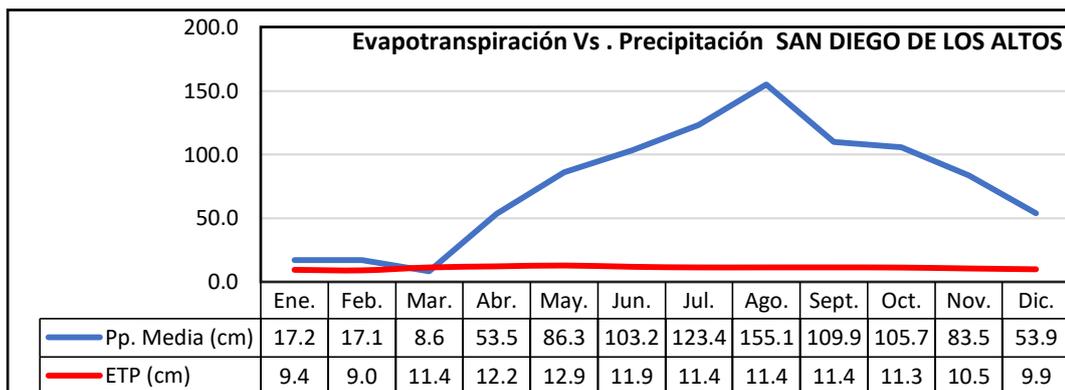


Figura III. 11. Gráfico valores medio mensuales del coeficiente de humedad. Estación San Diego de los Altos.

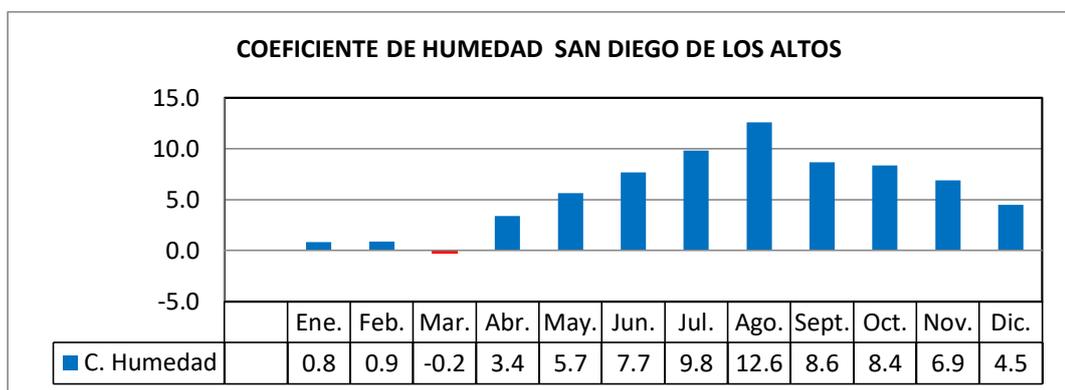


Figura III. 12. Gráfico de Evapotranspiración Vs Precipitación. Estación San Diego de los Altos.

Tabla III. 7. Valores correspondientes a la evapotranspiración y coeficiente de humedad de la estación Loma de Níquel.

	Periodo	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Pp. Media (cm)		47,4	20,9	12,2	82,4	148,6	220,0	214,7	250,0	180,0	201,7	134,8	97,2	1720,9
Temp. Media (°C)		20,0	20,5	21,5	22,1	22,2	21,6	21,1	21,2	21,4	21,4	21,0	20,3	21,2
Índice Calórico		8,2	8,5	9,1	9,5	9,5	9,2	8,9	8,9	9,1	9,0	8,8	8,4	106,9
ETP Sin Corregir		7,0	7,4	8,2	8,9	8,9	8,4	7,9	8,0	8,2	8,1	7,8	7,2	96,2
F. Fotoperiodo		1,0	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	12,3
ETP (cm)		7,1	6,8	8,5	9,0	9,5	8,8	8,5	8,5	8,4	8,3	7,8	7,3	98,5
C. Humedad		5,7	2,1	0,4	8,1	14,6	24,0	24,2	28,5	20,5	23,3	16,4	12,3	180,1

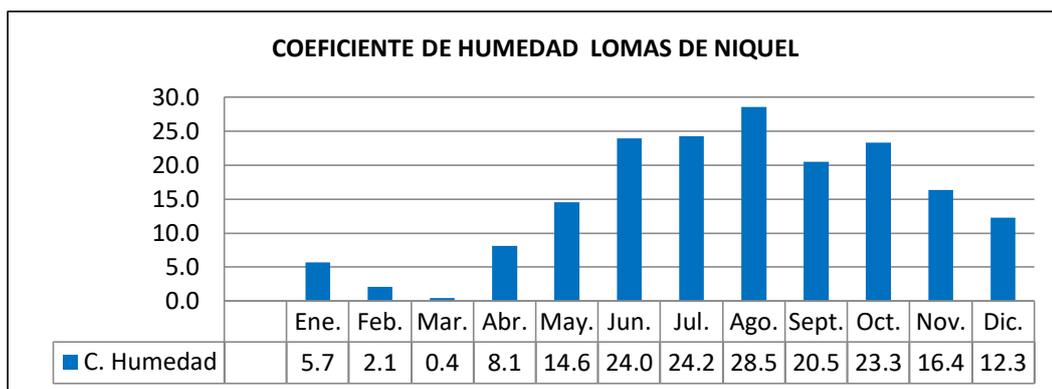


Figura III. 14. Gráfico valores medio mensuales del coeficiente de humedad. Estación Lomas de Níquel.

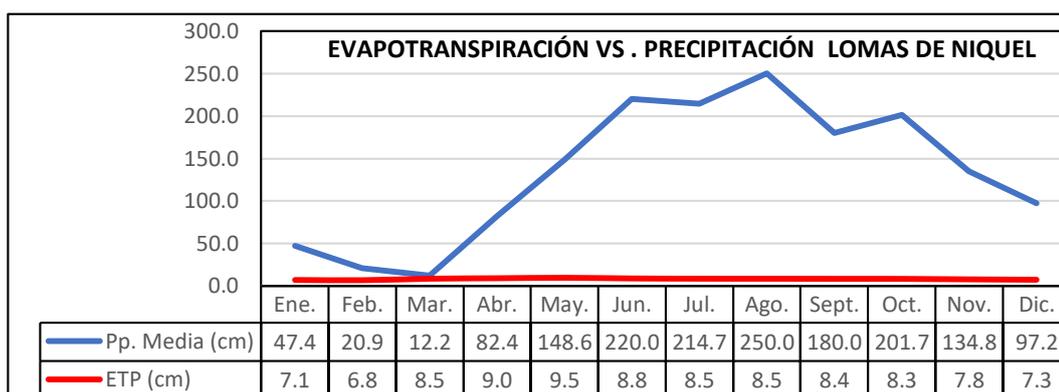


Figura III. 13. Gráfico de Evapotranspiración Vs Precipitación. Estación Lomas de Níquel.

Tabla III. 8. Valores correspondientes a la evapotranspiración y coeficiente de humedad de la estación Tiara

	Periodo	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Pp. Media (cm)		2,0	0,0	5,0	66,0	44,0	57,0	80,0	149,0	127,0	125,0	91,0	9,0	755,0
Temp. Media (°C)		18,5	19,0	20,0	20,6	20,7	20,1	19,6	19,7	19,9	19,8	19,5	18,8	19,7
Índice Calórico		7,3	7,5	8,1	8,5	8,6	8,2	7,9	8,0	8,1	8,1	7,8	7,4	95,6
ETP Sin Corregir		6,4	6,7	7,5	8,0	8,0	7,6	7,2	7,2	7,4	7,4	7,1	6,6	87,0
F. Fotoperiodo		1,0	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	12,3
ETP (cm)		6,4	6,2	7,7	8,1	8,6	8,0	7,7	7,7	7,6	7,5	7,0	6,7	89,1
C. Humedad		-0,7	-1,0	-0,3	7,1	4,1	6,2	9,4	18,4	15,8	15,6	11,9	0,4	86,9

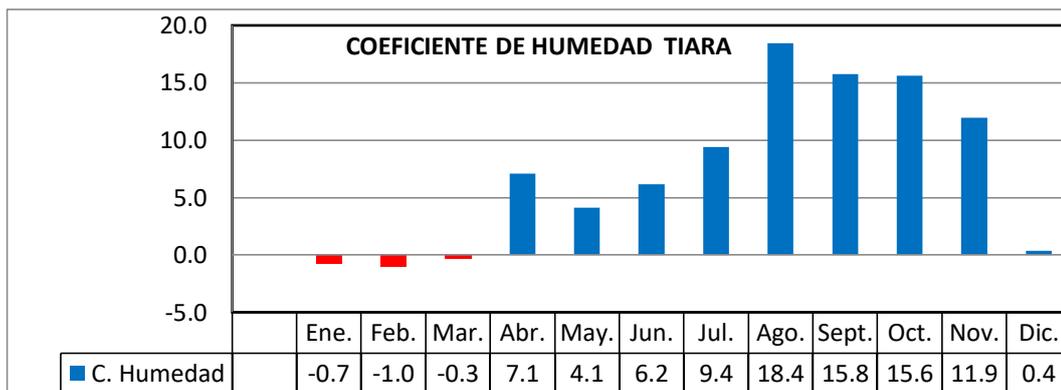


Figura III. 15. Gráfico valores medio mensuales del coeficiente de humedad. Estación Tiara.

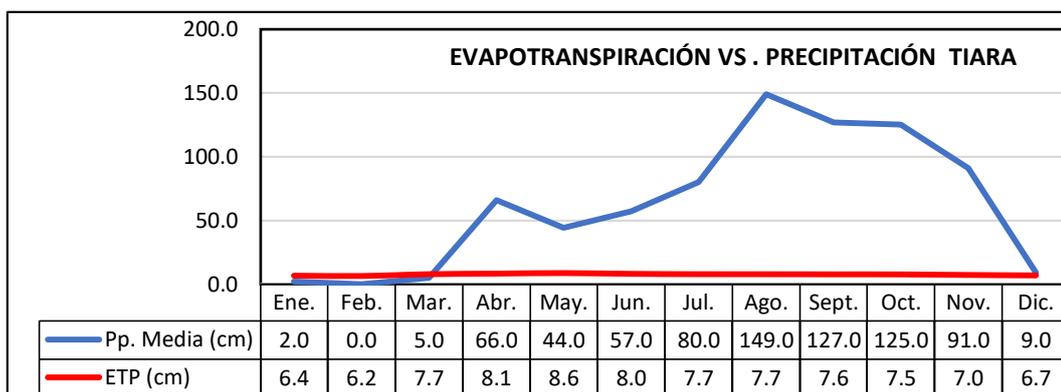


Figura III. 16. Gráfico de Evapotranspiración Vs Precipitación. Estación Tiara.