



3. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO ABIÓTICO DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO

3.1 GEOLOGÍA

3.1.1 Metodología

La metodología de trabajo para los temas de Geología, Geomorfología, Geotécnica y Sismología, incluyó las siguientes fases de trabajo.

3.1.1.1 *Recopilación de información*

Se recopiló, proceso y analizó información disponible sobre el proyecto consistente en estudios previos sobre el mismo, detallados en los términos de referencia; estudios de otros proyectos localizados en su área de influencia como la carretera Santa Fe de Antioquia – Puerto Valdivia; información de la zona generada por instituciones como IGAC, INGEOMINAS, y CORANTIOQUIA, e información presentada en diferentes publicaciones y proyectos de grado de estudiantes universitarios. La información utilizada y su fuente se detallan en el informe en la medida que se emplea.

3.1.1.2 *Reconocimiento de campo*

Con base en la información disponible se preparó un modelo geológico, geomorfológico, geotécnico y sismológico conceptual preliminar del área de interés del proyecto y se procedió a realizar algunas verificaciones mediante reconocimientos de campo.

En el sitio de obras, durante los reconocimientos de campo, se hizo especial énfasis en evaluar las galerías exploratorias excavadas durante los estudios de factibilidad del año 1982 (INTEGRAL, 1982) y los núcleos de las perforaciones realizadas durante ese mismo estudio.

3.1.1.3 *Investigaciones previas del subsuelo*

Como se mencionó en el numeral anterior, el área de las obras principales fue explorada durante el estudio de factibilidad del proyecto entre los años 1979 y 1983. La exploración consistió en la ejecución de perforaciones profundas y galerías exploratorias. El propósito de la exploración fue investigar aspectos tectónicos como litología y fracturamiento, régimen de aguas subterráneo, y alcance de los procesos de meteorización.

Se excavaron tres galerías, una en el estribo izquierdo y dos en el estribo derecho, con una longitud total de 1107 m. La Tabla 3.1 presenta los datos principales de cada galería.



Tabla 3.1. Información de las galerías exploratorias

Galería	Cota portal (msnm)	Rumbo	Abscisa (m)	Estribo
1	285	N45°W	0 - 470	Izquierdo
2	298	S50°E	0 - 230	Derecho
3	500	S10°W	0 - 200	Derecho
3	500	S5°E	200 - 407	Derecho

Se realizaron 21 perforaciones para una longitud total de 3.546,7 m, de las cuales siete perforaciones, con longitud total de 1.293,7 m, se localizaron en el estribo izquierdo. La Tabla 3.2 presenta los datos principales de cada perforación.

Tabla 3.2. Principales características de las perforaciones.

Perforación	Margen	Coordenadas		Inclinación	Cota superior (msnm)	Cota inferior (msnm)	Longitud perforada (m)	Fechas	
		Norte	Este					Iniciación	Terminación
SI - 1	Derecha	1280816.61	1157007.57	vertical	598.42	517.27	81.15	27-Nov-80	28-Ene-81
SI - 1A	Derecha	1279793.27	1156151.01	25°N50W	231.65	31.65	200.00	22-Mar-81	30-May-81
SI - 1B	Derecha	1280897.56	1157022.59	vertical	565.88	408.68	157.20	27-Feb-81	9-May-81
SI - 2	Derecha	1280889.12	1156693.70	vertical	551.87	352.22	199.65	27-Abr-80	12-Jun-80
SI - 3	Derecha	1280642.15	1156800.40	15°N40W	662.20	550.70	111.50	2-Oct-79	21-Nov-79
SI - 4	Derecha	1280517.57	1156826.67	15°N65W	714.09	588.39	125.70	7-Dic-79	4-Nov-80
SI - 5	Derecha	1280993.79	1157111.68	15°N45W	495.77	347.47	148.30	29-Feb-80	30-May-80
SI - 6	Derecha	1281226.61	1157160.18	30°N45W	429.11	277.71	151.40	2-Oct-79	21-Nov-79
SI - 7	Derecha	1281139.08	1157212.46	20°W	445.08	287.63	157.45	6-Dic-79	26-Feb-80
SI - 8	Derecha	1281024.76	1156737.90	10°N50W	530.81	223.96	306.85	1-Oct-80	15-Feb-81
SI - 9	Derecha	1280445.61	1156703.34	10°S80W	629.08	486.78	142.30	26-Jun-80	30-Sep-80
SI - 10	Derecha	1280120.54	1156610.85	10°S80W	619.85	468.75	151.10	26-Jun-80	8-Nov-80
SI - 11	Izquierda	1280793.82	1155919.28	vertical	481.62	381.52	100.10	17-Ago-81	21-Sep-81
SI - 12	Izquierda	1280103.72	1155710.95	20°N45W	508.30	208.30	300.00	5-May-80	23-Sep-80
SI - 13A	Izquierda	1281190.10	1155960.45	vertical	544.24	252.19	292.05	1-Dic-80	17-May-81
SI - 14A	Izquierda	1281393.33	1156364.61	vertical	344.72	194.62	150.10	26-Abr-81	27-Jul-81
SI - 15	Izquierda	1280696.80	1156108.42	vertical	340.79	259.99	80.80	11-Sep-81	17-Oct-81
SI - 16	Izquierda	1280868.00	1155828.00	vertical	539.92	249.32	290.60	26-Jun-81	11-Nov-81
SI - 17	Izquierda	1281111.25	1156266.27	vertical	311.21	231.16	80.05	25-Ago-81	25-Sep-81
SI - 18	Derecha	1281372.00	1157012.00	vertical	345.02	224.62	120.40	12-Jun-81	7-Jul-81
SI - 19	Derecha	1281200.00	1156900.00	vertical	450.71	250.71	200.00	25-Jun-81	21-Jul-81

Durante el presente estudio se accedió al interior de las galerías y se verificó y actualizó el registro geotécnico de las mismas, con base en lo cual se realizó una clasificación del macizo rocoso. Adicionalmente se efectuó una reinterpretación de los núcleos de las perforaciones almacenados en el área. Los resultados de estas actividades fueron considerados en los aspectos de geología, geotecnia y geomorfología del sector de las obras principales presentados en este informe.

3.1.2 Generalidades

El embalse y las obras para el proyecto hidroeléctrico se localizan en su totalidad sobre el segmento medio del cañón del Río Cauca, en el tramo comprendido entre Liborina, donde se encuentra la cola del embalse, e Ituango y Briceño donde se localiza el sitio de presa, casa de máquinas y demás obras.

En la mayor parte de su extensión, el embalse tendrá una disposición alargada y estrecha, respaldado por largas vertientes empinadas, las cuales son el elemento geomorfológico dominante del paisaje.

El cañón del Río Cauca divide las cordilleras Central y Occidental de los Andes Colombianos, las cuales presentan marcadas diferencias desde el punto de vista de su evolución geológica y estructural. La cordillera Occidental tiene un origen marino, mientras que la cordillera Central presenta una evolución de tipo continental, representando dos diferentes terrenos alóctonos suturados a través del sistema de fallas Cauca - Romeral a finales del período Cretáceo (Restrepo – Toussaint, 1989; CORANTIOQUIA, 2001). Esta yuxtaposición de ambientes, permite que en la zona del embalse aflore una amplia variabilidad de tipos de roca y depósitos no consolidados; no obstante, las obras importantes se localizan sobre una litología homogénea correspondiente a gneisses esquistosos.

Inicialmente se describirán a escala regional las unidades litológicas y estructuras presentes en la zona de influencia del embalse, posteriormente se detallarán los sitios de obra, y por último se describirán los aspectos geomorfológicos y morfodinámicos que caracterizan la zona del proyecto hidroeléctrico.

3.1.3 Geología regional

A nivel regional, en la zona del embalse afloran rocas metamórficas de edad Paleozoico como gneisses y esquistos, las cuales hacen parte del Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central (Restrepo – Toussaint, 1982; CORANTIOQUIA, 2001); secuencias ofiolíticas desmembradas incluyendo dunitas, gabros y diabasas del Cretáceo; granitoides sintectónicos; rocas sedimentarias terrígenas del Terciario, y una gran cantidad de depósitos no consolidados del Cuaternario.

La tectónica regional está dominada fundamentalmente por el sistema de fallas Cauca-Romeral, y algunos de sus sistemas asociados como las fallas de Sabanalarga y de Santa Rita. La evolución de estas estructuras es compleja, con papeles importantes en periodos orogénicos de principio y fin del Terciario, hasta la conformación definitiva del paisaje actual en el Plioceno.

A continuación se presenta una descripción de las principales unidades litológicas encontradas en zona del embalse, de acuerdo a su origen y en orden de antigüedad (véase Plano F-PHI-EAM-LB-AA-RE-LIT).

3.1.3.1 Rocas Metamórficas del Paleozoico

Corresponden a unidades originadas durante eventos tectono-metamórficos durante el Paleozoico en la Cordillera Central. Tienen un origen netamente regional y variaciones de metamorfismo desde grado muy alto hasta medio, reunidas en el denominado Grupo Valdivia (Restrepo, 1986). Se incluyen las siguientes unidades:

- **Neises (Pznf, Pznl)**

Conjunto de néises cuarzo feldespáticos (Pznf) y aluminicos (Pznl), con una estructura que varía entre esquistosa, néisica y migmatítica; plegados y con diferenciaciones mineralógicas y texturales debido a la variabilidad del metamorfismo y a la heterogeneidad de los sedimentos originales. Parte de estos néises corresponde a la unidad litológica sobre la que se asentarán las obras del proyecto.

- **Complejo de Puquí (PEmp y PEnp)**

Localizado al noroeste de la falla Espíritu Santo. Corresponde a la unidad de Néis Micáceo (PEnp) y la metatonalita de Puquí (PEmp); la unidad de neis está constituida por cuarzo, sillimanita, plagioclasa, hornblenda, biotita y moscovita, asociados a migmatitas y granitoides. Los néises fueron intruidos por la metatonalita de Puquí, que generó un metamorfismo térmico con asimilación de la roca encajante. La composición de la metatonalita aunque variables es una tonalita y localmente granodiorita, con minerales metamórficos que la caracterizan.

- **Esquistos (Pze)**

Se localizan intermitentemente a lo largo de la zona de influencia del embalse; al sur en Santa Fe de Antioquia, y en el centro y norte, desde los alrededores del caserío de Orobojo hasta la quebrada Sardinas.

Los esquistos presentan intercalaciones de diferentes composiciones, encontrándose cuarzo sericíticos, cloríticos, y grafitosos, en orden de decrecimiento en cuanto a sus propiedades geotécnicas. Las relaciones de éstos con los cuerpos ígneos es en general de tipo intrusivo, mientras que con los neises es de tipo gradacional a normal, como en cercanías a la zona de la presa.

Sobre estas rocas, en las zonas de inundación del embalse, se presentan sobrecapas de meteorización inferiores a los 10 m de espesor, con muy escaso desarrollo de suelo residual y predominio de roca fracturada, oxidada y meteorizada.

- **Anfibolitas (Pza)**

Estas rocas afloran en ambos márgenes de la zona de la cola del embalse, como unos cuerpos alargados y controlados por el tren estructural regional de dirección N-S. El principal cuerpo lo constituye la denominada Anfibolita de Sucre, un cuerpo de textura néisica a localmente esquistosa, en la que sobresalen las hornblendas y plagioclasas orientadas.



Las anfibolitas están afectadas por un intenso tectonismo, por lo que se presentan altamente fracturadas en la mayoría de sus afloramientos

3.1.3.2 Rocas Ultrabásicas del Cretáceo

- **Serpentinitas (Kiu)**

Como rasgo característico de la sutura estructural de las cordilleras, se presentan rocas ultrabásicas, controladas por el tren regional de fallas de dirección N-S. Estos cuerpos afloran en el extremo sur en cercanías a las poblaciones de Sucre y Olaya, y en la parte norte, unos 10 km aguas arriba del sitio de presa. Corresponden a serpentinitas de color negro grisáceo, gris oscuro a negro verdoso, en alto grado de fracturación por el efecto tectónico en la zona.

3.1.3.3 Rocas Igneas del Cretáceo

Dentro de este grupo de unidades se tienen intrusivos sintectónicos, rocas básicas de las secuencias ofiolíticas y diabasas de volcanismo marino.

- **Gabros (Kig)**

Cuerpos intrusivos básicos aparecen tanto por diferenciación magmática de los intrusivos intermedios, como por segmentación de las columnas ofiolíticas. Los primeros, aparecen en fajas delgadas y alargadas de poco espesor, en los alrededores del caserío Orobajo, mientras que las asociadas a columnas ofiolíticas se presentan en delgadas franjas anexas a las rocas ultrabásicas.

- **Volcánico de Barroso (Ksvb)**

Una de las unidades de mayor extensión de afloramiento a lo largo de la zona del embalse, lo constituye una secuencia de diabasas, basaltos, rocas volcano-sedimentarias y paquetes de chert, pertenecientes a la denominada Formación Barroso (Álvarez y González, 1978). El conjunto, conocido como "rocas verdes", aparece a lo largo de casi 50 km entre el sector del Guásimo y el caserío de Orobajo, donde limita en contacto fallado con el Batolito de Sabanalarga.

Son rocas de variables propiedades geomecánicas, desde muy duras y resistentes hasta altamente frágiles en las zonas de falla.

- **Batolito de Sabanalarga (Ksts)**

Un grupo de intrusivos de composición intermedia de finales del Cretáceo sella la sutura de los terrenos marinos y continentales de las cordilleras occidental y central respectivamente. El más sobresaliente de ellos es el denominado Batolito de Sabanalarga, constituido en su mayoría por una diorita de grano medio, que aflora en gran parte de la zona central del embalse, siguiendo la dirección N-S del tren estructural regional.



Como característica general, son rocas de buena calidad geotécnica, salvo localizados sectores de alto fracturamiento debidos al cruce de fallas. En la zona de influencia del embalse, su sobrecapa de meteorización es inferior a los 8 m, con predominio de roca fracturada y oxidada.

- **Batolito Antioqueño (Ksta)**

Corresponde a un plutón del Cretáceo superior, localizado hacia la parte alta de la vertiente oriental del valle del río Cauca, en jurisdicción del municipio de San Andrés de Cuerquia. Intruye las rocas metamórficas del Complejo Poli-metamórfico de la Cordillera Central produciendo aureolas de contacto con asociaciones de minerales en facies albita-epidota cornubianita a piroxeno cornubianita. Se compone principalmente, de cuarzdiorita (97% del área total del batolito) y en proporción menos abundante se encuentran facies félsicas (2.8% del área del batolito) y gabroides (0.2% del área del batolito); la textura es equigranular, fanerítica. La roca desarrolla perfiles de meteorización espesos en divisorias amplias y zonas de pendientes moderadas a bajas, y se encuentra fresca en zonas de pendientes fuertes superiores a 50° o en los lechos de ríos y quebradas.

3.1.3.4 Rocas Sedimentarias del Terciario (Ts)

Una cobertura local de sedimentitas terrígenas Terciarias afloran en los alrededores de Santa Fe de Antioquia, como parte de la denominada Formación Amagá (González, 1976). Se intercalan capas de conglomerados polimícticos, areniscas, lutitas y carbones, en estratos métricos, por lo general planares, con pliegues isópacos. Conforman terrenos estables en cuanto a fenómenos de remoción en masa, pero altamente afectables por erosión.

3.1.3.5 Depósitos no consolidados del Cuaternario

La elevada morfodinámica de las vertientes del cañón del Río Cauca y las cuencas tributarias, ha generado numerosos depósitos no consolidados, entre los que se cuentan los que se enumeran a continuación.

- **Terrazas aluviales (Qt)**

Las mejores acumulaciones de sedimentos en forma de terrazas aparecen expuestas en la zona sur del proyecto, en el sector de Santa Fe de Antioquia. Estas fueron formadas por la deposición de sedimentos del Río Cauca y sus afluentes, en épocas en que el río recorría por niveles superiores, probablemente como resultado del represamiento producido por el megadeslizamiento del Guásimo (Page, 1981).

- **Aluviones Recientes (Qal) y depósitos aluviotorrenciales (Qalt)**

Acumulaciones de tipo aluvial y aluviotorrencial son comunes, principalmente, sobre las desembocaduras de las principales corrientes afluentes del Río Cauca. Debido al relieve quebrado y montañoso de esta parte de la cuenca del Cauca; dichos materiales son por lo general tipo grueso granular.

- **Depósitos de flujos (Qf)**

Corresponden a depósitos de vertiente generados por grandes movimientos en masa, involucrando gran cantidad de agua y por ende un extenso transporte, para finalmente depositarse con una generalizada forma alargada, de mayor amplitud en su parte baja.

Están conformados por una matriz de suelo fino, con diversas proporciones de bloques rocosos, y su estabilidad depende en gran medida de su grado de madurez y la disponibilidad de agua. La mayor parte de ellos están localizados en los segmentos central y sur de la zona de estudio, donde el valle es más amplio y evolucionado.

- **Depósitos Coluviales (Qc)**

Depósitos de vertiente producidos por movimientos en masa, se presentan puntualmente a lo largo de toda las vertientes del cañón del río Cauca, configurando pequeños peldaños que suavizan la pendiente. Estos depósitos se caracterizan por sus reducidas dimensiones con relación al resto de los materiales no consolidados.

3.1.4 Marco Tectónico Regional.

Como se discutió en el numeral anterior, el cañón del Río Cauca coincide con una importante sutura regional en la que convergen los ambientes de origen marino de la Cordillera Occidental y continental de la Cordillera Central. La principal estructura de la zona la constituye el sistema de fallas Cauca Romeral, que atraviesa el país de sur a norte, pero que se encuentra segmentado localmente en numerosas fallas de menor recorrido.

3.1.4.1 *Falla Cauca W.*

Falla de orientación general norte - sur, es inversa de alto ángulo, con buzamiento desde 80° Este hasta verticales. Observable en Bolombolo, Liborina y más hacia el norte se confunde con las fallas de Sabanalarga. Cruza terrenos constituidos por los esquistos y anfibolita del paleozoico y por los sedimentos del Terciario.

3.1.4.2 *Falla Sucre.*

Falla de orientación general N35°W, que se desprende de la falla de Romeral, con buzamiento mayor de 65° al Este y con el bloque oriental cabalgando sobre el occidental. Afecta terrenos de esquistos del paleozoico, rocas volcánicas del cretáceo, rocas ígneas del Batolito de Sabanalarga y sedimentos del terciario. Cruza al este de la población de la que toma su nombre.

3.1.4.3 *Alineamiento Quebrada Juan García.*

Es un alineamiento de orientación general N45°E, que sigue el curso bajo la corriente de la quebrada que toma su nombre; se ve truncado por las trazas de las fallas de Sabanalarga.



3.1.4.4 Falla Sabanalarga.

Son dos fallas de orientación general norte - sur, Sabanalarga E y Sabanalarga W, identificadas en la región de Liborina, cruzando el cañón del río aguas arriba de la desembocadura de la quebrada Peque. Es una falla inversa, buzando 70° al Este. Pone en contacto rocas del Batolito de Sabanalarga y esquistos del paleozoico, afectando además rocas del terciario.

3.1.4.5 Falla Barbacoas.

Falla de orientación general N10°E, observable cerca al Guásimo; hacia al norte, se confunde con las trazas de la falla de Sabanalarga . Afecta terrenos del Batolito de Sabanalarga y las diabasas del cretáceo.

3.1.4.6 Falla El Guásimo:

Son un conjunto de fallas con orientación N10°W a N15°E, de carácter normal y buzando casi vertical con su bloque oriental, descendido con respecto al occidental. Afecta terrenos del Batolito de Sabanalarga y las diabasas del cretáceo. Su traza principal cruza por el sitio en el que se presenta el deslizamiento de El Guásimo.

3.1.4.7 Falla Orobajo

Falla con orientación norte - sur, es de rumbo y presenta un buzamiento casi vertical. Afecta terrenos de gabros y diabasas del cretáceo, esquistos del paleozoico y al Batolito de Sabanalarga.

3.1.4.8 Falla Ituango.

Se extiende desde la región de Toledo y cruza por Ituango; se considera que hace parte de una de las trazas principales del sistema Romeral. Su orientación general es norte - sur, de carácter inverso y buzamiento fuerte. Afecta rocas tipo esquistos y gabros.

3.1.4.9 Fallas Santa Rita.

Son dos fallas denominadas Santa Rita Este, con dirección general N20°E, y Santa Rita Oeste, con dirección general N35°E, que cruzan sobre las vertientes del cañón, en inmediaciones de las desembocaduras de los ríos Ituango y San Andrés. Fallas de Rumbo con altos buzamientos que afectan terrenos constituidos por neises y esquistos del paleozoico.

3.1.4.10 Falla La Volcanera.

Falla con orientación general norte - sur, cruza el cañón del Río Cauca a la altura de la corriente de la que toma su nombre, aguas abajo de la desembocadura de la quebrada Sinitavé. Define contactos entre los esquistos del paleozoico y las rocas del Complejo de Puquí.

3.1.4.11 *Falla Espiritu Santo*

Falla regional N45°E, que se observa desde la zona de Liborina hasta aguas abajo de Puerto Valdivia, controlando parte del cañón del Río Cauca. Es una falla de tipo inverso, buzamientos mayores a los 75° suroeste, con desplazamiento sinextrolateral. Define contacto entre los esquistos del paleozoico y las rocas del complejo Puquí.

3.2 GEOMORFOLOGÍA

Esta actividad fue desarrollada con base en el análisis de fotografías aéreas de diferentes años, pues de esta manera se puede tener una visión global y panorámica de las características morfológicas del terreno, entre las que se encuentran los rasgos estructurales y erosivos más importantes. La fotointerpretación sistemática de la zona de interés tiene el alcance de un reconocimiento general y permitió definir la espacialización de los principales rasgos geomorfológicos y morfodinámicos que puedan ser de importancia para la toma de decisiones. Además, se tomó como base de trabajo la información existente en estudios de Woodward - Clyde Consultants, Integral, Ingeominas y Corantioquia.

Con los datos de esta fase se construyó un mapa a escala 1:25000 en el cual se presentan los rasgos más destacados con un grado de detalle y confiabilidad, que permite formular las hipótesis básicas sobre los problemas que se investigaron en particular.

El trabajo de fotointerpretación se orientó hacia la obtención de información que diera bases a los cuatro objetivos básicos que se mencionan a continuación:

- Identificar las unidades geomorfológicas de la zona de interés para el proyecto.
- Identificar las zonas con procesos erosivos y movimientos en masa que pueden ser de interés para el manejo de sedimentos que se aportan al embalse.
- Identificar rasgos geomorfológicos que puedan servir de indicio de actividad neotectónica de las fallas cartografiadas en la región.
- Aportar información espacial sobre posibles deslizamientos de gran tamaño y que pudieran ser de interés para la estabilidad del embalse.

Las fotografías aéreas utilizadas se presentan en la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Fotografías aéreas utilizadas

Vuelo	Faja	Fotos	Escala
FAL 365	F4	459 – 472	1:30.000
FAL 365	F5	443 – 457	1:30.000
FAL 365	F7	409 – 417	1:30.000
FAL 365	F8	418 – 426	1:30.000
FAL 91	F07	74 -103	1:32.100
FAL 22	F06	03 – 36	1:30.400
FAL 22	F05	74 – 98	1:30.100

3.2.1 Marco Geomorfológico

En las regiones de relieve montañoso, la geomorfología permite delimitar zonas con características paisajísticas homogéneas que probablemente son el resultado de la interacción de un conjunto de variables geológicas, tectónicas y climáticas; si se identifican correctamente, es posible suponer que cada una de ellas, en la medida en que son el resultado de una evolución común, morfogénesis, tendrán un comportamiento similar en el futuro (morfodinámica).

La morfogénesis permite identificar los criterios de homogeneidad que tiene una determinada porción del territorio estudiado y que se diferencia en algún grado con las zonas que lo limitan. Encontrando esas condiciones de homogeneidad, es fácil suponer que la zona geomorfológica así delimitada, se comportará homogéneamente y adquiere interés práctico en la medida en que se identifican los procesos superficiales (erosión, movimientos en masa, entre otros) que pueden ocurrir en un periodo de tiempo relativamente corto, como es el de vida útil de una obra de ingeniería.

Se adoptó como hipótesis de trabajo que la geomorfología del cañón del Cauca debe reflejar también el proceso de levantamiento de las cordilleras colombianas, asumiendo que el desarrollo de éste fue simultáneo, lo cual puede verse bien reflejado en el sistema de altiplanos de la zona central de Antioquia.

De otro lado, la complejidad del sistema tectónico del valle (sistemas de fallas de Cauca - Romeral) tiene que mostrar su influencia en la morfogénesis de esta región; más difícil de identificar es la influencia particular que han tenido las variaciones climáticas ocurridas durante el Cuaternario.

Se identificaron las zonas con procesos erosivos correspondientes a cada unidad geomorfológica, con el fin de tener una asociación que permita tener un acercamiento a la morfodinámica de la zona. Se identificaron entonces rasgos como cicatrices de deslizamientos antiguos y recientes, erosión superficial, erosión concentrada, escarpes erosivos, grado de incisión, cárcavas y surcos.

Como en algunos sitios la escala disponible de las fotografías aéreas dificultó la identificación de rasgos importantes, se consultó el estudio de CORANTIOQUÍA¹, que cubre el tramo comprendido entre Santa Fe de Antioquia y Sabanalarga. La información presentada al norte de esta última población está basada solamente en la fotointerpretación.

¹ Mapa Geomorfológico, de Amenazas y Áreas Degradadas de la Jurisdicción de CORANTIOQUIA. CORANTIOQUIA,2001

3.2.2 Macrounidad Alta Incisión (AI)

3.2.2.1 Unidad Vertiente media de superficie irregular (AI-Vmsi)

Se encuentra ubicada en la margen oeste del Río Cauca, al norte del Río Ituango, e incluye la quebrada Maratón y el río Guaico. Se localiza entre 250 y 1.650 msnm y está constituida por una vertiente irregular, ligeramente convexa, con longitud entre 850 y 2.100 m, inclinación entre 35 a 50 ° y dirección general N -S. La incisión es moderada y desarrolla valles en forma de “V” abierta. Conforman sistemas de filos con cima irregular, moderadamente amplia, que desarrolla flancos cortos e irregulares con una incisión baja. Esta unidad se desarrolla sobre neises y esquistos. Cicatrices de movimientos en masa medianos están asociadas a las laderas del Río Ituango y Cauca, dispuestos aleatoriamente a diferentes alturas dentro de la unidad. Son comunes los desgarres en las quebradas Maratón y Pescadito en dirección del Río Cauca. (véase Plano F-PHI-EAM-LB-AA-RE-GEO)

3.2.2.2 Unidad Vertientes en la cuenca de la quebrada Pascuita (AI-VP)

Se localiza en la margen izquierda del Río Ituango. Está entre las cotas 600 y 2.400 msnm. Las vertientes son planas de 15 a 30° de inclinación y longitud entre 1.800 y 2.500 m; la incisión sobre los flancos es moderada y desarrolla valles en forma de “V” abierta. Las rocas que afloran en esta unidad son esquistos. Cicatrices de movimientos en masa medianos están asociadas a las laderas de la quebrada.

3.2.2.3 Unidad Vertientes largas de superficie convexa (AI – Visc)

Se localiza en la margen oeste del Río Cauca, entre el Río Ituango y la divisoria de aguas de la quebrada Burundá. Es una vertiente larga ubicada entre las cotas 250 y 1.900 msnm, cuya longitud varía de 2.000 y 4.000 m, con pendiente entre 20 a 30°; conformando una superficie irregular y convexa, con un grado de incisión bajo a excepción de la generada por las quebradas Burundá y La Cascada, que conforman un filo de tope amplio y redondeado. La quebrada Burundá ha desarrollado un importante valle con sección transversal en forma de “V” cerrada, con importantes procesos erosivos representados por movimientos en masa medianos y desgarres ubicados en la parte baja de los taludes del valle. En esta unidad se presentan neises.

3.2.2.4 Unidad Vertientes de filos cortos (AI – Vfc)

Se ubican en la margen oeste del Río Cauca, entre la quebrada Sardinias y la divisoria de aguas de la quebrada Burundá. Se localiza entre 250 y 1.500 msnm, y está constituida por un filo principal de tendencia NW estrecho, subredondeado, largo e irregular con cambios de pendiente. De él se desprende un conjunto de filos de longitud moderada, estrechos, de fuerte inclinación, que desarrollan flancos planos, de longitud entre 1.600 m y 1.900 m e inclinación moderada entre 30 a 40°. La incisión es moderada a baja, con valles de sección transversal en forma de “V” abierta.



Los fillos no llegan hasta el Río Cauca pues se truncan, dando paso al escarpe del borde del Río Cauca. Está conformada por rocas néisicas y esquistas. Esta unidad conforma los taludes norte del valle de la quebrada Sardinias, los cuales son mas largos, mas planos y ligeramente mas inclinados que en el costado sur. Los procesos erosivos son cicatrices de movimientos en masa y se localizan en la parte alta del filo principal, también hay desgarres en los taludes de la quebrada Guasimal.

3.2.2.5 Unidad Filo alargado en dirección NS (AI – Fa)

Se encuentra en ambas márgenes del Río Cauca; al lado este, entre las quebradas Sardinias y Santa María, y en el lado oeste, entre las quebradas Sardinias y Cortadera. Ubicado entre las cotas 250 y 1.200 msnm, se caracteriza por desarrollar un filo alargado en dirección NS, moderadamente estrecho y anguloso; los flancos son planos con pendiente entre 30 y 45° y tienen una longitud entre 500 y 1.400 m. La incisión es baja con un incipiente desarrollo de fillos. Esta unidad se desarrolla sobre gabros y esquistos. Los procesos erosivos son pocos y están representados por cicatrices de pequeños movimientos en masa.

3.2.2.6 Unidad Vertientes de fuerte inclinación (AI – Vfi)

Ubicada en el margen este del Río Cauca, entre el río San Andrés y la quebrada Pescado. Localizada entre los 250 y 2.400 msnm, desarrolla un filo principal en dirección NS, moderadamente amplio y redondeado, del cual se desprende un conjunto de fillos con cima subredondeada, que a media ladera dan paso a una vertiente larga de fuerte inclinación y superficie plana continua, con incisión baja. Los fillos que se desprenden del principal son largos, de pendientes fuerte, y desarrollan flancos amplios y planos con pendientes moderadas entre 40 a 50°, con longitudes entre 1.000 y 2.700 m e incisión baja, desarrollando valles con forma de “V” abierta.

Está conformada por neises, neises intrusivos y esquistos. Esta unidad al llegar al río San Andrés, en el límite sur occidental, entre la quebrada Cangrejo y el Río Cauca, adopta una forma convexa, imprimiendo una apariencia sobresaliente, diferente al resto de la unidad. Hay una alta densidad de procesos erosivos, evidenciado en la concentración de desgarres y cicatrices de movimientos en masa activos y antiguos en la quebrada El Orejón. Se destacan cicatrices de movimientos en masa grandes en las quebradas Tenche y Ticutá, en dirección del Río Cauca y en el río San Andrés.

3.2.2.7 Unidad Vertiente con desarrollo de fillos con flancos de longitud media (AI - Vffm)

Se localiza en el margen este del Río Cauca, entre el río San Andrés y la divisoria de aguas de las quebradas Tacuí y Uriaga. Ubicada entre las cotas 250 y 2.000 msnm, con una longitud entre 700 y 2.000 m y pendientes de 35 y 45°; esta vertiente desarrolla fillos alargados de cima subredondeada, continua e inclinación moderada, que desarrolla flancos amplios con inclinaciones y grado de incisión moderado, generando valles con sección transversal en forma de “V” abierta. Hacia el río San Andrés la pendiente se suaviza un poco, permitiendo el desarrollo de abanicos aluviales en las quebradas



principales. Está desarrollado sobre neises y esquistos. Los procesos erosivos son leves y están representados por una pequeña zona de erosión en la cabecera de la quebrada Tacuí.

3.2.2.8 Unidad Vertiente con filos largos con flancos de longitud corta (AI – Vffc)

Ubicada en la margen oeste del Río Cauca, entre las quebradas Cortadera y Peña. Se encuentra entre las cotas 275 y 1.400 msnm, con pendiente moderada entre 30 y 45°. Desarrolla un filo con tendencia NS de tope amplio, subredondeado e irregular, que tiene varios cambios de pendiente en su recorrido. La incisión es moderada, generando un conjunto de filos largos con cima subredondeada, flancos de longitudes entre 500 m y 1000 m y pendientes moderadas en diferentes direcciones, cuya incisión es baja, desarrollando valles en forma de “V” abierta. Cicatrices de movimientos en masa y zonas erosivas en el nacimiento de la quebrada La Playuela son comunes, al igual que pequeños desaguarres en los afluentes de la quebrada Cortadera, principalmente en la parte alta. Esta unidad está desarrollada en esquistos.

3.2.2.9 Unidad Vertiente con filos cortos margen este (AI – Vfce)

Se localiza en la margen este del Río Cauca, entre la divisoria de aguas de las quebradas Chepe y Caimital y la quebrada Sardinias. Está representada por un conjunto de filos localizados entre los 250 y 1.700 msnm, con pendiente moderada entre 40 y 50°, una longitud entre 500 y 2.000 m, y dirección E-W, los cuales son interrumpidos por la formación de facetas triangulares. El grado de incisión de la unidad es moderado y los drenajes desarrollan valles en forma de “V” abierta. La unidad se encuentra sobre esquistos, gabros y rocas sedimentarias del terciario. Cicatrices de movimientos en masa, con los depósitos asociados, se encuentra en cercanías a la quebrada Sardinias.

3.2.2.10 Unidad Vertiente en la cuenca de la quebrada Santa María (AI – Vsm)

Se encuentra en la margen este del Río Cauca, entre la quebrada Santa María y la divisoria de aguas de dicha quebrada, entre las cotas 300 y 2.000 msnm. Está conformada por un conjunto de filos en dirección W-E, con flancos planos, longitud entre 600 y 1.200 m y pendientes entre 40 y 60°. La incisión sobre la vertiente es moderada y los drenajes desarrollan secciones transversales en forma de “V” abierta. Las rocas que afloran en esta unidad pertenecen al Batolito de Sabanalarga. Los procesos erosivos están representados por cicatrices de medianos movimientos en masa y pequeños desaguarres.

3.2.2.11 Unidad Vertiente de longitud media (AI – Vm)

Ubicada en la margen este del Río Cauca, entre la divisoria de aguas de la quebrada Santa María y la cañada El Derecho, desde los 300 a los 1.200 msnm. Sus longitudes varían de 800 a 1.600 m, y se caracteriza por un incipiente desarrollo de filos largos de tope amplio, con flancos planos y pendiente entre 40 y 60°. La incisión es moderada y las secciones transversales de los drenajes son en forma de “V” abierta. Esta unidad se desarrolla sobre el Batolito de Sabanalarga y Gabros. Los procesos erosivos son



pequeños desgarres y cicatrices de movimientos en masa, especialmente en la parte baja cercana al río.

3.2.2.12 Unidad Vertiente con fillos controlados estructuralmente (AI – Vfe)

Se encuentra en el margen oeste del Río Cauca, a media ladera de la vertiente que cruza las quebradas La Bastilla, El Altico, Higuito y la quebrada Pena. Se localiza entre 300 y 2.000 msnm, y corresponde a una vertiente interrumpida por silletas, las cuales definen entre ellas fillos en dirección NS que contrastan con la dirección de los fillos de la vertiente. La incisión de los drenajes es alta al igual que la densidad, contrastando con la parte alta de la vertiente. Los fillos tienen topes estrechos, angulosos, de flancos cortos, con pendiente general entre 30 y 40° y longitudes entre 700 y 1.600 m. En esta unidad se presentan rocas del Batolito de Sabanalarga y diabasas de la Formación Barroso. Los procesos erosivos están concentrados en la parte alta de la unidad y generalmente son desgarres.

3.2.2.13 Unidad Vertiente de inclinación moderada (AI – Vm)

Ubicada en la margen oeste del Río Cauca, entre las quebradas Peque y la divisoria de aguas de la quebrada Zajón del Potrero. Esta es una vertiente de superficie plana e irregular, localizada entre 425 y 1.650 msnm y longitud entre 900 y 1.800 m, con un filo de tope estrecho, redondeado e irregular, con flancos largos, pendiente moderada de 35 a 40° e incisión media, conformando valles de sección transversal en forma de “V” abierta. Está desarrollada sobre diabasas de la Formación Barroso. Una zona de erosión se identifica en la margen izquierda de la quebrada Peque, y existen pequeños desgarres en el borde de la quebrada Chiquita.

3.2.3 Macrounidad vertientes bajas margen Oeste (VBO)

3.2.3.1 Unidad Filo bajo en dirección NE (VBO – Fne)

Se localiza al costado oriental en la desembocadura de la quebrada Peque, entre los 300 y 650 msnm. Presenta un tope alargado en dirección NE, estrecho y subredondeado, de flancos cortos, cuyas longitudes varían entre 200 y 500 m y la pendiente entre 35 a 40°, con desarrollo de terrazas alargadas en la parte baja de la quebrada Peque. La dirección de filo es contrastante con la disposición de las geoformas circundantes; la quebrada en su tramo final también adopta esta dirección NE y representa un rasgo estructural correspondiente a un lomo de arrastre. En esta unidad afloran diabasas de la Formación Barroso.

3.2.3.2 Unidad Vertiente larga y moderada (VBO – Vlm)

Se localiza entre la divisoria de aguas del sur de la quebrada Peque y la quebrada del mismo nombre, entre los 425 y 2.100 msnm. Es una vertiente de pendiente moderada, entre 45 a 60°, y longitudes entre 700 y 2.500 m; se caracteriza por presentar un incipiente desarrollo de fillos largos de topes amplios, casi planos y flancos muy cortos; la



incisión es baja y afloran rocas diabásicas. Pequeñas cicatrices de movimientos en masa son frecuentes, junto con desgarres.

3.2.3.3 Unidad Vertiente con desarrollo de filos de flancos medios (VBO – Vffm)

Ubicada entre las quebradas Purgatorio y San Julián, y la quebrada Jeringa y la divisoria de aguas sur de la quebrada Peque. Esta unidad, localizada entre los 325 y 2.700 msnm, desarrolla filos de topes estrechos, subredondeados, largos e irregulares, con flancos medios, de pendientes entre 45 a 60 ° y longitudes entre 900 y 1.800 m; los drenajes tienen una incisión moderada y han desarrollado valles de sección transversal en “V” semiabierta. En el sector próximo al Río Cauca hay un cambio en el aspecto de la geoforma, caracterizado por zonas erosionadas, cicatrices de movimientos en masa, cárcavas y en los tramos finales de algunas quebradas, un fuerte incisión. La microcuenca de la quebrada El Salto se caracteriza por la gran cantidad de procesos erosivos que presenta. Las rocas que afloran son diabasas de la Formación Barroso.

3.2.3.4 Unidad Filos de tope irregular y flancos de inclinación fuerte (VBO – Ftj)

Se encuentra entre la cañada Boquerón, quebradas San Julián y Jeringas y una quebrada sin nombre. Ubicada entre las cotas 325 y 1.500 msnm, se caracteriza por presentar dos filos de flancos de longitud media, entre 900 y 2.000 m, con cima estrecha y superficie irregular, con inclinación fuerte entre 45 a 60°; la incisión es moderada y los drenajes desarrollan valles en forma de “V” abierta. En la parte baja de los flancos hacia el Río Cauca, la pendiente se suaviza y hay presencia de diferentes depósitos de flujo.

La apariencia de la unidad es de un filo continuo que ha sido cortado por donde ha labrado su cauce la intersección de las quebradas San Julián y Jeringas. Las rocas que afloran en el área son diabasas de la Formación Barroso. Cicatrices de pequeños movimientos en masa están presentes en la parte baja (hacia el Río Cauca) de la unidad y una cárcava mediana se localiza en el nacimiento de uno de los afluentes de la quebrada Jeringa.

3.2.3.5 Unidad Vertiente de superficie convexa (VBO – Vsc)

Ubicada en la zona comprendida por las quebradas San Julián y Jeringa, entre las cotas 600 y 2.500 msnm. La longitud de los flancos varía de 900 a 1.800 m, y las pendientes de 45 a 60°; en la parte más alta de la vertiente hay un filo de tope estrecho y subredondeado, y desarrolla flancos largos y de superficie convexa; las quebradas San Julián y Jeringas bordean la unidad hasta intersectarse, dando una apariencia especial al sector en forma de U. Los drenajes tienen incisión moderada y conforman valles de sección transversal en forma de “V” abierta. Las rocas presentes son diabasas de la Formación Barroso. Los procesos erosivos están concentrados en la parte baja de la unidad y se representan en una amplia zona de erosión, con presencia de pequeños desgarres.



3.2.3.6 Unidad Vertientes en la cuenca de la quebrada Las Cuatro (VBO – Vic)

Esta unidad se localiza en la cuenca de la quebrada Las Cuatro. Está caracterizada por vertientes largas, planas e irregulares localizadas entre los 400 y 2.000 msnm, cuya longitud varía entre 1.000 y 1.500 m, y la pendiente entre 45 a 60°. Presenta un incipiente desarrollo de filos, incisión baja de los drenajes y conformación de secciones transversales en forma de “V” abierta. Las rocas que afloran en esta unidad son diabasas de la Formación Barroso. Los procesos erosivos identificados son cicatrices de antiguos movimientos en masa, zonas de erosión con concentración de surcos y algunas cárcavas de tamaño moderado. CORANTIOQUIA² cataloga esta unidad como un área con procesos de degradación severos.

3.2.3.7 Unidad Vertientes de longitud media (VBO – VIm)

Ubicada entre la quebrada El Violín y la divisoria de aguas de la quebrada Las Cuatro. Se localiza entre los 375 y 1.500 msnm, con longitud entre 1.500 y 2.200 m y pendiente entre 45 a 60°. Son vertientes largas, planas con un incipiente desarrollo de filos, la incisión es baja y los drenajes desarrollan valles en forma “V” de abierta. Las rocas que afloran son diabasas de la Formación Barroso, muy afectadas por procesos erosivos avanzados.

3.2.3.8 Unidad Vertiente de superficie irregular (VBO – Vsi)

Se encuentra entre la quebrada La Clara y la divisoria de aguas de las quebradas Guásimo, caño Rosa y caño Guida, entre las cotas 375 y 1.300 msnm. Esta unidad es definida por el megadeslizamiento del Guásimo, con un escarpe caracterizado por la fuerte pendiente (45 a 60°), la superficie irregular y el desarrollo de drenaje subdendrítico.

Este sector es seguido por la subunidad correspondiente al área de depositación de los materiales del megadeslizamiento, consistente en una superficie irregular y ondulada, de pendiente suave entre 10 a 20° y longitud aproximada de 2.000 m, que presenta diferentes depósitos de flujos en su interior; la incisión de los drenajes es fuerte, desarrollando valles en forma de “V” cerrada. Esta unidad está desarrollada sobre depósitos de flujos y diabasas de la Formación Barroso. Cárcavas en los drenajes del sector de depositación del megadeslizamiento son comunes, al igual que cicatrices de movimientos en masa medianos y pequeños. Según CORANTIOQUIA (2004), los procesos de degradación son severos.

3.2.3.9 Unidad Vertiente de filos ramificados con flancos de fuerte inclinación (VBO – Vfr)

Corresponde a una franja ubicada entre las quebradas La Clara y Aguada. Se encuentra entre los 425 y 2.100 msnm y se caracteriza por presentar topos agudos con ramificaciones, los flancos son planos con 45 a 60° de inclinación, y la longitud es de 800

² Caracterización y cuantificación de las áreas degradadas de la territorial Hévexicos. CORANTIOQUIA, Medellín, 2004



a 2.000 m. La incisión sobre los flancos es baja, conformando valles de sección transversal en forma de "V" cerrada. Esta unidad se desarrolla sobre diabasas de la Formación Barroso y el Batolito de Sabanalarga. Se presentan cicatrices de deslizamientos medianos y pequeños, desgarres, y zonas de erosión con surcos y cárcavas. Un gran porcentaje de la unidad es área degradada severa y las vaguadas de las quebradas son áreas no degradadas (CORANTIOQUIA, 2004).

3.2.3.10 Unidad Filo continuo de flancos planos (VBO – Ffp)

Se ubica entre las quebradas La Aguada, Manuela y Tunala. Se localiza entre los 425 y 1.500 msnm y se destaca un filo continuo y alargado, con cambio brusco en su dirección, en el sector sur es NW y al norte NE, con flancos planos, de longitudes entre 600 y 1.200 m y pendientes entre 45 a 60°. La incisión es moderada y los drenajes desarrollan valles en "V" estrecha. En la ladera Este del filo con dirección NE, hay mayor desarrollo de fillos con flancos cortos, topes estrechos y agudos que la ladera oeste donde la erosión es mayor. Las rocas presentes en esta unidad pertenecen al Batolito de Sabanalarga. Los procesos erosivos en toda la unidad están representados por desgarres, cárcavas y cicatrices de movimientos en masa medianos. La unidad tiene procesos de degradación severos (CORANTIOQUIA, 2004).

3.2.3.11 Unidad Vertiente con fillos planos y cortos (VBO – Vfpc)

Ubicada entre el río Tonusco, 1,5 km al Este de Santa Fe de Antioquia y la quebrada Morena. Se localiza entre las cotas 425 y 1.500 msnm, y se caracteriza por los fillos de tope agudo y flancos planos, con 30 a 35° de inclinación y 500 a 800 m de longitud. La incisión sobre los flancos es moderada y desarrollan valles de sección transversal en forma de "V" cerrada. Las rocas que afloran en esta unidad pertenecen al Batolito de Sabanalarga. La unidad presenta procesos erosivos muy avanzados especialmente en la parte final de los fillos. Según CORANTIOQUIA (2004), los procesos de degradación en la unidad son severos.

3.2.3.12 Unidad Fillos con flancos convexos de longitud corta (VBO – Ffc)

Se encuentra desde el río Tonusco hacia el sur. Se caracteriza por presentar fillos con topes subredondeados medianamente amplios, con flancos cortos (300 a 800 m de longitud) y convexos, de 30 a 45° de inclinación. El grado de incisión sobre los flancos es de moderado a fuerte y conforma valles de sección transversal en forma de "V" cerrada. Las rocas que afloran en esta unidad son diabasas de la Formación Barroso y el Batolito de Sabanalarga. Se presentan deslizamientos pequeños y medianos, y algunos desgarres. La unidad en general es un área degradada severa y en las vaguadas de las quebradas no degradada (CORANTIOQUIA, 2004).

3.2.4 Macrounidad vertientes bajas margen Este (VBE)

3.2.4.1 Unidad Vertiente con fillos ramificados (VBE – Vfr)

Ubicada entre la quebrada El Carbunco y la quebrada Remartín, y al Este entre la quebrada El Hurón y la Cañada el Derecho. Corresponde a un sistema de fillos localizados entre los 300 y 1.050 msnm sin dirección definida, con tope estrecho, corto, subredondeado y no continuos por la presencia de silletas. Los flancos tienen una longitud corta (700 y 900 m), inclinación moderada entre 30 y 45° y grado de incisión moderado; tienen una superficie plana y rugosa. Las secciones transversales de los drenajes desarrollan valles en forma de “V” semiabierta. Esta área está conformada por diabasas, esquistos y gabros. La unidad se caracteriza por presentar gran cantidad de procesos erosivos tipo desgarrar y movimientos en masa, que en algunos casos, presenta su depósito asociado.

3.2.4.2 Unidad Vertiente de inclinación baja (VBE – Vib)

Ubicada entre la quebrada Remartín y 3 Km al sur del casco urbano del municipio de Sabanalarga. Es una faja alargada de dirección NS, que se encuentra localizada entre las cotas 700 y 1.000 msnm, y se caracteriza por ser una superficie plana a ondulada, con una inclinación entre 30 y 45°, y amplitud que varía entre 300 y 800 m. El grado de incisión de los drenajes es bajo y está conformada por diferentes depósitos no consolidados y rocas sedimentarias Terciarias. Según CORANTIOQUIA (2004), es un área degradada moderada.

3.2.4.3 Unidad Vertiente con desarrollo de fillos redondeados (VBE – Vfr)

Se localiza entre las quebradas El Carbunco y Membrillal. Es un conjunto de fillos que se encuentran entre 325 y 1.150 msnm, con pendientes moderadas entre 30 y 45°; presentan cimas redondeadas y amplias, orientadas N-S, con desarrollo de flancos de corta longitud (700 y 1.000 m) y superficies irregulares, cóncavas y con una alta densidad de drenajes de incisión baja; entre los fillos, los drenajes tienen una incisión fuerte y desarrollan valles en forma de “V” cerrada. Es común encontrar en los fillos más largos, silletas y desarrollo de altos. Las rocas que afloran en esta unidad son diabasas de la Formación Barroso. Los procesos erosivos son importantes y es común encontrar desgarrar y cicatrices de movimientos en masa activos e inactivos, principalmente ubicados en la parte alta de los nacimientos de las quebradas.

3.2.4.4 Unidad Vertiente con fillos de flancos cortos (VBE – Vffc)

Esta unidad se localiza entre las quebradas Membrillal y Juan García. Es una faja alargada, ubicada entre las cotas 350 y 1.150 msnm, que se caracteriza por el desarrollo de fillos con topes estrechos, subredondeados, con flancos planos, de inclinación entre 30 y 40° y 400 a 800 m de longitud. La incisión es moderada, conformando valles de sección transversal en forma de “V” abierta. Las rocas que allí se presentan pertenecen al Batolito de Sabanalarga. En la unidad hay gran cantidad de procesos erosivos, representados por cicatrices de movimientos en masa activos e inactivos, medianos y pequeños, y

desgarres. CORANTIOQUIA (2004) propone para esta unidad diferentes grados de degradación (severo, moderado y no degradado).

3.2.4.5 Unidad Vertiente ondulada de depósitos (VBE – Vod)

Se encuentra en la parte baja de la vertiente, entre las quebradas La Honda y “Torcida”. Es una franja alargada y estrecha, localizada entre 350 y 550 msnm; en la parte alta se encuentra un conjunto de depósitos de flujos y terrazas en diferentes posiciones topográficas, que dan una forma ondulada de pendiente baja entre 10 y 20°, seguida por un escarpe que en algunos tramos llega directamente al río y en otros es limitado por las terrazas actuales del Río Cauca; los drenajes principales tienen un alto grado de incisión y han desarrollado valles en forma de “V” estrecha. La unidad está desarrollada en depósitos. Cicatrices de movimientos en masa antiguos y recientes, son frecuentes en las márgenes de las principales quebradas que atraviesan la unidad. Es un área con un proceso de degradación moderado (CORANTIOQUIA, 2004).

3.2.4.6 Unidad Vertiente con filos cortos y planos (VBE – Vfcp)

Localizada entre la quebrada Seca (Municipio de Olaya) y la quebrada Juan García. Esta vertiente se ubica entre las cotas 450 y 1000 msnm, y está caracterizada por desarrollar filos con topes agudos, subredondeados y discontinuos debido a la presencia de silletas, con flancos planos, cortos (300 a 600 m de longitud) e inclinación de 30 a 45°. La incisión es baja y los drenajes conforman valles de sección transversal en forma de “V” abierta. Las rocas de esta unidad son diabasas, anfíbolitas y rocas sedimentarias terciarias. La unidad en general es un área con procesos de degradación severos y localmente muy severos (CORANTIOQUIA, 2004).

3.2.5 Macrounidad vertiente media margen Este (VME)

3.2.5.1 Unidad Vertiente con filos largos (VME – Vfl)

Se encuentra localizada entre la cañada El Derecho y la quebrada Niquia. Corresponde a un sistema de filos alargados, ubicados entre 600 y 240 msnm, con tope moderadamente estrecho y subredondeado; los flancos son planos a ligeramente convexos, con longitudes entre 900 y 1.700 m y pendiente entre 40 y 60°; la incisión es baja y desarrolla valles con sección transversal en forma de “V” abierta. La unidad está modelada sobre rocas del Batolito de Sabanalarga. Los procesos erosivos son cicatrices de movimientos en masa y gran cantidad de desgarres.

3.2.5.2 Unidad Vertientes con filos largos en dirección EW (VME – Vflew)

Se localiza entre las quebradas Nuarque y Seca, y una franja de depósitos adyacente al Río Cauca. Ubicada entre las cotas 525 y 1.150 msnm, corresponde a una vertiente asimétrica cuya ladera Este tiene longitudes entre 400 y 600 m y la ladera Oeste tiene una longitud entre 800 y 1.000 m, desarrollando filos largos, de tope moderadamente estrecho, con inclinación entre 40 a 45° y flancos cortos; los drenajes tienen incisión moderada, con valles de sección transversal en forma de “V” semiabierta. En esta unidad

se encuentran anfibolitas. CORANTIOQUIA (2004) clasifica la unidad como un área no degradada y localmente tiene procesos de degradación moderados.

3.2.5.3 Unidad Vertiente de fuerte inclinación (VME – Vfi)

Ubicada desde 1 Km al norte del casco urbano de Sopetrán hasta la quebrada Juan García. Localizada entre las cotas 1.200 y 2.100 msnm, se caracteriza por presentar una forma general plana con inclinación entre 20 a 35° y longitud que varía entre 1.400 y 2.300 m. La incisión es moderada, generando un sistema de filos con topes moderadamente estrechos, subredondeados y flancos planos y cortos; los valles desarrollados por los drenajes tienen sección transversal en forma de “V” abierta. Las rocas de esta unidad son esquistos. El principal proceso erosivo de la unidad son desgarres medianos. CORANTIOQUIA (2004) la clasifica como un área con procesos de degradación moderados y localmente no degradada.

3.2.6 Macrounidad Fondo (F)

3.2.6.1 Unidad Superficie modelada en depósitos (F – Sd)

Se presenta en dos franjas en ambos márgenes del Río Cauca; en la margen Oeste se ubica desde la quebrada Contadora hasta 3 km al norte, y en la margen Este se ubica entre la Cañada La Cueva y la quebrada Yunada. Está conformada por superficies planas a onduladas, modeladas en depósitos, y caracterizadas por presentar longitudes entre 600 y 900 m en promedio, y una inclinación de 15 a 30°. La incisión de los drenajes es baja y los procesos erosivos son fuertes, dejando descubiertas amplias áreas de suelo desnudas. CORANTIOQUIA (2004), clasifica la unidad como un área degradada severa y localmente muy severa.

3.2.6.2 Unidad Colinas medias (F – Cm)

Ubicada en la margen Este del Río Cauca, desde 1 km al Este del casco urbano de Santa Fe de Antioquia, hasta la desembocadura de la quebrada La Mariscal. Se localiza entre 450 y 1.000 msnm y está conformada por un sistema de colinas con topes al mismo nivel; presenta topes agudos y flancos planos e irregulares, cortos, con longitudes entre 200 y 500 m y pendiente entre 5 y 10°; la incisión es moderada y desarrolla valles con sección transversal en forma de “V” abierta. Las rocas que se presentan en esta unidad son anfibolitas. En general toda la unidad presenta un avanzado proceso de erosión y hay presencia de pequeños desgarres. La unidad en general es un área con procesos de degradación severos y localmente muy severos (CORANTIOQUIA, 2004).

3.2.6.3 Unidad Colinas bajas (F – Cb)

Se encuentra en la margen este del Río Cauca, entre quebrada Arriba, el casco urbano de Santa Fe de Antioquia y quebrada Las Flores. Es un conjunto de colinas localizadas entre las cotas 450 y 650 msnm, con topes estrechos, irregulares y subredondeados; con flancos cortos (longitud promedio de 200 m), planos a convexos, inclinación entre 15 a 30° e incisión baja, conformando valles de sección transversal en forma de “V” abierta. La

unidad está desarrollada sobre rocas sedimentarias Terciarias. Los procesos erosivos son muy intensos en toda la unidad.

3.2.6.4 Unidad Colina media de flancos convexos (F – Cmfc)

Localizada en la margen Este del Río Cauca, desde la quebrada Seca (municipio de Sopetrán) hasta 3 km al norte. Se ubica entre las cotas 500 y 800 msnm, y se caracteriza por presentar un tope amplio, irregular y redondeado, con flancos convexos, entre 200 y 400 m de longitud e inclinación de 30 y 45°. La incisión es baja y desarrolla valles con sección transversal en forma de “V” abierta. Esta unidad está en rocas de dioritas y esquistos y presenta procesos de degradación severos (CORANTIOQUIA, 2004).

3.2.6.5 Unidad Llanura aluvial del Río Cauca (F – Lla)

Ubicada en ambas márgenes del Río Cauca, en el sector comprendido entre la desembocadura del río Tonusco hasta aproximadamente la desembocadura de la quebrada Juan García. Está conformada por fajas alargadas en el sentido del río, con una amplitud variable, dado el carácter trezado que el río tiene en este tramo, cambiando su cauce constantemente; en la llanura aluvial se encuentran sedimentos finos como arcillas, limos, arenas y gravas finas, y en algunas partes se forman barras centrales y laterales constituidas de gravas gruesas. Esta unidad no presenta procesos erosivos importantes.

3.2.6.6 Unidad Terrazas aluviales (F – Ta)

Se presentan principalmente en el sector comprendido entre la desembocadura de la quebrada La Juanes y Juan García; sin embargo, en el recorrido del río hasta el sitio de presa, se encuentran terrazas localizadas en estrechas franjas en las márgenes del río. Esta unidad está conformada por fajas alargadas en el sentido del río, caracterizadas por su forma plana en el tope, subhorizontales con una extensión que varía entre 2.500 y 3.000 m y tienen aproximadamente 1.000 m de ancho. Los materiales que conforman esta unidad son gravas y arenas de depósitos aluviales Cuaternarios. Algunos de las principales quebradas tributarias del Río Cauca desarrollan importantes terrazas en sus cauces, que son planas en su tope y subhorizontales a horizontales, estrechas y se encuentran en diferentes posiciones topográficas; los principales drenajes tributarios que desarrollan las terrazas son el río Tonusco, las quebradas Juan García, La Aguada, Niquia, intersección de las quebradas San Julián y Jeringas, Peque, Sardinias, Pena y el río San Andrés.

3.2.6.7 Unidad Abanicos aluviales (F – Aa)

Se encuentran localizados en los tramos finales de algunas corrientes que arrastran gran cantidad de sedimentos y que son depositados por la pérdida de energía de las quebradas al llegar a la desembocadura en el río, generando una silueta cónica o en forma de abanico que tienen una pendiente suave. Las quebradas que presentan abanicos aluviales son: Tiembla, Las Flores y Contadora, La Manuela, Barbuda, La Seca

(municipio de Liborina), Juan García, La Aguada, Tesorera, Caño Rosa, Las Cuatro, Niquia, El Brazuelo, Peque, San Andrés, Burundá y Maratón.

3.2.6.8 Unidad Escarpe al borde del Río Cauca (Ebr)

Franja no continúa, estrecha y alargada en ambas márgenes del Río Cauca, que en algunos sectores es común encontrar que se adentra en los principales afluentes del río. Los dos tramos del río donde está bien definido el cañón son: desde la quebrada Sardinas hasta la quebrada Pescado y entre la quebrada Niquia y La Honda. Se caracteriza por presentar pendientes entre 40 y 60° y longitudes entre 400 y 900 m. Las rocas que conforman el cañón son gabros y esquistos entre las quebradas Sardinas y Pescado, y diabasas y depósitos de flujo entre las quebradas Honda y Niquia. Cicatrices de pequeños deslizamientos son comunes y depósitos de flujos se encuentran dentro del escarpe.

3.2.7 Grandes movimientos en masa

Un movimiento en masa es el desplazamiento en masa de rocas y material meteorizado por una superficie pendiente abajo, originada por diferentes mecanismos como la gravedad, el aire o el agua. Estos movimientos son comunes en áreas de topografía escarpada, como es el caso del cañón del Río Cauca, entre las Cordilleras Central y Occidental, donde depósitos de movimientos en masa cubren entre el 30 y 50% de la superficie a lo largo del Río Cauca (Woodward-Clyde Consultants).

Desde un punto de vista geomorfológico los movimientos en masa se pueden clasificar por volumen, de acuerdo a los siguiente rangos:

- Pequeños: hasta 100.000 m³
- Medianos: 100.000 – 1.000.000 m³
- Grandes: 1.000.000 m³ – 1 Km³
- Megadeslizamientos: > 1 Km³

La identificación de grandes movimientos en masa (volúmenes entre 10⁸ m³ y 1 km³) dentro del área de interés, como objetivo relevante de este estudio, fueron rastreados a partir de la fotointerpretación y confrontados con los reportados por Woodward-Clyde Consultants.

A continuación se describen las observaciones realizadas para cada uno de los grandes movimientos en masa y su ubicación:

3.2.7.1 Deslizamiento del Guásimo.

El más grande deslizamiento en el cañón del Río Cauca, se encuentra localizado cerca de Sabanalarga. Sus dimensiones, según Woodward-Clyde Consultants, son 3 km de longitud, 1.5 km de ancho, 0.5 km de profundidad y se le estima un volumen de 1 a 2 km³. Se observa una superficie ondulada con avanzados procesos erosivos al interior, tales



como cárcavas y cicatrices de movimientos en masa menores; también se aprecia el escarpe de donde posiblemente se desprendió el material y la corona del deslizamiento. En la actualidad, debido a la denudación del Río Cauca, presentaría dimensiones menores que lo sacarían de la clasificación de megadeslizamiento³.

3.2.7.2 Deslizamiento El Llano.

Ubicado 10 km aguas abajo del deslizamiento del Guásimo; sus dimensiones son 1 km de longitud, 0,5 km de ancho, 250 m de profundidad y se le estima un volumen de aproximadamente 0,1 km³ (Woodward-Clyde Consultants). Actualmente la superficie está profundamente incisada y en parte erodada por el Río Cauca, y no se observan rasgos relacionados al evento.

3.2.7.3 Deslizamiento de Playa Negra.

Localizado 7 km aguas arriba del sitio de presa, en cercanías del Puente Pescadero; sus dimensiones son 1,5 km de longitud, 1 km de ancho, y se le estima un volumen aproximado de 10⁸ m³; en las fotos aéreas se observa una superficie rugosa e inclinada, donde no es muy clara la corona del deslizamiento ni la dirección del movimiento. Sobre la margen oriental, Woodward-Clyde Consultants cartografía otros dos movimientos en masa, los cuales no son muy claros en la fotografías, pero se debe prestar atención a la zona, específicamente por donde está trazada la carretera actual entre San Andrés de Cuerquia Ituango, pues una superficie irregular sobresale. La superficie irregular que se aprecia en las fotografías aéreas puede ser indicio de inestabilidad de la ladera.

3.2.7.4 Deslizamientos del río San Andrés parte baja.

Es un movimiento complejo de 3 km de largo y 700 m ancho, que incluye dos grandes movimientos y algunos pequeños que se han unido (Woodward-Clyde Consultants). La expresión geomorfológica del deslizamiento Capa Rosa, que pertenece a este movimiento complejo, es la corona y una superficie irregular en cuyo interior se presentan pequeños movimientos en masa y desgarres.

3.2.7.5 Deslizamientos cerca del sitio de presa Ituango.

Hay varios pequeños movimientos en masa cerca del sitio de presa:

- **Deslizamiento Vámonos.** Localizado sobre la margen izquierda del río Cauca, en el eje de la presa de Ituango; sus dimensiones son 100 m de ancho, 200 a 300 m de longitud, profundidad 50 m y volumen de 104 m³ a 105 m³; la base del deslizamiento es

³ Mapa Geomorfológico, de Amenazas y Áreas Degradadas de la Jurisdicción de CORANTIOQUIA, 2001.

ORTIZ, E. A., PEREZ, Y. 1998. Caracterización Geológica y Geomorfológica del Megadeslizamiento del Guásimo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.



expuesta, 70 a 100 m arriba del río Cauca (Woodward-Clyde Consultants). No se encontraron evidencias fotogeológicas de este movimiento.

- **Deslizamiento Capitán.** Está sobre la margen derecha del río Cauca, 1 ó 2 km aguas abajo del sitio de presa; tiene 1,5 km de longitud, 600 m de ancho, 30 a 50 m de profundidad, y un volumen aproximado de 106 m³ (Woodward-Clyde Consultants). Sus rasgos morfológicos son la corona de deslizamiento y el depósito asociado.
- **Sistema de deslizamientos El Palmar.** Ubicado sobre la margen izquierda del río Cauca, entre las quebradas Bolivia y Burundá. Es un deslizamiento superficial que tiene entre 10 y 20 m de profundidad, y su base está sobre el nivel del río Cauca. En las fotografías aéreas se observa un área con forma similar al deslizamiento identificado por Woodward-Clyde; es una superficie convexa e irregular cuya base está en el escarpe que forma el encajonamiento del Río Cauca.
- **Sistema de deslizamientos Tenche.** Localizado sobre la margen derecha del río Cauca, 1 km aguas arriba de sitio de presa; el espesor del deslizamiento probablemente no es mayor de 20 ó 30 m (Woodward-Clyde Consultants). La corona del deslizamiento, una superficie irregular y de gran pendiente, con pequeños desgarres al interior son la evidencias morfológicas de este deslizamiento.

3.2.7.6 Otros deslizamientos identificados:

Deslizamientos en la Quebrada Sardinias. En cercanías de la desembocadura de la quebrada Sardinias en el río Cauca (aguas arriba del sitio de presa), se identificaron cicatrices de movimientos en masa con sus respectivos depósitos asociados, los cuales están posiblemente relacionados a la traza de la falla Santa Rita nombrada por Ingeominas.

3.2.8 Posibles expresiones Neotectónicas

De acuerdo a los estudios de fotointerpretación de detalle de la cuenca del embalse y al conocimiento que se tiene de la zona, recopilado durante diversos proyectos, se puede concluir que existen áreas con probabilidad de encontrar rasgos que evidencien movimientos tectónicos recientes.

La estructura de mayor interés morfotectónico es la falla de Sabanalarga en todo el tramo del estudio. Son muy claros y variados los indicios morfológicos de actividad, que ameritan estudios de mayor detalle. Su expresión está representada por una zona de depresión que divide la vertiente en dos bloques claramente contrastantes, marcando un cambio en la pendiente, donde se presentan una serie de silletas alineadas y algunos depósitos cruzados por la falla. Esta depresión de falla es seguida al oeste por una zona donde se encuentran rasgos como cambios bruscos en las direcciones de los cauces, terrazas y abanicos aluviales cortados por alineamientos fotogeológicos, y contrastes geomorfológicos entre las cimas y la disposición general de la vertiente a modo de lomos de obturación.



Así mismo, aunque con menor expresión que la anterior, la falla que controla la quebrada Sardinas amerita profundizar en su conocimiento. En su zona de influencia se encuentran drenajes muy rectos que tienen asociados fillos paralelos, también hay presencia de facetas triangulares en la margen este del Río Cauca y una serie de posibles peldaños sobre la margen oeste del río.

Las labores de detalle recomendadas incluirían adicionar a los estudios actualmente planteados, etapas de preselección de sitios específicos y recorridos de campo de detalle, a partir de los cuales se definiría la exploración con trincheras y su mapeo. Si dichas etapas dan como resultado la presencia de movimientos neotectónicos, se recomendaría la instrumentación de las estructuras para intentar cuantificar parámetros sismológicos.

3.3 SISMOLOGÍA

3.3.1 Generalidades

En esta sección se describe la evaluación de la amenaza sísmica llevada a cabo para estimar los parámetros sísmicos confiables para diseño de las obras del proyecto, teniendo como objetivo fundamental la estimación de las aceleraciones máximas del terreno y los espectros de respuesta de aceleración, así como de otros parámetros sísmicos adicionales como la duración y los acelerogramas para los diferentes sismos de diseño. De acuerdo con las tendencias modernas de diseño sismorresistente para presas, se definieron varios sismos de diseño, cuyos periodos de retorno dependen de la importancia de la obra de infraestructura, la altura y tipo de material de la presa, el volumen del embalse y la magnitud de los daños económicos y sociales aguas abajo que produciría un desembalse accidental. Los sismos considerados fueron:

- Sismo básico de operación (S.B.O.) con un período de retorno de 200 años, de acuerdo con un análisis probabilístico de efecto conjunto de todas las sismofuentes importantes para el proyecto. Para este evento no se espera ni se acepta ningún daño de tipo estructural o no estructural en las obras del proyecto.
- Sismo máximo probable (S.M.P.) con 500 años de período de retorno, obtenido de análisis probabilísticos, para el cual se aceptan daños no estructurales y algunos estructurales menores que puedan ser fácilmente reparados.
- Sismo máximo considerado (S.M.C.) que representa el sismo máximo para el cual se exige el cumplimiento de requerimientos estructurales y de estabilidad para todas las obras del proyecto. De acuerdo con las recomendaciones del ICOLD, la aceleración para el S.M.C. debe tener un período de retorno entre 3.000 y 10.000 años, obtenida a partir de análisis probabilísticos. Para este evento se admiten daños no estructurales y estructurales importantes, pero que en ningún momento amenacen la estabilidad global de la presa ni exista la posibilidad de un desembalse. Dada la altura de la presa, el gran volumen de agua a embalsar, y el gran número de poblaciones y habitantes aguas abajo del proyecto, este proyecto se puede calificar como de factor de riesgo extremo, de acuerdo con la clasificación de la United States Society of Dams USSD, y por lo tanto se recomienda para el S.M.C. un período de retorno de 10.000 años. No obstante, el nivel de riesgo a aceptar es una decisión del propietario y por lo tanto esta



decisión deberá ser tomada por la Hidroeléctrica.

3.3.2 Geología sísmica

3.3.2.1 Generalidades

El proyecto hidroeléctrico Ituango se encuentra localizado en un marco tectónico complejo, rodeado de varios sistemas de fallas de importancia regional; al oriente se presenta el sistema de falla Santa Rita Oeste y Este que cruzan el cañón del río Cauca aguas abajo de las obras del proyecto, al occidente los sistemas de fallas Cauca, Romeral, Sabanalarga, Ituango y Sardinias; al noreste el sistema Espíritu Santo y un poco más alejado, al noroccidente, las fallas Murrí - Mutatá. La relativa cercanía de estos sistemas de fallas hace necesaria una serie de investigaciones geológicas y neotectónicas que permitan definir de manera confiable los sectores de las fallas que presentan actividad reciente.

Los estudios de geología sísmica se realizaron para identificar la presencia de fallas activas o potencialmente activas en la zona cercana al proyecto. La actividad de una falla se clasifica con base en el desplazamiento reciente ocurrido en ella. La geología sísmica estudia la expresión superficial, el tipo de la falla, el desplazamiento causado por un evento sísmico, la tasa de desplazamiento y la longitud de ruptura de la falla en un evento.

Una vez recopilada y analizada la información disponible, se realizó una interpretación de fotografías aéreas a una escala promedio 1:10.000, que cubren las zonas estudiadas. Con la fotointerpretación se identificaron y determinaron con mayor precisión las trazas de las fallas y rasgos geomorfológicos, posiblemente relacionados con actividad neotectónica, identificando algunos sitios que presentan algún interés para los propósitos de este estudio.

3.3.2.2 Marco Tectónico General

El Proyecto Hidroeléctrico Ituango se encuentra ubicado en la parte septentrional del Bloque Andino, que se localiza en la esquina noroccidental de Suramérica, en un ambiente tectónico complejo, que es producto de la convergencia de cuatro placas tectónicas: Sur América, Nazca, Caribe y la llamada microplaca Panamá. Al extremo noroccidental de la placa Suramérica en Colombia se le ha denominado Bloque Andino y corresponde al bloque formado por la acreción del Escudo de Guyana, Cratón Amazónico, con el terreno Andaquí, Macizo de Garzón y la serranía de La Macarena, el cual posteriormente fue acrecentado por los terrenos Chibcha, Tahamí, Calima y Cuna⁴.

En general, los límites entre estas placas están definidos, exceptuando los de la placa Caribe con el Bloque Andino que son hoy día objeto de discusión y estudio. Se conoce que la placa Nazca se desplaza de oeste a este con una velocidad de 60 mm/año, mientras que Suramérica lo hace de este a suroeste a una velocidad relativa de

⁴ TOUSSAINT, J.F. "Evolución Geológica de Colombia. 1. Precámbrico - Paleozoico". Medellín. Universidad Nacional, 1993

10 mm/año a 20 mm/año⁵. Por su parte, la placa Caribe se desplaza en general de oeste a noreste con una componente norte importante⁶, siendo estas direcciones variables en sus bordes, mientras que la microplaca Panamá se mueve de forma paralela a la placa Caribe, pero un poco más rápido que ésta. Tales movimientos relativos convergen sobre el Bloque Andino, el cual actúa como amortiguador y liberador de estos esfuerzos, ya sean de distensión, compresión o cortantes. Estos esfuerzos también se liberan en los bordes de las placas en las zonas de convergencia, de forma que entre las placas Nazca y Suramérica se generan esfuerzos de compresión dando origen a la configuración de los Andes colombianos.

Aunque la configuración actual de los Andes colombianos se definió prácticamente durante el Mioceno, los bordes de las placas todavía acumulan y liberan dichos esfuerzos a lo largo de grandes fallas como los sistemas de dirección norte-sur y noreste-sureste, que han sido verificados por estudios de microsismicidad para el Cauca Medio y diferentes investigaciones geológicas del Cuaternario.

Las diferentes velocidades y direcciones relativas con que se mueven las placas y los trozos de litosfera producen varios efectos, entre los cuales se destacan la generación de sismos intraplaca y sismos interplaca; la respuesta a estos esfuerzos generalmente son fracturas, que en la corteza se conocen como fallas geológicas. En el Bloque Andino se han generado grandes fracturas, algunas de ellas de varios centenares de kilómetros de longitud que liberan sismos superficiales. Algunas de estas fallas se localizan cerca al Proyecto y tienen actividad sísmica variada; las más sobresalientes hacen parte de los sistemas Espíritu Santo, Romeral, Cauca, Palestina y el grupo que incluye las fallas Murri, Murindó y Mutatá, estas últimas en la cordillera Occidental.

En Colombia, las fuentes sismogénicas asociadas directamente con la subducción, son otra fuente importante de sismicidad superficial hacia el Océano Pacífico y de sismos profundos hacia el centro del país. Entre estas fuentes se destacan las del viejo Caldas, Bucaramanga y la subducción local bajo la zona del proyecto, las cuales corresponden a la llamada zona de Benioff-Wadati, y las fuentes Darién y Tumaco que corresponden al contrato entre las placas, conocido en la literatura como el megathrust.

Las diferentes sismofuentes del país han producido terremotos de importancia, tanto por el número de víctimas como por las pérdidas materiales asociadas con los daños. Para citar casos recientes: el sismo de 1979 en Tumaco que causó daños en la ciudad de Medellín; el sismo de Murindó (17 y 18 octubre 1992) originado en el grupo de fallas Murindó; el evento del 9 de febrero de 1995 que ocasionó daños severos de varias edificaciones en la ciudad de Pereira y tuvo su origen en la sismofuente del Viejo Caldas; los sismos superficiales ocurridos el 6 y 8 de marzo de 1998 asociados a la falla Salinas que alcanzaron aceleraciones máximas de hasta 100 gales en un sector de la ciudad de Medellín. Por último el sismo del 25 de enero de 1999 que afectó al Eje Cafetero y causó extensivos daños a las ciudades de Armenia, La Tebaida, Montenegro, Pijao y Calarcá, y

⁵ MORA, H. "Geodesia Satelital en el Noroccidente Colombiano. Resultado Proyecto Casa 1991 a 1996". En Seminario de Sismotectónica del Noroccidente Colombiano. Medellín. 1997

⁶ CONSORCIO INTEGRAL S.A. - SEDIC S.A. "Proyecto Hidroeléctrico Nechí - Informe final de evaluación de la amenaza sísmica". Preparado para las Empresas Públicas de Medellín. 1998



causó graves daños en las ciudades de Quimbaya, Pereira, Dosquebradas y otras poblaciones. De estos eventos el más cercano al proyecto corresponde a los sismos de Murindó y Opogadó de octubre de 1992.

3.3.3 Evaluación de la amenaza sísmica

La metodología desarrollada parte de la recopilación de información tectónica obtenida en otros proyectos, tales como los estudios de factibilidad y diseños definitivos de los proyectos hidroeléctricos San Carlos, Jaguas, Riógrande II, Porce II, Nechí, La Herradura, La Vuelta, Río Frío, Cañafisto, Pescadero-Ituango, Río Piedras, entre otros; esta información permite la actualización permanente del catálogo o registro de fallas existentes en el país. Es importante anotar que el catálogo de fallas contiene información geosísmica de cada falla, incluyendo información sobre su ubicación espacial (longitud, buzamiento, etc.), así como información sismológica (tasa de actividad, longitud de ruptura, parámetro β).

La información sismogénica de cada falla es obtenida a partir del catálogo sísmico, el cual es actualizado y homogenizado, evaluando su grado de cubrimiento temporal (completez) para obtener un catálogo con cubrimiento temporal uniforme de la información.

El catálogo de fallas y el catálogo homogenizado de registros sísmicos permiten obtener una base de datos sismológicos confiables, que permite incluir en los análisis de amenaza sísmica la contribución de la sismicidad de fondo (background seismicity), o incluso para fallas donde no se tienen estudios sismológicos puntuales, inferir parámetros sismogénicos con base en la actividad sísmica regional.

Considerando que la amenaza sísmica no puede asignarse a una fuente sismogénica única, y que no se sabe de cual de ellas puede provenir un sismo destructor, en los análisis efectuados se integra el aporte que en la sismicidad hacen cada una de las fallas, de forma que es necesario realizar consideraciones probabilísticas para considerar este aspecto. La evaluación de la amenaza sísmica se realiza en términos probabilísticas a partir de la formulación de Cornell (1968)⁷ y McGuire (1976)⁸, cuyo desarrollo teórico está fuera del alcance del presente informe. Este proceso probabilístico intrínsecamente permite combinar el aporte realizado por las diferentes clases de sismo-fuentes: cercanas, lejanas profundas y locales.

3.3.3.1 Sismicidad Histórica

La información sobre la sismicidad registrada en Colombia se puede considerar reciente. El primer sismógrafo fue instalado durante la década de 1920 y sólo desde 1957 el Instituto Geofísico de Los Andes instaló y empezó a operar una red que permitió localizar los sismos, pero que presentaba un cubrimiento limitado y muy baja precisión. Desde 1993 está en operación la Red Sismológica Nacional de Colombia (R.S.N.C.) de

⁷ CORNELL A.C. Engineering Seismic Risk Analysis. En: Bulletin of Seismological Society of America. Vol 58 (1968). pp.1583-1606.

⁸ McGUIRE R.C. FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis. US Geological Survey Open-File Report 76-67 (1976).

INGEOMINAS, la cual presenta un cubrimiento aceptable en la parte Andina del país. Esta red en la actualidad registra entre 300 y 400 sismos mensuales con magnitud superior a 2.

El catálogo sísmico que cuenta con registros desde 1656, fue recientemente actualizado por INTEGRAL, con base en la información de la R.S.N.C y de agencias internacionales, fue analizado por parte del Grupo de Sismología de Medellín (G.S.M.) del cual INTEGRAL forma parte, durante los estudios para la Microzonificación Sísmica de Medellín.

Con base en dichas actualizaciones, se estima que hasta la fecha, el principal evento para la población era el del 14 de febrero de 1952, ocurrido a 90 km al occidente, con magnitud $6\frac{3}{4}$ y profundidad de 24 km. Se presume que este sismo fue generado en la zona de Murrí - Mutatá. Los sismos de octubre de 1992 pudieron generar en la zona una intensidad del orden de VII en la escala de Mercalli modificada, de acuerdo con las isosistas publicadas por el Ingeominas. En el recuento de eventos históricos también se detectan algunos de influencia muy localizada y sin reporte, por fuera del área de influencia, por lo que se presume que pueden ser eventos locales de magnitudes medias o bajas, posiblemente en los sistemas de fallas activas presentes en la región. En 1930, durante tres meses continuos, se presentó un enjambre localizado de sismos de magnitudes menores cerca a Frontino, donde se llegaron a sentir aproximadamente siete temblores diarios, causando pánico entre los habitantes.

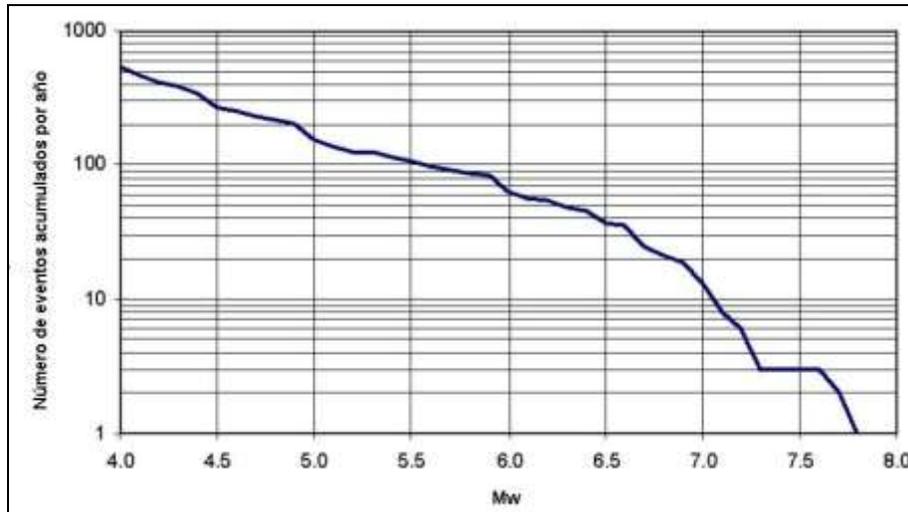
3.3.3.2 Catálogo Sísmico

Para la evaluación de la amenaza sísmica del Proyecto se partió del catálogo de la Red Sismológica Nacional (1993 – 2003) y del catálogo histórico de Colombia (1566 – 1993), el cual fue proporcionado por el Centro de procesamiento de Información Sismológica de la Universidad Nacional. El catálogo se homogenizó a magnitudes Mw equivalentes, a partir de correlaciones con otras magnitudes.

De estos catálogos se eliminaron los registros con Mw menores de 4.0, por considerar que estos sismos no producen daños en las estructuras. Igualmente, se eliminaron las posibles réplicas para evitar el sesgo en las curvas de recurrencia y se realizó un análisis de cubrimiento temporal (completez), mediante la definición de los años a partir de los cuales cada rango de magnitud está completo. El resultado para el caso del catálogo completo se presenta en la Tabla 3.4 y en la Figura 3.1 se muestra la tasa de excedencia de magnitudes del catálogo sísmico de Colombia después de realizar el análisis de cubrimiento.

Tabla 3.4 Cubrimiento del catálogo

Intervalo (Ms)	Inicio del intervalo
> 7	1904
6 – 6.9	1918
5 – 5.9	1941
4 – 4.9	1953

Figura 3.1 Tasa de excedencia de magnitudes del catálogo filtrado

Al localizar los registros del catálogo, se nota que en las zonas de Murindó y el llamado Borde Llanero se presenta un número importante de sismos registrados como superficiales, aunque también es posible establecer pequeñas concentraciones de sismos como en la zona del departamento de Caldas y el occidente de Cundinamarca.

En cuanto a los sismos profundos, se presentan dos claras concentraciones en el nido de Bucaramanga y la zona del Viejo Caldas, hasta la parte sur del departamento de Chocó. Además, se presentan eventos dispersos atribuibles a la zona de subducción general.

3.3.3.3 Zonas sismogénicas

Teniendo en cuenta los errores que presentan en su localización los sismos disponibles en los catálogos sísmicos, en especial en el territorio colombiano, dada la baja densidad de la red instrumental, resulta impreciso tratar de asignarlos a una fuente particular para evaluar las características de sismicidad asociada a cada una de ellas.

Por esta razón, la sismicidad superficial se agrupó en cinco zonas (Subducción pacífico, Murindó, Andina norte, Andina sur y Piedemonte) considerando la actividad sísmica registrada en cada zona. Por su parte, la sismicidad profunda se agrupó en tres zonas principales (Benioff Viejo Caldas, Nido de Bucaramanga y Subducción general). El límite entre sismicidad superficial y profunda se estableció en 33 km, el cual es un valor usado de manera estándar a nivel mundial cuando no se conoce con certeza el límite local de los sismos corticales. Estas zonas se utilizaron para la definición de los parámetros de actividad sísmica de cada una de las fallas asociadas a cada área. De la Figura 3.2 a la Figura 3.5 se muestran las zonas sismogénicas consideradas.

Figura 3.2 Sismicidad y zonas sismogénicas superficiales

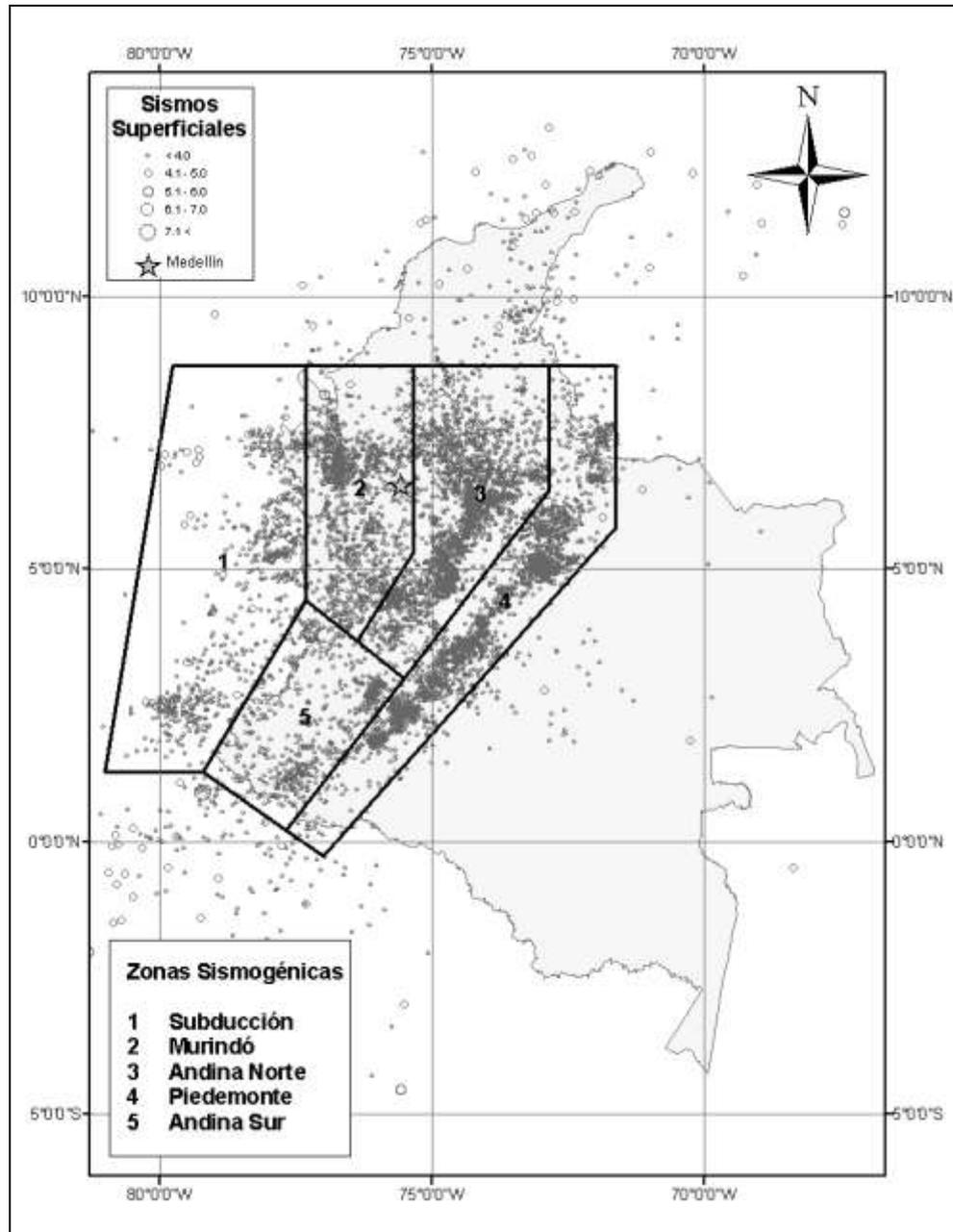


Figura 3.3 Sismicidad y zonas sismogénicas profundas

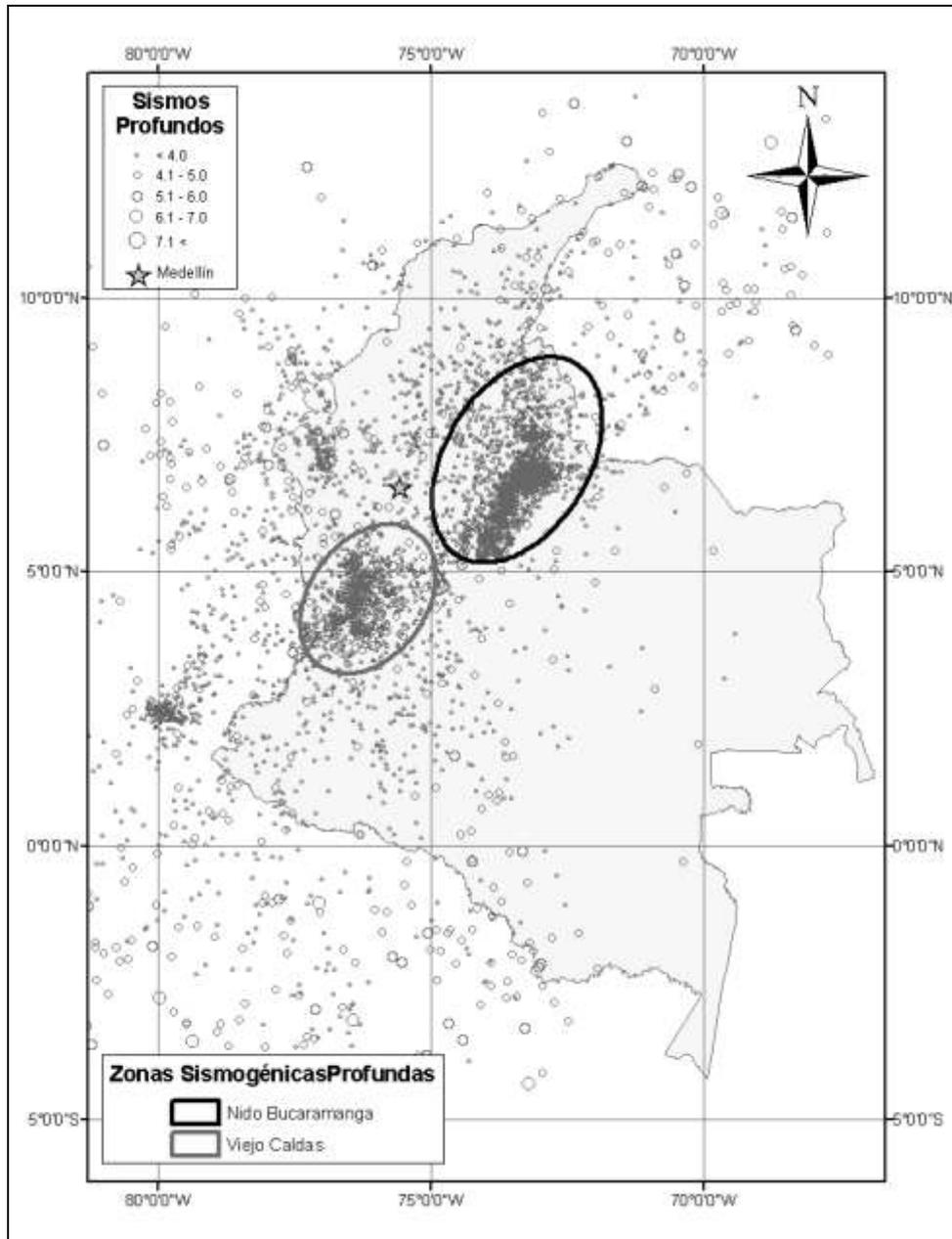


Figura 3.4 Distribución espacial de las fallas superficiales en la zona del Proyecto

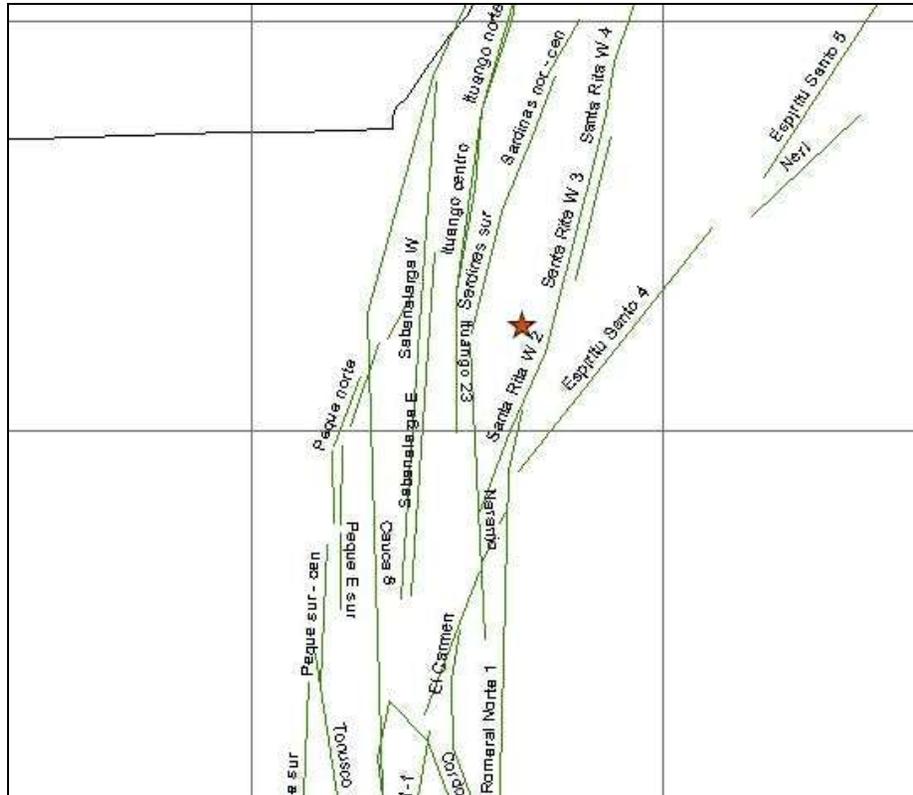
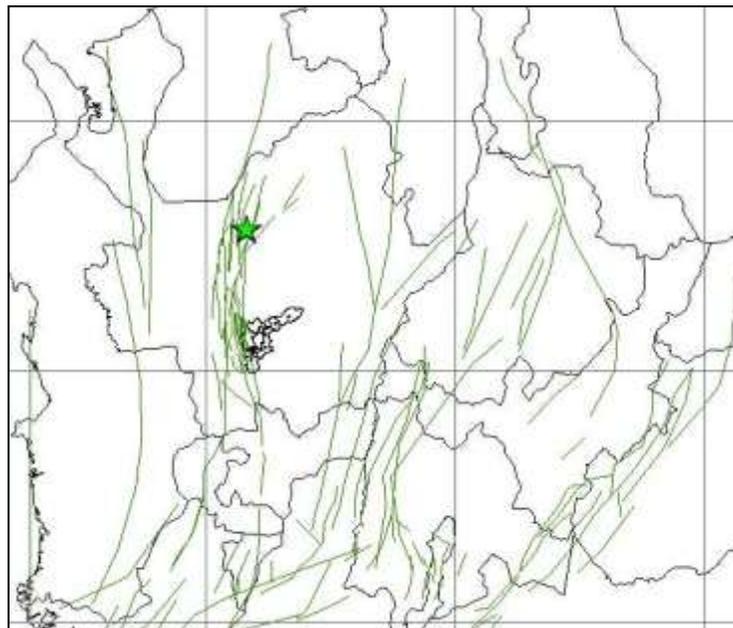


Figura 3.5 Distribución espacial de las fallas superficiales a escala regional



3.3.3.4 Caracterización de sismofuentes

Para caracterizar cada sismofuente se realizó un nuevo análisis estadístico de los datos con base en la metodología propuesta por J. Arboleda y M. Ordaz (1999)⁹, la cual parte de un subcatálogo para cada zona sismogénica, y para cada magnitud última proporciona los valores de los parámetros λ y β . El parámetro λ caracteriza la tasa de actividad de una sismofuente dada en función del número de eventos por año iguales o superiores a una magnitud dada (en este caso 4) y el parámetro β indica la distribución de magnitudes que puede producir la falla. Esta metodología es más confiable que las que se habían utilizado en estudios previos. Por otra parte, la actividad de las sismofuentes también se evaluó con base en el grado de actividad de las fallas obtenida a partir de estudios geológicos realizados por diferentes autores a lo largo y ancho de Colombia. A partir de la estimación del grado de actividad, expresado como el movimiento de la falla en el cuaternario reciente, y utilizando la clasificación mostrada en la Tabla 3.5, se estimó la tasa de desplazamiento o slip-rate de cada falla.

Tabla 3.5. Clasificación de la actividad de las fallas

<i>Grado de actividad</i>	<i>Desplazamiento</i>
Extremadamente alto	Mayor de 1000 mm/año
Muy alto	100-10 mm./año
Alto	10-1 mm./año
Moderado	1-0.1 mm./año
Bajo	0.1-0.01 mm./año
Muy bajo	0.01-0.001 mm./año
Extremadamente bajo	Menor de 0.001

3.3.4 Sismos de diseño

En general, las principales características para identificar los sismos son la aceleración máxima, la duración y el contenido espectral, el cual se puede representar mediante el espectro de respuesta de pseudoaceleración.

3.3.4.1 Aceleración máxima

De acuerdo con los resultados del análisis de amenaza sísmica, los cuales se muestran en la sección anterior, las aceleraciones máximas a nivel de roca y la aceleración espectral para 1.0 segundo, en la zona del proyecto para los tres sismos especificados se presentan en la Tabla 3.6.

Con respecto a la aceleración vertical y dada la cercanía del Proyecto a las sismofuentes que más aportan a la amenaza, es de esperarse componentes verticales comparables con la componente horizontal. Por lo tanto, se recomienda utilizar por lo menos 2/3 de la aceleración horizontal como aceleración vertical.

⁹ ARBOLEDA, Julio; ORDAZ, Mario. Un mejor uso de los datos estadísticos para la estimación de la sismicidad local. En: Revista Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. N° 53. 1999.

Tabla 3.6 Aceleraciones máximas a nivel de roca (PGA) y Aceleración Espectral para 1.0 segundo

Sismo	Período de retorno	Aceleración horizontal máxima (pga)	Aceleración espectral para 1.0 s
S.B.O.	200 años	0,16g	0,14g
S.M.P.	500 años	0,25g	0,19g
	3 000 años	0,51g	0,37g
S.M.C.	5 000 años	0,59g	0,44g
	10 000 años	0,70g	0,52g

3.3.4.2 Duración

La duración es una de las principales características de los sismos. Una duración larga corresponde en general a sismos de magnitud alta, mientras que las duraciones cortas corresponden en la mayoría de los casos a magnitudes bajas o sismos muy cercanos.

Existen algunas correlaciones empíricas entre la duración de un sismo y su magnitud (Donovan, 1973)¹⁰, (Dobry, 1978)¹¹, (Chang y Krinitzsky, 1977)¹². En general, un sismo de larga duración puede contener un número importante de ciclos que sobrepasen cierto valor de aceleración, que puedan ocasionar la degradación de una estructura o del suelo que la soporta; mientras que en un sismo de corta duración, la probabilidad de que se presenten varios ciclos que sobrepasen esa aceleración es menor.

La duración utilizada para los sismos de diseño del proyecto es de 30 segundos.

3.3.4.3 Espectros

A partir del análisis de amenaza sísmica, mediante la aplicación de las ecuaciones de atenuación que proponen un comportamiento diferente para los distintos períodos espectrales, se obtuvieron los Espectros de Amenaza Uniforme (Uniform Hazard Spectra) para los sismos de servicio y de diseño, que son resultado del programa EZFrisk. Cada uno de estos espectros es calculado para un número anual de excedencias, o para un período de retorno, al cual corresponde una aceleración pico.

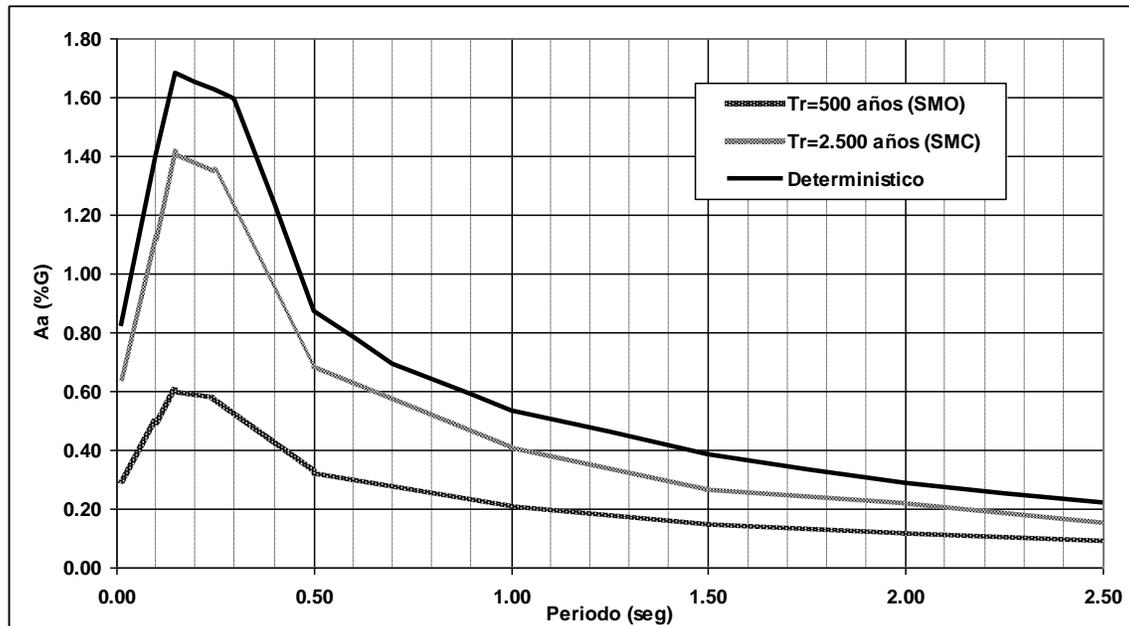
En la Figura 3.6 se muestran los espectros de respuesta de pseudoaceleración para los sismos básico de operación y máximo probable, y el espectro de respuesta para el sismo máximo creíble, obtenido en forma determinística. Estos espectros se pueden utilizar como “espectros objetivo” para la generación de los sismos sintéticos.

¹⁰ DONOVAN, N.C. Earthquake Hazards for Buildings. Building Practice for Disaster Mitigation, Building Science Series 46 U.S. Department of Commerce Bureau of Standards. 1973

¹¹ DOBRY, RICARDO. Idriss, I.M. Ng, E. “Duration Characteristics of Horizontal Components of Strong Ground Motion Earthquakes Records”. Bulletin of The Seismological Society of America. October, 1978

¹² CHANG, F.K. Krinitzsky, E.L. “Duration, Spectral Content, and Predominant Period of Strong Motion Earthquake Records from Western United States”. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper S-73-1, Vicksburg, MS. 1977

Figura 3.6 Espectros de respuesta de aceleración para los sismos de diseño



3.3.4.4 Acelerogramas para diseño

Existen varias alternativas para la obtención de señales de tiempo para efectos de diseño de las obras del proyecto que requieran de análisis no lineal o en los cuales la duración del sismo sea relevante. Estas alternativas son la selección y escalado de sismos reales, la generación de sismos artificiales a partir de sismos semilla y ajustes a una forma espectral obtenida del estudio de amenaza sísmica, o la generación de sismos sintéticos a partir de las llamadas funciones empíricas de Green.

Para la selección o generación de un sismo se deben tener en cuenta, en general, los siguientes criterios:

- Que la duración del sismo sea compatible con la calculada para el sismo de diseño, de acuerdo con la magnitud necesaria para generar en el sitio, la aceleración especificada.
- Que el sismo corresponda al mismo tipo de fuente sismogénica (subducción, falla, tipo de fallamiento) que produciría la aceleración especificada en el sitio.
- Que corresponda al mismo ambiente tectónico que se analiza, o sea que represente las condiciones sísmicas regionales.
- Que haya sido generado a partir de un sismo semilla de magnitud comparable a la magnitud del sismo de diseño.

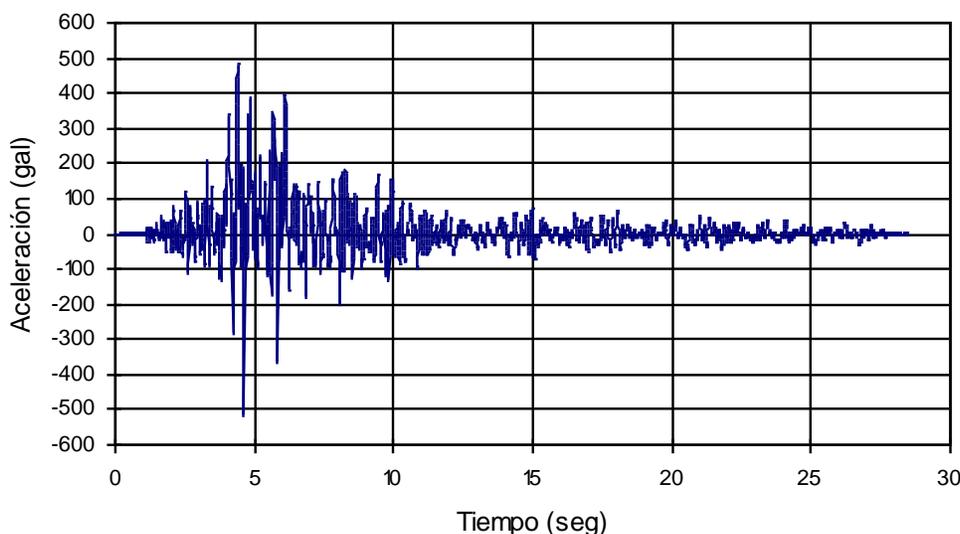
Considerando los anteriores criterios y teniendo en cuenta que el escenario sísmico más probable para el Proyecto corresponde a un sismo generado en una sismofuente superficial, a menos de 15 km del sitio de las obras, para esta etapa del proyecto se considera todavía correcta la recomendación dada en el informe de 1999, en el sentido de

utilizar el acelerograma del evento del 25 de enero de 1999, cerca a la ciudad de Armenia. Las características de semejanza son:

- Se generó en un ramal de la falla Romeral, una de las sismofuentes que más incidencia tiene en la amenaza sísmica del proyecto Ituango.
- El epicentro es cercano.
- La magnitud del sismo (6,2) es alta.
- Es un sismo local, que refleja las condiciones tectónicas regionales.

En la Figura 3.7 se muestran el acelerograma de la componente Norte-Sur del sismo de Armenia, el cual se deberá escalar a las aceleraciones de diseño dadas en el numeral 3.3.4.1.

Figura 3.7 Componente N-S del sismo del 25 enero 1999



El sismo mostrado fue registrado en un acelerógrafo instalado en la Universidad del Quindío, sobre una capa de suelo de más de 25 m de espesor, por lo cual fue necesario realizar un proceso de deconvolución del sismo a través del estrato de suelo, para obtener el registro a nivel de roca, necesario para los análisis de las estructuras. Para calibrar el modelo del suelo empleado en el proceso de deconvolución, se usaron funciones de transferencias empíricas obtenidas con base en los registros en suelo y en roca para las réplicas registradas con posterioridad al evento principal.

3.3.4.5 Sismicidad inducida por el embalse

La sismicidad inducida es un fenómeno observado en algunos embalses del mundo (algunos de los más conocidos son Kariba en Zambia, Aswan en Egipto, Koyna en India y Kremasta en Grecia), consistente en la generación de sismos normalmente de magnitudes moderadas o pequeñas durante el llenado del embalse o incluso varios años

después. Este efecto está relacionado con el aumento de la carga por el peso del agua, el incremento de presión de poros en las fallas geológicas y la lubricación de las superficies de contacto. Los sismos disparados durante el primer llenado del embalse están relacionados con los esfuerzos elásticos debido a la carga misma que induce el embalse, mientras que los sismos que se presentan después de varios ciclos de llenado y desembalse corresponden al flujo gradual del agua hacia las zonas epicentrales.

Si una falla activa que se encuentra en el proceso de acumulación de energía es inundada, los cambios en las condiciones de esfuerzos por el llenado del embalse pueden llevar a liberar la energía acumulada hasta el momento, generando un evento sísmico de magnitud menor o igual al que hubiera resultados más tarde en estado natural. En cualquier caso, la energía principal disipada en un sismo disparado por el embalse corresponde a la deformación tectónica preexistente.

Por lo tanto, este efecto no modifica las condiciones de diseño de las obras en cuanto al valor de la aceleración de diseño, ni implica la ocurrencia de sismos mayores a los que ocurrirían sin el embalse, y su único impacto al ambiente es la coincidencia de estos eventuales sismos con la puesta en funcionamiento del proyecto y la reducción en el tiempo de recurrencia de un evento, que en condiciones normales, en todo caso hubiera ocurrido alguna vez en el futuro. Este proceso de reducción en los tiempos de recurrencia es importante especialmente en zonas de baja sismicidad, donde las fallas potencialmente activas pueden acumular energía a tasas muy bajas y permanecer en un estado de esfuerzos cercano a la ruptura durante muy largos períodos de tiempo.

Los casos más comunes de sismicidad inducida se presentan en embalses de gran profundidad (más de 100 m), con volúmenes de agua altos (más de $1E10 \text{ m}^3$), y que cubren fallas que han sido activas durante el cuaternario tardío, especialmente en ambientes de esfuerzos de tracción o en fallas de rumbo. Los sismos se disparan más fácilmente en épocas de cambios rápidos en el nivel del embalse. No se ha comprobado una influencia directa del tipo de roca, aunque se han presentado más casos en rocas sedimentarias (Schwartz et al., 1996).

Si se comparan las condiciones específicas del Proyecto con otros proyectos que han presentado sismicidad inducida en el mundo, puede decirse que en este caso la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno es media a alta, de acuerdo con lo presentado en la Tabla 3.7

Tabla 3.7 Atributos para estimar la probabilidad de ocurrencia de sismicidad producida por el llenado del embalse

Atributo	Probabilidad de ocurrencia		
	Alta	Media	Baja
Profundidad (m)	Muy profundo (más de 150)	Profundo (entre 92 y 150)	Superficial (menos de 92)
Volumen (m^3)	Muy grande (más de $1E10$)	Grande (1.2 a $10E9$)	Pequeño (menos de $1.2E9$)
Estado de esfuerzos	Tracción	Compresión	Corte
Actividad de la falla	Fallas activas presentes	Fallas activas no presentes	Desconocida
Geología	Sedimentaria	Metamórfica	Ígnea

No obstante, no existe ninguna herramienta para calcular la magnitud máxima de este sismo ni su probabilidad de ocurrencia. Allen (1992) propone una magnitud máxima probable de 6,5 Ms en las sismofuentes inundadas para el diseño de todos los proyectos cuyo embalse sea susceptible a inducir sismos. Esta magnitud es igual o inferior a la magnitud última de las fallas en la zona del embalse y por lo tanto este valor será el límite superior teórico para el caso del mismo generado por el llenado del embalse en cualquiera de las fallas cercanas al Proyecto. Por tanto, en el diseño de la presa y de las obras anexas ya se estarían contemplando los efectos dinámicos de un sismo de tal magnitud.

3.4 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DE LOS SITIOS DE OBRA

Aunque el embalse del proyecto Ituango se extiende desde aguas arriba de la desembocadura del río Ituango hasta inmediaciones de la población de Olaya, las obras de ingeniería se circunscriben a un sector del cañón del río de aproximadamente 1,5 km de longitud, localizado inmediatamente aguas arriba de la desembocadura del río Ituango.

Durante esta fase del proyecto fueron verificadas las condiciones geológicas de los sitios de obra a partir de recorridos de campo y la revisión detallada de galerías y de los testigos de las perforaciones ejecutadas a finales de los años 70 y principios de los 80. Una vez se determinen los esquemas definitivos de las obras de ingeniería, se podrá tener un mayor detalle de los sitios específicos. Por ahora es claro que las características geológicas de la zona del proyecto no impiden la viabilidad del mismo.

3.4.1 Características Geomorfológicas

El cañón del río Cauca en el sector de las obras se caracteriza por su estrechez y sus vertientes empinadas, describiendo un valle de sección típica en "V", ligeramente asimétrica, con su flanco derecho más empinado que el izquierdo, rasgo directamente relacionado con la disposición de las estructuras de foliación de las rocas metamórficas en que se encuentran entallado. El río Cauca transcurre por el fondo del cañón, con un gradiente aproximado de 0,025° y una amplitud media de 50 m, inicialmente con una dirección N10°E, que se transforma gradualmente en N70°E, especialmente a partir de la desembocadura del río Ituango.

Las vertientes que encajan la presa y las demás obras, presentan más de 1.000 m de longitud, con una forma convexa que gana en inclinación, a medida que se aproxima al fondo del cañón. La incisión de las corrientes tributarias es en general moderada, formando un drenaje casi perpendicular al recorrido del río Cauca; todas estas corrientes son altamente torrenciales, con recorridos de tendencia recta a levemente sinuosa.

3.4.2 Características geológicas

Las obras serán construidas en su totalidad sobre paragneisses cuarzo feldespático, localmente de textura esquistosa, cubiertos en ocasiones por coluviones en las vertientes y por aluviones, terrazas y pequeños abanicos en el fondo del cañón.

Los gneisses, dado su protolito sedimentario, presenta una alta variabilidad textural en distancias muy cortas. Se encuentran desde rocas grueso granulares de bandas decimétricas que intercalan cuarzo y feldespato, con bandas de biotita y anfíboles, hasta láminas milimétricas de grano fino con intercalaciones similares.

La foliación tiene rumbo paralelo al tren estructural regional N-S, con buzamiento general al Este, aunque se presentan repliegues locales, que evidencian una amplia historia de afectaciones tectónicas.

Como se mencionó en el numeral anterior, esta tendencia influencia directamente el relieve del cañón, pues la ladera occidental se encuentra más tendida debido a su posición relativa desfavorable, mientras que la ladera oriental genera mayor resistencia a los agentes formadores del relieve, debido a su contrapendiente estructural. La disposición de las estructuras también explica entonces la presencia constante de bloques rocosos rodados en la ladera occidental, obedeciendo a la acción combinada de la denudación y la fuerza de la gravedad.

En fondo del río, la roca aflora en general dura, resistente y poco meteorizada, correspondiente al horizonte IIB de la clasificación propuesta por Deere y Patton, 1971, e INTEGRAL, 1982. En dichas exposiciones, en su mayoría localizadas en la orilla izquierda, se reconocen oquedades y otras formas caprichosas que labra el río durante sus variaciones de nivel y caudal. En la orilla derecha, por su parte, los afloramientos de roca están más restringidos dada la presencia de pequeños depósitos tanto aluviales como de pie de ladera.

La presencia de depósitos coluviales ha sido objeto de discusión a lo largo de todas las fases de estudio del Proyecto Hidroeléctrico Ituango. De acuerdo a las descripciones de las perforaciones registradas en los informes factibilidad de INTEGRAL LTDA de 1982, prácticamente todas las vertientes están cubiertas de estos depósitos; sin embargo, luego de hacer una revisión de detalle durante el presente estudio, se pudo concluir que la mayoría de ellos correspondían al nivel IC-IIA de meteorización de la roca parental. Así mismo, en el informe del estudio de factibilidad de INTEGRAL S.A., 1999, se grafica un número apreciable de estos depósitos en todo el sector de las obras, los cuales, luego de las visitas efectuadas en esta etapa, se pudo concluir que aunque coinciden con zonas de acumulaciones superficiales de bloques rodados, su distribución es sólo superficial, por lo que no corresponderían con la definición de coluvión.

Entre los depósitos recientes encontrados en el lugar, debe resaltarse el depósito aluvial localizado al frente de la desembocadura del Río Ituango. En esta etapa de los trabajos se ha concluido que este depósito es una masa de suelo colgada por encima del nivel del río, de poco espesor, con su parte inferior cementada, que descansa sobre roca. Estas conclusiones están fundamentadas en las siguientes consideraciones: en primera instancia se considera que actualmente el río se encuentra en un proceso de erosión en el sector, favorecido por lo estrecho del cañón y la alta pendiente del cauce, de tal manera que si el depósito se encontrara a nivel de agua, sería erosionado.

Por otra parte, en las fotografías aéreas, se observa que el límite interior del depósito está definido por un escarpe de alta pendiente y que la superficie de la masa es estrecha y de



suave pendiente hacia el río, evidencias geomorfológicas que apoyan la conclusión presentada, pues una superficie larga, por ejemplo, sugeriría un depósito gravitacional. Este depósito deberá ser estudiado en la siguiente fase del proyecto mediante perforaciones y cartografía detallada de campo.

3.4.3 Características estructurales

3.4.3.1 Fallas

En la zona cercana a las obras se han identificado las siguientes estructuras a nivel de falla:

- **Falla Ticutá.** Es una estructura con orientación general N50°E/vertical, asociada a la falla Santa Rita; se reconoce sobre la vertiente derecha del cañón y por fuera del área cartografiada; su expresión geomorfológica es moderada, afecta esquistos cuarzo sericíticos grises y presenta un espesor de unos treinta metros, con roca fracturada, material cuarzoso, e inversión en la disposición de la foliación. A esta falla está relacionada la zona de contacto entre los gneisses y los esquistos
- **Falla Tocayo.** Es una falla que cruza la foliación; se reconoce sobre el flanco derecho del cañón con una disposición de N70°W/65°SW, con un espesor que varía entre 3 a 10 m; su expresión geomorfológica es moderada y aflora en varios sitios del caño del cual toma su nombre.
- **Falla Los Mellizos.** Es una falla que cruza la foliación, cuyo lineamiento cruza sobre el flanco derecho del cañón con una disposición general N50°-70°E/60°-70°SE y con un espesor entre 1 a 3 m; su expresión geomorfológica también es moderada, y se reconoce en varios sitios del cauce de la quebrada de la cual toma su nombre.

3.4.3.2 Diaclasas

La principal característica estructural del macizo rocoso la constituye los planos de debilidad generados por la foliación, de tendencia general N10°-30°E / 10°-25° SE, aunque ocasionalmente y por procesos puntuales tales como plegamiento, el buzamiento de esta estructura se ve invertida. Esta estructura, además de ser el principal sistema de diaclasas, ha permitido la liberación de esfuerzos que se han traducido en zonas de cizalla paralelas a los mismos.

La persistencia del sistema estructural paralelo a la foliación es alta, con discontinuidades lisas desde planares hasta onduladas, en muchos casos con presencia de arcillas y flujos de agua, que pueden generar algún grado de debilidad.

Un segundo sistema de discontinuidades lo constituyen diaclasas con dirección paralela a la foliación, pero de buzamientos subverticales, siempre convergiendo hacia el río Cauca. Este sistema define las paredes del cañón y controla el cauce del río.

Un tercer sistema de diaclasas presenta orientación N30°–50°W con buzamientos entre 75 y 90 grados tanto al NE como al SW. Este sistema define las paredes del río Ituango y conjugada con otras estructuras aporta al desarrollo de geoformas en el área de la presa.

Un sistema de menor importancia presenta dirección este - oeste con buzamientos verticales a subverticales, y sirve de control de los cauces y caños del sector: quebrada Tenche, Burundá, y otros menores. Estos tres sistemas explican la presencia de bloques tabulares o en forma de paralelepípedos a lo largo de las distintas laderas.

3.5 GEOTECNIA

En esta sección se presentan las evaluaciones geotécnicas de los materiales encontrados en el área del proyecto, realizadas con el propósito de poder caracterizar los materiales y servir de criterio para proponer oportunamente diferentes esquemas de obras, viables desde el punto de vista geotécnico.

3.5.1 Clasificación del macizo rocoso.

Se realizó la clasificación del macizo rocoso con varios objetivos: tener una primera aproximación al comportamiento esperado del macizo rocoso cuando se intervenga con las obras, generar parámetros para diseño, y estimar de manera preliminar los requerimientos de refuerzo en las obras subterráneas. Esta clasificación se realizó con base en la evaluación y registro de las galerías exploratorias realizada durante esta etapa y en los datos consignados en los registros de perforación del informe realizado por INTEGRAL LTDA, también complementados durante esta etapa. El macizo rocoso fue clasificado por el sistema NGI que utiliza el índice Q, y mediante correlación empírica ($RMR = 9 \cdot \ln Q + 44$) (INTEGRAL, 1982; PRIEST, S.D., HUDSON, 1976), se estimó el índice RMR (véase Tabla 3.8). Las conclusiones de esta actividad son:

Tabla 3.8. Calidad del macizo rocoso en las galerías exploratorias.

Galería (longitud, m)	Clasificación NGI (%)		
	Buena ($q > 10$)	Regular ($1 < q < 10$)	Mala ($0.4 < q < 1$)
1 (470)	0,0	100,0	0,0
2 (230)	95,7	4,3	0,0
3 (407)	38,1	59,0	2,9

Es evidente entonces que la calidad del macizo rocoso encontrada en las galerías, en general, es de regular a buena, y que la calidad del estribo derecho (galerías 2 y 3) es superior a la del estribo izquierdo.

El RQD encontrado en las perforaciones es variable, pero de los valores registrados puede concluirse que su valor es mayor en la roca fresca y disminuye con el grado de meteorización de la roca. En general, el valor de RQD en las perforaciones aumentó con la profundidad y en las perforaciones superficiales o paralelas a la cara del talud su valor fue el menor registrado. Esto permite concluir que en el horizonte IIB y roca fresca la calidad del macizo rocoso es excelente, excepto en los tramos de aliviós de esfuerzo, donde la calidad será menor.

3.5.2 Resistencia a la compresión simple y modulo de deformación del material intacto

Durante la presente etapa del proyecto se realizaron cinco ensayos de compresión simple sobre núcleos de roca obtenidos de las perforaciones, seleccionados con el objeto de proveer un rango de valores probables. Adicionalmente, con los datos tomados durante los ensayos, se calcularon los módulos de deformación de la roca intacta. Las resistencias a la compresión simple medidas variaron entre 42 y 121 MPa y los módulos de deformación calculados variaron entre 4,1 y 10,9 MPa. Debe notarse que los núcleos fueron extraídos hace aproximadamente 25 años y permanecieron en las cajas porta núcleos bajo condiciones no controladas todo este tiempo. Los valores medidos en estos ensayos fueron verificados con base en resultados de ensayos presentados en la literatura internacional (LAMA, R. D. and VUTUKURI, V.; INTEGRAL, 1982).

3.5.3 Características geomecánicas de las discontinuidades

En la zona del proyecto se pueden definir tres tipos de discontinuidades con características notablemente diferentes: zonas de alivio de esfuerzos a lo largo de la foliación, foliación y diaclasas.

Las zonas de alivio de esfuerzos son discontinuidades paralelas a la foliación, generadas durante procesos tectónicos. Aunque son de extensión limitada, pues existen evidencias de que se “pinchan”, constituyen planos relativamente continuos en la extensión de las obras. Estas estructuras son onduladas y rugosas y en sectores pueden presentar rellenos de suelo o roca muy fracturada. Su inclinación entre 10° y 30° con la horizontal, se considera inferior a la del ángulo de fricción del material de relleno en los casos donde exista, o a la fricción de las paredes de la roca, donde ellas están en contacto. En general no representan un problema importante de estabilidad del macizo, pero como se pudo observar en las galerías exploratorias, sí generan segmentos que podrían requerir refuerzo para evitar desplomes de bloques de roca. La foliación son planos irregulares, ondulados; no siempre puede considerarse esta estructura un plano de debilidad, pues puede presentarse soldada.

Las diaclasas, en términos generales, presentan una persistencia inferior a 10 m, son cerradas y libres de relleno, de tipo planar, con paredes irregulares a rugosas, aunque en ocasiones pueden tender a lisas.

3.5.4 Propiedades geomecánicas y de deformación del macizo rocoso.

Las características de resistencia del macizo rocoso fueron estimadas siguiendo el criterio de falla de Hoek y Brown (INTEGRAL, 1982; E. HOEK and E.T.BROWN, 1985), utilizando el programa Roclab (INTEGRAL, 1982; ROCLAB, 2005), con base en las siguientes tres propiedades: resistencia a la compresión simple de la sustancia rocosa, el GSI (Geological Strength Index), y el parámetro m_i , el cual define el comportamiento esfuerzo-deformación del tipo de roca.

De la Figura 3.1 a la Figura 3.3, generadas por el programa Roclab, se presentan las envolventes de resistencia del macizo, calculadas como se menciona en el párrafo anterior.

Figura 3.1. Envoltente de falla horizonte IIB

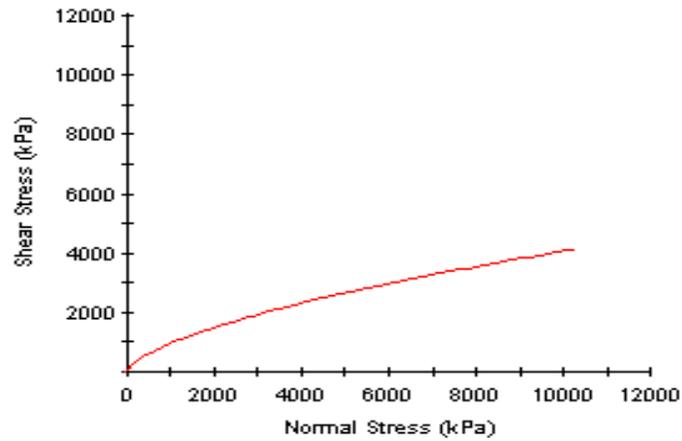


Figura 3.2. Envoltente de falla horizonte III

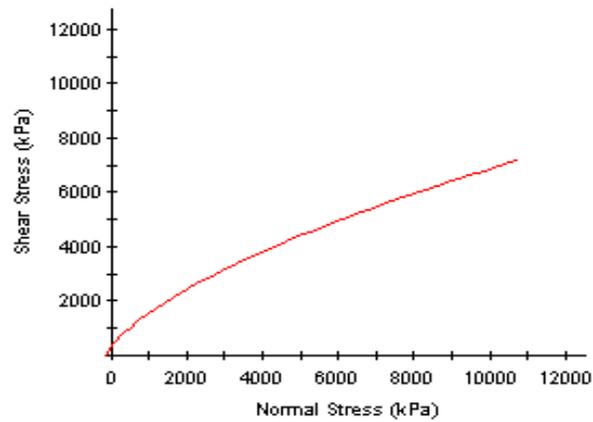
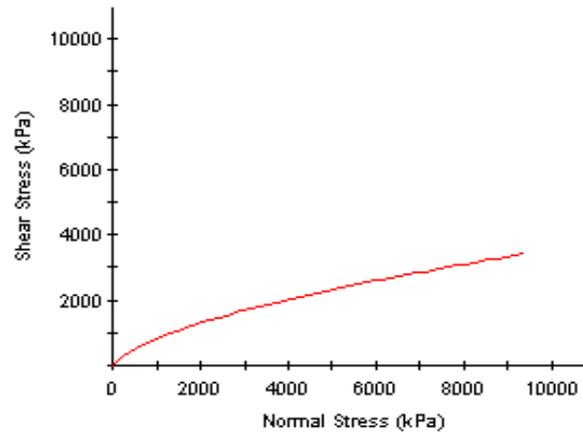


Figura 3.3. Envoltente de falla horizonte IIA



Estas envolventes describen la resistencia al corte del material en función del esfuerzo normal en la superficie de corte. En la primera figura se observa la envolvente propuesta para el horizonte IIB de la roca, denominado en este caso roca intermedia. En la segunda y tercera figuras se presentan los resultados correspondientes a roca buena y roca meteorizada, respectivamente.

El programa mencionado genera el valor de los módulos de deformación del macizo rocoso, los cuales para las tres categorías de macizo rocoso se estimaron en 1.280 MPa, 335 MPa y 220 MPa, para macizo de calidad buena, media y baja respectivamente.

3.6 SUELOS

3.6.1 Fisiografía

Para el área de influencia del proyecto se establecieron las siguientes categorías fisiográficas, considerando la escala del estudio: Provincia fisiográfica, Región Climática, Provincia Climática, Gran Paisaje y Paisaje (véase Tabla 3.9 y Plano F-PHI-EAM-LB-AA-RE-EDA).

Tabla 3.9 Categorías fisiográficas del área de estudio

Provincia Fisiográfica	Región Climática	Provincia Climática	Gran Paisaje	Paisaje	
Flanco Occidental de la Cordillera Central (CC)	Fría (F)	Lluviosa (I)	Relieve colinado	Colinas medias Colinas bajas	
	Media (M)	Lluviosa (I)	Relieve montañoso	Vertientes Filos	
			Relieve montañoso	Vertientes Filos	
	Cálida (C)	Lluviosa (I)	Llanura aluvial	Terrazas aluviales Abanicos aluvial	
			Relieve colinado	Colinas medias Colinas bajas	
	Fría (F)	Seca (S)	Relieve montañoso	Vertientes Filos	
			Llanura aluvial	Terrazas aluviales Abanicos aluviales	
	Flanco Oriental del la Cordillera Occidental (CO)	Media (M)	Lluviosa (I)	Relieve colinado	Colinas medias Colinas bajas
		Media (M)	Lluviosa (I)	Relieve montañoso	Vertientes Filos
				Relieve montañoso	Vertientes Filos
Cálida (C)		Lluviosa (I)	Llanura aluvial	Terrazas aluviales Abanicos aluviales	
			Relieve colinado	Colinas medias Colinas bajas	
Fría (F)		Seca (S)	Relieve montañoso	Vertientes Filos	
	Llanura aluvial		Terrazas aluviales Abanicos aluviales		

3.6.1.1 Provincia fisiográfica.

Corresponde a una región natural en la que se pueden presentar una o más unidades climáticas, estando constituida por conjuntos de unidades genéticas de relieve con relaciones de parentesco de tipo geológico, topográfico y espacial.

En el área de estudio se localizaron dos provincias fisiográficas, ubicadas en la estructura geomorfológica Cordillera de Plegamiento: el Flanco Occidental de la Cordillera Central y el Flanco Oriental de la Cordillera Occidental que conforman el cañón del Río Cauca desde Liborina hasta la desembocadura del Río Ituango en el Río Cauca.

3.6.1.2 Región climática.

Terrenos cuya temperatura anual promedio y condiciones de humedad, son lo suficientemente homogéneas como para reflejarse en una geogénesis particular y por consiguiente en su cobertura vegetal. Corresponde a los pisos térmicos altitudinales basados en la altura sobre el nivel del mar y la temperatura media anual.

Asociada a ésta, se define la Provincia Climática que se determina por la disponibilidad de humedad de acuerdo al método de Lang donde:

$$I_h = \frac{\text{Pre. Prom. Anual}}{\text{Temp. Prom. Anual}}$$

Si I_h varía de 0 a 60, se considera la provincia climática como seca y si es mayor de 60, lluviosa.

En la cuenca se localizan tres regiones: cálida, media y fría. La primera corresponde al área de influencia del embalse y las obras asociadas a éste. En las regiones media y cálida, que se encuentran entre los 1.000 y 2.000 m y por encima de los 2.000 m respectivamente, se localiza la línea de transmisión y su área de servidumbre.

La provincia climática seca corresponde al área ubicada en la región cálida entre la cola del embalse, en el municipio de Liborina a la altura de la quebrada Canelón Blanco, hasta aproximadamente las quebradas Peque y Santa María. La lluviosa se ubica en la región climática cálida, en inmediaciones del Río San Andrés hasta la desembocadura del Río Ituango en el Río Cauca y en las regiones media y fría.

En la Tabla 3.10 se señala la relación entre las regiones climáticas y las zonas de vida que se presentan en el Plano F-PHI-EAM-LB-AA-RE-ZVH.

Tabla 3.10 Relación zonas de vida – regiones climáticas

Zona de vida	Región climática	Provincia climática
Bosque seco tropical (bs – T)	Cálida	Seca
Bosque húmedo tropical (bh – T)	Cálida	Lluviosa
Bosque húmedo premontano (bh – PM)	Media	Lluviosa
Bosque húmedo montano bajo (bh – MB)	Fría	Lluviosa



3.6.1.3 Gran paisaje.

En términos geomorfológicos, corresponde a la unidad de relieve. Comprende asociaciones o complejos de paisajes con relaciones de parentesco de tipo climático, geogenético, litológico y topográfico. Contiene entonces unidades genéticas de relieve, situadas en una provincia climática, localizada ésta en una región climática, que se ubica a su vez, en una provincia fisiográfica.

En el área de influencia del proyecto se localizan básicamente tres unidades de gran paisaje: relieve colinado, relieve montañoso y llanura aluvial (Tabla 3.9). Los mayores valores de pendiente corresponden a la zona de embalse, en la que predomina el relieve montañoso con áreas pequeñas de llanura aluvial. El paisaje colinado se relaciona con pendientes menores ubicadas hacia el altiplano del Yarumal, en zona de influencia de la línea de transmisión para construcción.

3.6.1.4 Paisajes

Son unidades formadas por un proceso morfogenético particular. Están contenidas en el Gran Paisaje. Para efectos del análisis fisiográfico se agruparon las macrounidades, determinadas dentro de las unidades geomorfológicas del informe de geomorfología, en las siguientes categorías: vertientes, filos, colinas medias, colinas bajas, terrazas aluviales y abanicos aluviales, las cuales se describen a continuación.

- Vertientes. Se encuentran ubicadas a ambas márgenes del río Cauca. En general son largas a medias, con incisiones moderadas que desarrolla valles en forma de “V” abierta; formadas sobre neises y esquistos.
- Filos, Se ubican en las vertientes. En general presentan topes alargados, subredondeados y estrechos.
- Colinas medias. Conformada por un sistema de colinas de topes agudos y flancos planos irregulares hacia la cola del embalse en el municipio de Liborina)
- Colinas bajas. Son colinas de topes estrechos y subredondeados con flancos cortos, ubicadas hacia el altiplano en la zona de la línea de transmisión de energía para construcción.
- Terrazas aluviales. Se ubican en franjas estrechas a ambas márgenes del río Cauca. De forma plana en el tope, están conformadas por arenas y gravas de depósitos aluviales.
- Abanicos aluviales. Se ubican en los tramos finales de algunos de los afluentes del río Cauca. Se forman por el arrastre de sedimentos de estas corrientes, los cuales son depositados al llegar a la desembocadura.

3.6.2 Asociaciones

Las asociaciones se consideraron como unidades de mapeo básicas para la caracterización de los suelos del área de estudio. En ellas se incluyen dos o más clases de suelos, correspondientes a diferentes unidades taxonómicas.

Las unidades de mapeo contienen generalmente variaciones de clases de suelos que se consideran como inclusiones, las cuales ocupan áreas muy pequeñas para ser delimitadas o localizadas en cartografía, por lo tanto se trabajan como clases similares a la unidad básica de mapeo.

Las asociaciones se delimitaron inicialmente sobre cartografía, de acuerdo a la información del Estudio de Suelos del Departamento de Antioquia (IGAC, 1979) y sus límites se ajustaron posteriormente a la escala de estudio con la información obtenida por el mapa de pendientes, observaciones de campo y resultados de análisis de muestras de suelo en laboratorio.

En el Plano F-PHI-EAM-LB-AA-RE-EDA se muestra los sitios de muestreo. En la Tabla 3.11 se señalan las unidades delimitadas, su posición fisiográfica y el área ocupada por éstas en la zona de estudio.

Tabla 3.11 Asociaciones de suelos en el área de estudio

Posición Fisiográfica Gran Paisaje	Asociación	Fase	
		Pendiente	Erosión
Relieve montañoso	Ituango (IT)	f	3
		ef	3 - 4
	Raudal (RV)	f	2-3
	Santa Bárbara (SB)	f	3
		ef	2-3
	Concordia (CN)	ef	4
		f	3-4
	Gemelos (GA)	ef	3
	Tuntuna (TG)	ab	-
		bc	-
		de	2-3
ef		2-3	
Llanura aluvial	Calderas (CL)	cd	-
		a	-
	Tarazá (TR)	ab	-

A continuación se describen las principales unidades de suelo ubicadas en el área de estudio y se presentan los perfiles de suelo descritos en ellas.

3.6.2.1 Asociación Ituango (IT)

Esta asociación está localizada entre los 1.000 y 2.000 msnm, muy por encima de la cota de inundación, entre las zonas de vida Bosque húmedo tropical y Bosque húmedo premontano. Fisiográficamente comprende vertientes y filos, ubicados en el relieve montañoso de los flancos de las cordilleras Central y Occidental a ambas márgenes del Río Cauca.

El relieve es muy escarpado con pendientes generalmente largas y rectas que varían entre el 25 a 50% y el 50 al 75%. Presentan erosión severa, llegando a ser muy severa en los sectores de mayor pendiente.

Son suelos desarrollados a partir de rocas metamórficas (varias clases de esquistos con intercalaciones de neises, anfibolitas, cuarcitas y materiales calcáreos), su espesor varía de profundos a superficiales, y están limitados por factores físicos o químicos: gravillas, piedras, roca cerca a la superficie o toxicidad por aluminio. Bien drenados.

En general son suelos con fertilidad moderada a baja, capacidad de intercambio catiónico de alta a baja, alta a baja la saturación de bases, el carbón orgánico decrece regularmente de alto a bajo y su contenido de fósforo es bajo

En la Tabla 3.12 se presentan las características fisicoquímicas del perfil de suelo.

Tabla 3.12. Descripción del perfil del suelo en la asociación Ituango

Localización geográfica	Parte alta hacienda Cuni			
Localización fisiográfica	Vertiente			
Punto de muestreo	P 1			
Material parental	Roca metamórfica			
Cobertura vegetal y uso del suelo	Pastos y rastrojo bajo Ganadería extensiva			
Evidencias de erosión	Laminar			
Límite de profundidad	Piedras			
Drenaje externo	Bueno	Drenaje interno	Bueno	Drenaje natural Bueno
Características de los horizontes				
Nomenclatura	A		B	
Espesor	1		1 - 58	
Textura	FA		FAr-FA	
Color Munsell	5 YR 3/4		5 YR 5/6	
Estructura	Masiva		Masiva	
Poros	Macro		Macro	
Raíces	Raicillas		Raíces	
Actividad de microorganismos	Poca		-	
pH	5.9		5.2	
M.O (%)	5.2		1.7	
Al (cmol kg ⁻¹)	-		0.6	
Ca (cmol kg ⁻¹)	7.4		2.4	
Mg (cmol kg ⁻¹)	1.7		1.1	
K (cmol kg ⁻¹)	0.25		0.13	
CICE (cmol kg ⁻¹)	9.4		4.2	
P (mg kg ⁻¹)	7		2	

Observaciones: El suelo ha sido laborado para el establecimiento de pastos.

Las pendientes en las que se localiza el perfil son superiores al 50%. No muestra desarrollo estructural; es un suelo moderadamente profundo, limitado por piedras. En el primer horizonte se presenta una acidez media que se incrementa hacia el segundo hasta llegar a ser fuerte, limitando probablemente la asimilación de nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio para algunas especies de plantas.

3.6.2.2 Asociación Raudal (RV)

Esta unidad forma parte del área de influencia directa de la cota de inundación del embalse, 520 m en la zona de Bosque húmedo tropical. Fisiográficamente comprende

vertientes ubicadas en el relieve montañoso de los flancos de las cordilleras Central y Occidental a ambas márgenes del Río Cauca.

En la Tabla 3.13 se presentan las características del perfil levantado en campo para esta asociación.

Tabla 3.13. Descripción del perfil de suelo en la asociación Raudal

Localización geográfica	Margen derecha quebrada Burunda			
Localización fisiográfica	Vertiente			
Punto de muestreo	P 3			
Material parental	Roca metamórfica			
Cobertura vegetal y uso del suelo	Rastrojo bajo Ganadería extensiva			
Evidencias de erosión	Laminar			
Limite de profundidad	Roca			
Drenaje externo	Bueno	Drenaje interno	Bueno	Drenaje natural
Características de los horizontes				Bueno
Nomenclatura		A	B	C
Espesor		5	5 - 69	> 69
Textura		FA	FAR	
Color Munsell		5 YR 3/2	5 YR 4/6	
Estructura		Tipo: Granular Clase: Fina Grado: Débil	Tipo: Granular Clase: Fina Grado: Débil	
Poros		Macro	Macro	
Raíces		Raicillas	Raíces	
Actividad de microorganismos		Poca	Poca	
pH		5.0	4.7	
M.O (%)		5.3	2.9	
Al (cmol kg ⁻¹)		0.8	2.2	
Ca (cmol kg ⁻¹)		2.3	0.2	
Mg (cmol kg ⁻¹)		1.0	0.1	
K (cmol kg ⁻¹)		0.35	0.22	
CICE (cmol kg ⁻¹)		4.5	2.7	
P (mg kg ⁻¹)		10	3	

Observaciones: Piedra a través del perfil desde el primer horizonte.

En el área de estudio el relieve es muy escarpado, con pendientes largas y rectas, mayores del 50%, con erosión severa.

Los suelos se originaron a partir de rocas metamórficas, especialmente esquistos cloríticos, cuarzo sericíticos o anfibólicos. En general son suelos moderadamente profundos a superficiales, limitados por factores físicos o químicos; bien drenados. La fertilidad varía de alta a baja, capacidad de intercambio catiónico baja, bases totales bajas a muy bajas, saturación de bases baja a media, concentraciones relativamente altas de aluminio y muy variables en fósforo.

Las pendientes en las que se localiza el perfil son superiores al 50%. Muestra desarrollo estructural; es un suelo moderadamente profundo, limitado por piedras a través del perfil y roca en el horizonte C. Se realizaron chequeos de profundidad en diferentes sitios de la unidad, en los que no se encontraron variaciones significativas en profundidad.

La acidez es muy fuerte en ambos horizontes, limitando la fertilidad natural por reducción en la asimilación de nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio. Los contenidos de fósforo son bajos y por los valores de pH se espera que éste se precipite con el aluminio.

El valor obtenido en el laboratorio para aluminio en el horizonte B, indica la posibilidad de que se presente toxicidad para algunas especies de plantas.

3.6.2.3 Calderas (CL)

Localizada en el área de estudio en inmediaciones del río San Andrés en zona de vida Bosque húmedo tropical, en cota de inundación del embalse. Fisiográficamente comprende llanura aluvial ubicada en el flanco occidental de la cordillera Central.

Los suelos se han desarrollado a partir de coluviones y aluviones de diferentes tipos de rocas; son de extensión pequeña. El relieve en el área de estudio es ligeramente plano con erosión leve y pendientes que van del 3 al 12%.

En general son suelos profundos a superficiales, limitados por factores físicos o químicos. Su fertilidad es baja, son fuerte a medianamente ácidos, alta a muy baja actividad intercambio catiónico, bajos a muy bajos en bases totales y concentraciones relativamente altas de aluminio.

En la Tabla 3.14 se muestran las características fisicoquímicas del perfil descrito en campo

Tabla 3.14. Descripción del perfil de suelo en la asociación Calderas

Localización geográfica	Margen derecha río San Andrés			
Localización fisiográfica	Terraza aluvial			
Punto de muestreo	P 2			
Material parental	Aluvial			
Cobertura vegetal y uso del suelo	Rastrojo bajo			
Evidencias de erosión	Laminar			
Limite de profundidad	Piedra			
Drenaje externo	Bueno	Drenaje interno	Bueno	Drenaje natural
				Bueno
Características de los horizontes				
Nomenclatura	A	B	C	
Espesor	0 - 5	5 - 43	> 43	
Textura	F	FA		
Color Munsell	7.5 YR 3/2	7.5 YR 5/6		
Estructura	Tipo: Bloques subangulares	Tipo: Bloques subangulares		
	Clase: Fina	Clase: Fina		
	Grado: Débil	Grado: Débil		
Poros	Macro	Macro		
Raíces	Raicillas	Raíces		
Actividad de microorganismos	Poca	Poca		
pH	4.9	4.7		
M.O (%)	8.1	0.83		
Al (cmol kg ⁻¹)	0.4	1.1		
Ca (cmol kg ⁻¹)	10.2	2.4		
Mg (cmol kg ⁻¹)	2.6	1.3		
K (cmol kg ⁻¹)	0.15	0.05		
CICE (cmol kg ⁻¹)	13.4	4.9		
P (mg kg ⁻¹)	54	40		
Observaciones: Piedra a través del perfil desde el primer horizonte. Acumulación de hojarasca en el primer horizonte				

Las pendientes en que se localiza el perfil son del 3%. Muestra desarrollo estructural: es un suelo superficial, limitado por piedra.

La acidez es muy fuerte en los horizontes A y B. Limitando la asimilación de nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio, a pesar del contenido alto materia orgánica y fósforo. La primera decrece significativamente a través del perfil.

3.6.2.4 Santa Bárbara (SB)

Localizada en el área de estudio, en las zonas de vida Bosque húmedo tropical y Bosque seco tropical. Comprende el área de inundación del embalse. Fisiográficamente corresponde a las vertientes y filos ubicados en el relieve montañoso de los flancos de las cordilleras Central y Occidental, a ambas márgenes del río Cauca.

Los suelos se han desarrollado a partir de rocas ígneas, diabasas, basaltos y dioritas principalmente. El relieve es escarpado, con predominio de pendientes mayores del 50%. El grado de erosión varía de moderada a severa en el área de estudio.

En la Tabla 3.15 se presenta el perfil descrito para esta asociación.

Tabla 3.15. Descripción del perfil de suelo en la asociación Santa Bárbara

Localización geográfica	Margen izquierda quebrada Santa María				
Localización fisiográfica	Vertiente				
Punto de muestreo	P 5				
Material parental	Roca ígnea				
Cobertura vegetal y uso del suelo	Rastrojo bajo Ganadería extensiva				
Evidencias de erosión	Laminar				
Limite de profundidad	Roca				
Drenaje externo	Bueno	Drenaje interno	Bueno	Drenaje natural	Bueno
Características de los horizontes					
Nomenclatura	A		C		
Espesor (cm)	34		> 34		
Textura	FArA				
Color Munsell	2.5 YR 2/1				
Estructura	Masiva				
Poros	Macro				
Raíces	Raicillas				
Actividad de microorganismos	Poca				
pH	6.8				
M.O (%)	3.5				
Al (cmol kg ⁻¹)	-				
Ca (cmol kg ⁻¹)	19				
Mg (cmol kg ⁻¹)	4.0				
K (cmol kg ⁻¹)	0.29				
CICE (cmol kg ⁻¹)	23.3				
P (mg kg ⁻¹)	15				
Observaciones:					

Los suelos en general son profundos a superficiales, con predominio de los primeros en el área de estudio; limitados por factores físicos y químicos (piedras, gravillas, contactos

rocosos o toxicidad por aluminio); el drenaje natural varía entre bueno y excesivamente bueno.

La fertilidad varía de baja a moderada, reacción fuerte a ligeramente ácida, muy alta a baja la capacidad de intercambio catiónico, las bases totales al igual que la saturación de bases van de altas a bajas en los diferentes conjuntos, el carbón orgánico decrece de alto a muy bajo y son bajos en fósforo.

El perfil se localizó en la parte baja de una pendiente cercana al 50%, en área de inundación del embalse, en la que el uso predominante ha sido la ganadería. El suelo no tiene todavía desarrollo estructural y no se evidenció presencia de horizonte B en este perfil.

Presenta acidez muy suave, favoreciendo la asimilación de la mayor parte de los nutrientes incluidos nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. El uso está más limitado por factores físicos, relacionados con la presencia de roca en el perfil y déficit de agua, que con la fertilidad.

3.6.2.5 Concordia (CN)

Localizada en el área de estudio en zona de vida bosque seco tropical, incluye suelos que serán inundados por el embalse, en los municipios de Sabanalarga y Liborina. Fisiográficamente comprende vertientes, ubicadas en el relieve montañoso de los flancos de las cordilleras Central y Occidental, a ambas márgenes del Río Cauca y algunas colinas medias de relieve colinado.

Los suelos son derivados de rocas ígneas, principalmente diabasas, basaltos y dioritas. El relieve es escarpado con pendientes rectas y largas, que varían del 25 al 50% y más del 50 %, en el área de estudio. La erosión varía de severa a muy severa en los sitios de mayor pendiente.

En general son suelos superficiales y profundos con drenaje de excesivo a bueno. La fertilidad varía de moderada a baja, con una capacidad de intercambio catiónico alta a media y muy bajos en abundancia de fósforo.

En la Tabla 3.16 se presenta la descripción del perfil de suelo descrito en campo para esta asociación.

El perfil se localizó en una colina media, en la que el uso predominante ha sido ganadería extensiva, seguido de cultivo de maíz. Tanto en el horizonte A como en el B se observa desarrollo estructural.

El resultado del análisis de laboratorios señala, en general, un contenido alto de nutrientes, especialmente de nitrógeno, calcio y magnesio, además de una alcalinidad suave que favorece la disponibilidad de éstos y el fósforo. El resultado relacionado con el contenido de nutrientes puede obedecer al manejo que se le ha dado al cultivo de maíz, que de acuerdo con entrevistas con personas de la zona, se fertiliza, sin responder a una programación periódica.

Tabla 3.16. Descripción del perfil del suelo en la asociación Concordia

Localización geográfica	Entre las quebradas Toyugano y La Cueva				
Localización fisiográfica	Vertiente				
Punto de muestreo	P 8				
Material parental	Roca ígnea				
Cobertura vegetal y uso del suelo	Pasto y Ganadería extensiva				
Evidencias de erosión	Laminar y patas de vaca				
Limite de profundidad	-				
Drenaje externo	Bueno	Drenaje interno	Bueno	Drenaje natural	Bueno
Características de los horizontes					
Nomenclatura	A		B		C
Espesor	25		25 - 86		> 86
Textura	FA		Ar		
Color Munsell	5 YR 5/2		5 YR 5/6		
Estructura	Tipo: Granular		Tipo: Granular		
	Clase: Fina		Clase: Fina		
	Grado: Débil		Grado: Débil		
Poros	Macro		Micro		
Raíces	Raicillas		-		
Actividad de microorganismos	Poca		-		
pH	7.0		8.0		
M.O (%)	10.8		0.57		
Al (cmol kg ⁻¹)	-		0.6		
Ca (cmol kg ⁻¹)	25.9		29.2		
Mg (cmol kg ⁻¹)	8.1		11.3		
K (cmol kg ⁻¹)	1.70		0.18		
CICE (cmol kg ⁻¹)	35.7		40.74.2		
P (mg kg ⁻¹)	15		8		

Observaciones: En la del muestreo se ha cultivado maíz y pasto.

3.6.2.6 Gemelos (GA)

Se localiza en la cuenca de la quebrada Membrillal del municipio de Sabanalarga, en zona de vida bosque seco tropical. Incluye área de inundación del embalse. Fisiográficamente comprende vertientes ubicadas en el flanco occidental de la cordillera Central.

Son suelos desarrollados de rocas sedimentarias del Terciario como areniscas, arcillas y conglomerados, con inclusiones de materiales calcáreos. El relieve en el área de estudio varía de escarpado a muy escarpado, con pendientes que van del 50% hasta mayores del 50 %. En general en la zona de influencia del proyecto la erosión es severa y la unidad corresponde a suelos moderadamente profundos a superficiales, limitados por factores físicos, gravillas, cascajos o contactos rocosos, bien a excesivamente drenados. La fertilidad varía de moderada a baja, la reacción ligera a fuertemente ácida, capacidad de intercambio catiónico alta, bases totales y saturación de bases altas, carbón orgánico y fósforo disponible bajos.

El perfil se localizó en la parte media de la cuenca de la Quebrada Membrillal, en área futura de inundación del embalse. No se encontró horizonte B ni desarrollo estructural en el A. La profundidad encontrada corresponde a un suelo muy superficial, lo que puede limitar su uso para algunas especies.

El resultado del pH señala un suelo de acidez media a suave, que no alcanza a afectar la disponibilidad de nutrientes. El contenido de materia orgánica es muy bajo.

En la Tabla 3.17 se presentan las características del perfil de suelo descrito en campo para esta asociación.

Tabla 3.17. Descripción del perfil del suelo en la asociación Concordia

Localización geográfica	Margen izquierda quebrada Membrillal				
Localización fisiográfica	Vertiente				
Punto de muestreo	P 9				
Material parental	Roca ígnea				
Cobertura vegetal y uso del suelo	Pasto y rastrojo bajo, Ganadería extensiva				
Evidencias de erosión	Laminar				
Límite de profundidad	Piedra				
Drenaje externo	Bueno	Drenaje interno	Bueno	Drenaje natural	Bueno
Características de los horizontes					
Nomenclatura	A		C		
Espesor	0 - 24		> 24		
Textura					
Color Munsell	2.5Y 7/1				
Estructura	Masiva				
Poros	Macro				
Raíces	Raicillas				
Actividad de microorganismos	-				
pH	6.0				
M.O (%)	0.43				
Al (cmol kg ⁻¹)	-				
Ca (cmol kg ⁻¹)	2.3				
Mg (cmol kg ⁻¹)	0.6				
K (cmol kg ⁻¹)	0.13				
CICE (cmol kg ⁻¹)	3				
P (mg kg ⁻¹)	21				

Observaciones: En el sitio en que se ubicó el perfil no se reportaron manejos del suelo relacionados con fertilización.

3.6.2.7 Tuntuna (TG)

Localizada en la cota de inundación del embalse, 420 m, en zona de vida Bosque seco tropical. Fisiográficamente comprende las partes medias bajas de las vertientes ubicadas en los flancos de las cordilleras Central y Occidental. La parte más baja se localiza sobre terrazas.

Son suelos desarrollados a partir de coluviones y aluviones heterométricos y heterogéneos. El relieve en el área de estudio varía de plano en las partes bajas, a muy escarpado en las partes medias, con pendientes de que van de 0 a 12%, hasta mayores del 50%. Erosión de moderada a severa.

Son suelos profundos a superficiales, limitados por factores físicos y moderados a bien drenados. Fertilidad de moderada a baja, reacción mediana a ligeramente ácida, capacidad de intercambio catiónico de alta a mediana y bajos en fósforo.

El perfil se localizó en inmediaciones del caserío de Orobajo, al finalizar la vertiente, sobre un terreno completamente plano, en una terraza alta formada por el Río Cauca. No se encontró horizonte B, ni se evidenció desarrollo de estructura.

En la Tabla 3.18 se presenta el perfil de suelo descrito en esta unidad.

Tabla 3.18. Descripción del perfil del suelo en la asociación Tuntuna

Localización geográfica	Orobajo				
Localización fisiográfica	Terraza				
Punto de muestreo	P 7				
Material parental	Aluvial				
Cobertura vegetal y uso del suelo	Rastrojo bajo Ganadería extensiva				
Evidencias de erosión	-				
Limite de profundidad					
Drenaje externo	Bueno	Drenaje interno	Bueno	Drenaje natural	Bueno
Características de los horizontes					
Nomenclatura	A				
Espesor (cm)	0 - 53				
Textura	FA				
Color Munsell	5 YR 2/5				
Estructura	Masiva				
Poros	Macro				
Raíces	Raicillas				
Actividad de microorganismos	-				
pH	7.1				
M.O (%)	1.1				
Al (cmol kg ⁻¹)	-				
Ca (cmol kg ⁻¹)	6.0				
Mg (cmol kg ⁻¹)	1.3				
K (cmol kg ⁻¹)	0.45				
CICE (cmol kg ⁻¹)	7.8				
P (mg kg ⁻¹)	156				
Observaciones:					

La profundidad encontrada corresponde a suelos moderadamente profundos, de alcalinidad suave, que favorece la disponibilidad de nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio, los cuales presentan contenidos altos, especialmente el fósforo. La relación amplia entre el calcio y el magnesio puede afectar la absorción de este último. El límite de uso está dado más por déficit de agua que por fertilidad.

3.6.2.8 Tarazá (TR)

Se encuentra en el área de estudio en las zonas de vida Bosque seco tropical y Bosque húmedo tropical. Fisográficamente corresponde a terrazas ubicadas sobre llanura aluvial.

Se pueden encontrar pequeños diques, bajos y terrazas con influencia no coluvial. El relieve es plano e inclinado con pendientes del 0 al 12%.

Son suelos derivados de aluviones recientes heterogéneos y heterométricos, presentan inundaciones o encharcamientos en épocas de lluvias o crecidas de los ríos. En el área

de estudio el relieve es plano con pendientes entre 0 y 7%. Profundos a superficiales, están limitados por factores físicos. La fertilidad varía de baja a moderada, son fuertes a ligeramente ácidos, con capacidad de intercambio catiónico media a alta y bajos en fósforo.

El perfil del suelo se ubicó sobre una pendiente del 3%. El ph indica una acidez media que puede afectar la disponibilidad de fósforo para algunas especies, a pesar de su contenido alto. Su uso está limitado primordialmente por la presencia de piedra en el perfil.

Tabla 3.19. Descripción del suelo en la asociación Tarazá

Localización geográfica	Margen izquierda de la quebrada Tacuí			
Localización fisiográfica	Terraza			
Punto de muestreo	P 4			
Material parental	Aluvial			
Cobertura vegetal y uso del suelo	Cultivo de papayo			
Evidencias de erosión	Laminar			
Limite de profundidad	Piedra			
Drenaje externo	Bueno	Drenaje interno	Bueno	Drenaje natural
Características de los horizontes	Bueno			
Nomenclatura	A	B	C	
Espesor	0 - 30	30 - 58	> 58	
Textura	FA	A		
Color Munsell	10 YR 2/1	10 YR 3/3		
Estructura	Tipo: Bloques angulares		Masiva	
	Clase: Media			
	Grado: Fuerte			
Poros	Micro	Macro		
Raíces	Raicillas	-		
Actividad de microorganismos	Poca	Poca		
pH	5.7	5.6		
M.O (%)	5.9	0.63		
Al (cmol kg ⁻¹)	-	-		
Ca (cmol kg ⁻¹)	6.9	1.0		
Mg (cmol kg ⁻¹)	1.0	0.2		
K (cmol kg ⁻¹)	0.39	0.04		
CICE (cmol kg ⁻¹)	8.3	1.2		
P (mg kg ⁻¹)	47	39		

Observaciones: El cultivo de papayo está en su etapa inicial. Anteriormente el suelo se usaba para ganadería extensiva. Se observa abundante piedra en el perfil.

3.6.3 Usos potenciales del suelo

La clasificación de uso del suelo se basa en las propiedades fisicoquímicas del suelo (resumidas en la Tabla 3.20) y en las características climáticas, especialmente las relacionadas con precipitación.

Tabla 3.20. Características fisicoquímicas de las clases agrológicas en el área de estudio

Clase	Fisiografía			Propiedades físicas		Propiedades químicas	
	Pendiente (%)	Relieve	Erosión	Prof. Efectiva (cm)	Clase Textural	Fertilidad	Rango ph
III	- 12	Plano – Ligeramente ondulado	Ligera Severa	50 - 90	Moderadamente gruesas, medias, moderadamente finas, finas	Alta, Media, Baja	5.6 – 7.8
IV	0 - 25	Plano quebrado	Ligera Severa	50 - 90 25 - 50	Moderadamente gruesas, medias, moderadamente finas, finas, muy finas	Alta, Media, Baja, Muy baja	5.1 – 5.5
V	0 - 7	Plano Ligeramente plano	Ligera Moderada	50 – 90 50 - 25 < 25	Moderadamente gruesas, medias, moderadamente finas, finas, muy finas	Alta, Media, Baja, Muy baja	4.5 – 5.4
VI	0 - 50	Plano Fuertemente quebrado	Ligera Muy severa	50 – 90 50 - 25 < 25	Gruesas Moderadamente gruesas, medias, moderadamente finas, muy finas	Alta, Media, Baja, Muy baja	4.5 – 5.4
VII	0 - >50	Plano – Muy escarpado	Ligera – Muy severa	50 – 90 50 - 25 < 25	Gruesas Moderadamente gruesas, medias, moderadamente finas, muy finas	Alta, Media, Baja, Muy baja	< 4.5

Los distintos usos potenciales de las clases agrológicas encontradas se presentan en la Tabla 3.21 en tanto que la localización de cada uno se ilustra en los mapas FPHI-LB-AA-RE-UPO y FPHI-LB-LT-RE-UPO (Uso potencial del suelo).

Tabla 3.21. Usos potenciales de las clases agrológicas

Clase	Usos potenciales
III	Productor. Pastos, cultivos, plantaciones forestales
IV	Productor. Pastos, cultivos tolerantes a la acidez como piña, mango, plátano, caña, café con sombrío y plantaciones forestales
V	Productor y productor – protector. Pastos y cultivos muy tolerantes a la acidez. Para las plantaciones forestales pueden presentarse limitaciones por la profundidad efectiva en las zonas con suelos muy superficiales (> 25 cm)
VI	Suelos para uso protector-productor y protector con predominio de plantaciones forestales y rastrojos (estos últimos en las zonas de menor profundidad efectiva). La pendiente, la profundidad efectiva y el pH constituyen los factores limitantes.
VII	Suelos protectores por el grado de pendiente. En las zonas planas el uso productor está limitado por la acidez extrema que limita fuertemente la disponibilidad de nutrientes.

3.7 ANÁLISIS DEL PAISAJE

Se presenta un ejercicio de zonificación del territorio del proyecto, a partir de la caracterización biofísica de los principales aspectos que integran el paisaje como son el clima, la geomorfología, los suelos y los usos del suelo, entendiéndose estos últimos como parte de la transformación que el hombre realiza en sus actividades de uso y apropiación del entorno. En adelante se identificará este proceso como “zonificación ecológica”, en el cual se observan principalmente los aspectos estructurales del paisaje, tales como: la distribución de fragmentos de bosque, el uso predominante del suelo, entre otros. Todos los principios metodológicos e interpretativos sobre los cuales se estructuró este análisis, se derivan de la escuela de la ecología del paisaje y la biología de la conservación.



La ecología del paisaje (EP) como ciencia integradora, cuyo objetivo es caracterizar los ecosistemas con base en la heterogeneidad espacial del paisaje, permite establecer relaciones entre los tipos de vegetación y las características del ambiente (clima, suelos, topografía, perturbaciones) en una región y escala determinadas, aunque para descubrir los mecanismos de funcionamiento y cambios a escala del paisaje, se hace necesario delinear y definir su composición (Forman, 1995)¹³.

3.7.1 Metodología

Se realizó una caracterización biofísica del territorio la cual constituyó la base para generar un mapa de zonas ecológicas como punto de referencia para la caracterización del área de influencia del proyecto. Esta parte del análisis, llamada “zonificación”, implica desagregar un área compleja en unidades más simples de análisis, relativamente homogéneas y caracterizadas con respecto a factores físicos (pisos térmicos, clima, forma, etc) y biológicos (usos del suelo). Metodológicamente, la ecología del paisaje permite integrar esas unidades simples para obtener una propuesta de Zonificación ecológica basada en el concepto de matriz - parche - corredor como elementos constituyentes de un paisaje (Forman, 1986)¹⁴.

La fuente de la información temática es el producto del estudio desarrollado por el equipo de especialistas participantes en el proyecto, e igualmente se basa en el estudio de suelos del departamento de Antioquia, realizado por el IGAC (1979). De esta manera, los pisos térmicos y el clima de la región se construyeron con base en la clasificación de unidades climáticas propuestas por IGAC (1979)¹⁵, donde toda la región se clasifica con amplio gradiente de pisos térmicos, desde el cálido muy seco hasta el frío, incluyendo una pequeña zona paramuna sobre los 3.000 msnm, muy cerca del Alto de Ventanas. Esta clasificación se combina con las clases de humedad, calculadas a partir del índice de Thorntwaite o índice hídrico:

$$IH = \text{Precipitación promedio anual} / T^{\circ} \text{ prom Anual}$$

Teniendo en consideración lo anterior, el mapa de zonificación ecológica se desarrolló a partir de los mapas de clima, la geomorfología y usos del suelo, con los cuales se determinan tres zonas ecológicas, a partir de la identificación de la matriz predominante, es decir el tipo de uso del suelo predominante.

Mediante algebra de mapas se delimitaron ocho paisajes con sus usos respectivos, es decir, para cada unidad de paisaje se hizo una cuantificación de las áreas en hectáreas de cada una de las coberturas vegetales y/o usos.

¹³ FORMAN, R. T. T. Land mosaics. Cambridge: Cambridge University Press, 1995a. 632 p. ISBN 052 1474620.

¹⁴ FORMAN, R.T.T. and GODRON, M. Landscape ecology. New York: John Wiley, 1986. 620 p. ISBN 0-471-87037-4.

¹⁵ IGAC – INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. 1997. Estudio de suelos del departamento de Antioquia. (planos).

3.7.1.1 Indicadores ecológicos a nivel de paisaje y de fragmentos de bosque

Para la construcción de los indicadores se identificaron y dimensionaron los principales fragmentos de bosque (véase Figura 3.8).

A nivel de paisaje se identificaron los indicadores que permitían describir los patrones espaciales en el territorio. Para cada zona ecológica identificada se evaluaron los siguientes índices:

- **No. Parches.** Número de parches (o fragmentos de bosque)
- **Área en hectáreas.** Para cada clase de uso del suelo

$$\text{Área (hectáreas)} = a_{ij} \left(\frac{1}{10.000} \right)$$

donde a_{ij} es el área en m^2 del parche ij . Otros indicadores son el número de parches por tipo de cobertura

- **TMF.** Tamaño promedio de los fragmentos para las clases bosque de galería y bosque intervenido y **DSTMF** que es la desviación estándar del tamaño del parche
- **MPFD.** Dimensión fractal promedio de la forma de los fragmentos de bosque.

$$FRACT = \frac{2 * \ln(p_{ij})}{\ln(a_{ij})}$$

es igual a dos veces el logaritmo natural del perímetro del parche, dividido por el logaritmo natural del área del parche. Su rango varía entre 1 y 2, este último de mayor complejidad (McGarigal & Marks, 1994)

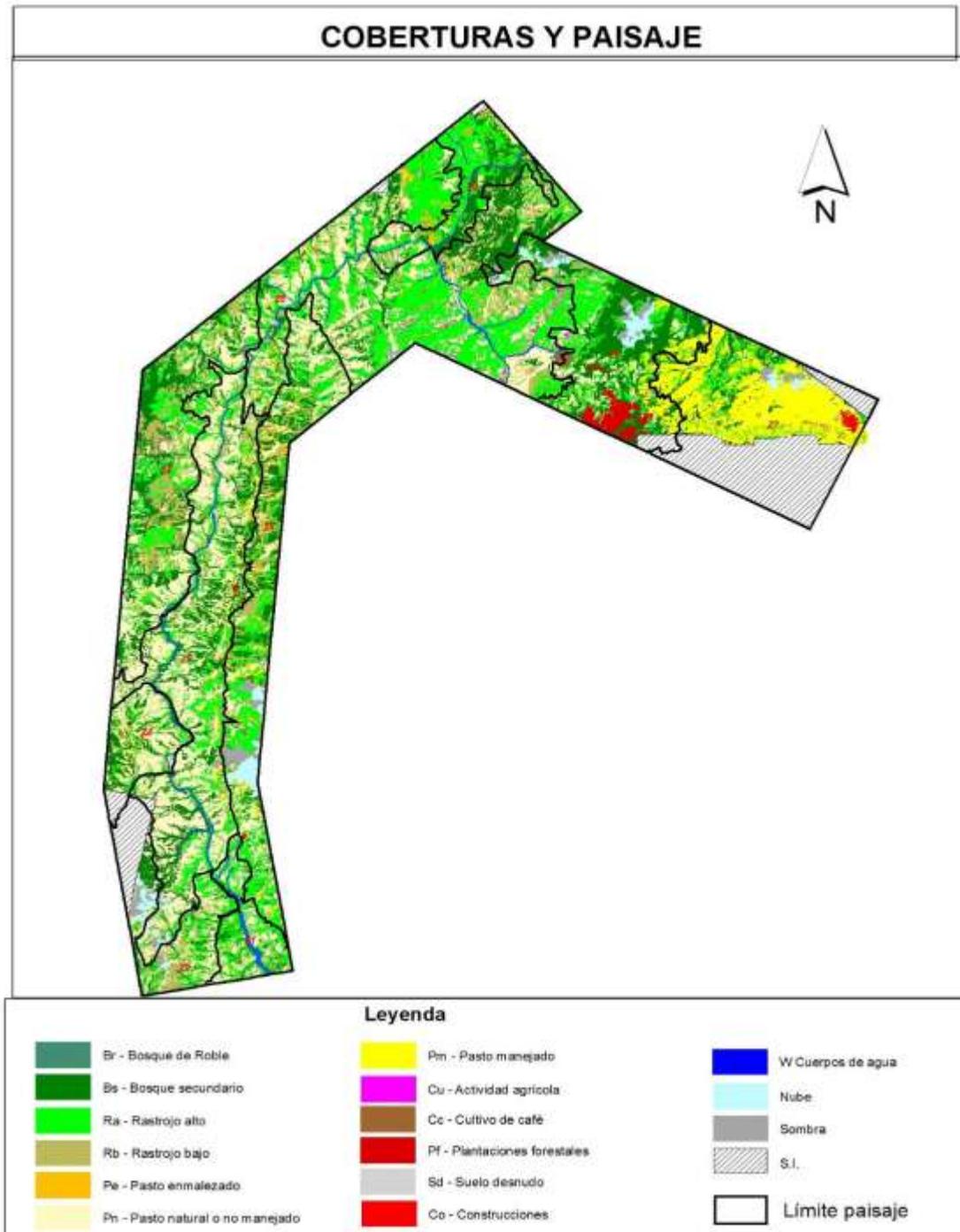
- **Análisis de Vecidad - NN_min.** Distancia media al vecino más cercano en metros, la cual se basa en el análisis entre todos los fragmentos de bosque encontrados, incluyendo el Rastrojo, lo cual mide todos los patrones de fragmento.

$$NN_min = h_{ij}$$

Este índice es igual a la distancia Euclidiana (m) al parche más cercano del mismo tipo. Se basa en el cálculo de las distancias más cortas de borde a borde (McGarigal, & Marks, 1994).

- **LPI.** Es el índice de fragmento más grande del paisaje. Es una medida que contribuye a definir la matriz dominante, y se determina a partir de la selección del fragmento de cualquier uso del suelo que tenga la mayor área. En este caso se presenta tanto en hectáreas como en porcentaje.

Figura 3.8. Zonificación ecológica y coberturas vegetales basada en la clasificación de imágenes SPOT.



- **Area Core:** Mide las zonas de borde y áreas interiores de los fragmentos. El índice CORE se define como el área, dentro de un parche, a una distancia “X” desde el borde hacia el interior (McGarigal & Marks, 1994)¹⁶. En el presente trabajo se definió un efecto de borde de 100 m dadas las condiciones de uso del suelo de la región en estudio.

$$CORE = \sum_{j=1}^n a_{ij}^c \left(\frac{1}{10.000} \right)$$

Unidades en hectáreas.

Para el cálculo de los índices se utilizó el programa Patch Analyst 3.1 © Dr. Rob Rempel, de acceso libre en internet¹⁷.

3.7.2 Resultados

3.7.2.1 Zonificación Ecológica

A continuación se describen los diferentes paisajes fisiográficos, de acuerdo con el estudio de suelos y el mapa de coberturas vegetales obtenido de la interpretación de imágenes de satélite Spot (véase la Tabla 3.22). Así mismo, de la Figura 3.9 a la Figura 3.11 se aprecia el patrón espacial encontrado tanto para clima y fisiografía, como para las coberturas vegetales y, en especial, los bosques del área de estudio. El patrón de la vegetación encontrado se presentará en la sección siguiente.

- *Paisaje Z1.* Paisaje de Colinas y superficies aluviales en clima cálido seco a muy seco. Ocupa la menor área en el territorio (2,8%), la zona colinada está conformada por pendientes cortas, convexas, cimas o ápices generalmente agudos y la superficie aluvial está caracterizada por valles intramontanos, planos y plano cóncavos correspondientes a la planicie del Río Cauca. Los suelos más representativos corresponden a las asociaciones Santa Fe y Olaya, esta última en menor proporción (véase el apartado correspondiente a los suelos para mayores detalles).
- *Paisaje Z2.* Paisaje de Montaña y Planicie del Río Cauca en un clima Cálido Húmedo. Dominando la planicie aluvial la cual está conformada por valles intramontanos, planos y plano cóncavos con materiales sedimentarios; la cual se une con la zona de montañas comprendidas por las estribaciones de la Cordillera en el Cañón del Río Cauca. Este paisaje se encuentra en baja proporción, cerca del 4,5% del área de estudio. Las asociaciones de suelos encontradas en la planicie comprenden la Asociación Olaya, y, en la zona de montaña, la Asociación Raudal.

¹⁶ McGARIGAL, K. and MARKS, B.J. Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure, Version 2.0. Corvallis: Oregon State University, 1994.

¹⁷ Patch Analyst 3.0 © Dr. Rob Rempel, <http://flash.lakeheadu.ca/~rrempe/patch/>.



Tabla 3.22 Paisajes identificados a partir del estudio de suelos y el mapa de coberturas vegetales.

TÉRMINO	FORMAS GENERALES		CARACTERÍSTICAS			NOMBRE	SÍMBOLO	ZONIFICACIÓN		
CALIDO	SUPERFICIES ALUVIALES	PLANICIE DEL RIO CAUCA	Terrazas, planas	Incisión, regresión de taludes y terrazas, escurrimiento difuso, depósitos ocasionales	Sedimentos heterogéneos y heterométricos	Cálido seco a muy seco	SOPETRAN	SP	Z1	
			Valles intramontanos, planos y plano cóncavos	Transporte, depósitos e incisión a lo largo de ríos y quebradas	Aluviones heterogéneos y heterométricos	Cálido seco a muy seco	OLAYA	OL	Z2	
	COLINAS		Pendientes cortas, convexas, cimas o ápices generalmente agudos	Escurrecimiento difuso, surcos, patas de vaca, movimientos en masa localizados	Rocas sedimentarias, arcillas, conglomeraos calcáreos o no	Cálido seco a muy seco	Asociación Santa Fe	SF	Z1	
	MONTAÑAS		Estribaciones de la Cordillera en el cañón del río Cauca, pendientes generalmente largas, ápices agudos	Escurrecimiento difuso, surcos, terracetos, movimientos en masa localizados	Rocas ígneas verdes, diabasas, andesitas	Cálido seco	Asociación Concordia	CN	Z3	
				Escurrecimiento difuso, patas de vaca, movimientos en masa localizados, algunas carcavas	Rocas sedimentarias, arcillolitas, areniscas y conglomeraos	Cálido seco a muy seco	Asociación Gemelos	GA	Z3	
				Escurrecimiento difuso, movimientos en masa localizados, pequeñas carcavas	Rocas metamórficas, esquistos	Cálido húmedo y muy húmedo	Asociación Raudal	RV	Z2	
	COLUVIOS		Pendientes cortas, convexas y plano cóncavas	Movimientos en masa, depósitos ocasionales	Coluviones y aluviones heterogéneos y heterométricos	Cálido húmedo	Asociación Calderas	CL	Z5	
			Coalecentes, pendientes generalmente largas, rectas, planoconcavas	Escurrecimiento difuso, depósitos ocasionales, movimientos en masa	Coluviones y aluviones heterogéneos y heterométricos	Cálido seco a muy seco	Asociación Tuntuna	TG	Z3 y Z5	
	TEMPLADO (MEDIO)	MONTAÑAS		Vertientes de las cordilleras, pendientes convexas, generalmente largas, ápices agudos	Escurrecimiento difuso, patas de vaca (terracetos), movimientos en masa localizados	Rocas ígneas, cuarzodioritas, granitos con cenizas volcánicas	Templado húmedo a muy húmedo	Asociación Yarumal	YA	Z5
					Escurrecimiento difuso, patas de vaca (terracetos), movimientos en masa localizados, algunas carcavas	Rocas ígneas verdes, diabasas, dioritas, basaltos	Templado húmedo a muy húmedo	Asociación Santa Barbara	SB	Z4
					Rocas sedimentarias arcillolitas, filitas y conglomerados	Templado húmedo a muy húmedo	Asociación Angelópolis	AE	Z5	
					Rocas metamórficas, esquistos	Templado húmedo a muy húmedo	Asociación Ituango	IT	Z5	
COLUVIOS		Pendientes cortas y largas, convexas y plano concavas	Escurrecimiento difuso, movimientos en masa, algunas carcavas, depósitos ocasionales	Coluviones y aluviones heterogéneos y heterométricos	Templado húmedo a muy húmedo	Asociación Poblano	PO	Z4 y Z5		
FRÍO		SUPERFICIES ALUVIALES		Valles intramontanos, de fondo plano cóncavo de la Cordillera Central	Incisión, transporte y depósito de materiales, regresión de los cauces	Aluviones heterogéneos y heterométricos, cenizas	Frío húmedo a muy húmedo	Asociación La Pulgarina	LP	Z7
	COLINAS		Masivas, ligeramente disectadas, pendientes cortas y largas, convexas, ápices planos y redondeados	Escurrecimiento difuso, surcos, patas de vaca (terracetos) pequeñas carcavas	Rocas ígneas granodioritas, granitos, cuarzodioritas, cenizas volcánicas	Frío muy húmedo	Asociación Zulaibar	ZL	Z7	
	MONTAÑAS		Vertientes de las cordilleras, pendientes rectas, convexas, generalmente largas, ápices agudos y redondeados	Escurrecimiento difuso, surcos, movimientos en masa localizados, carcavas pequeñas	Rocas ígneas verdes, diabasas, basaltos, cenizas volcánicas	Frío muy húmedo	Asociación Horizontes	HB	Z4	
				Escurrecimiento difuso, surcos, patas de vaca (terracetos), movimientos en masa localizados	Rocas metamórficas, esquistos	Frío muy húmedo	Asociación Ventanas	VC	Z6	
	COLUVIOS		Vertientes de las cordilleras, pendientes rectas, convexas, concavas, generalmente cortas	Movimientos en masa, escurrecimiento difuso, depósitos ocasionales de materiales	Coluviones y aluviones heterogéneos y heterométricos, cenizas volcánicas	Frío muy húmedo	Asociación Aldana	AL	Z7	
PÁRAMO	MONTAÑAS		Picos y partes altas de las cordilleras, pendientes rectas, convexas o cóncavas, largas o cortas, pequeños valles	Movimientos en masa, golpe de cuchara, derrumbes, depósito de material en las depresiones, surcos	Rocas plutónicas y metamórficas, cenizas volcánicas	Páramo muy húmedo	Misceláneo Rocosó	MR	Z6	



Figura 3.9. El clima en el área del Proyecto.

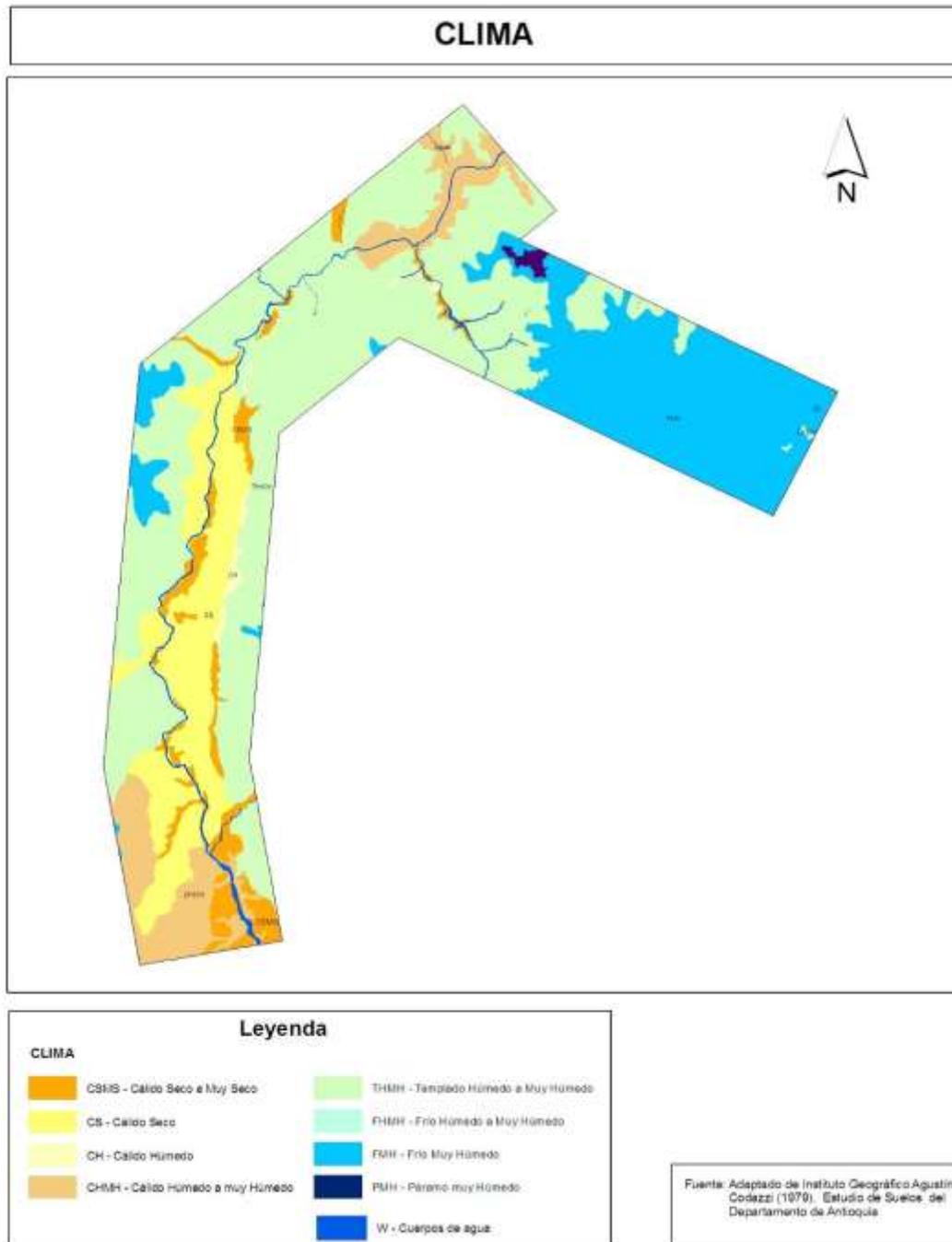


Figura 3.10. Zonificación ecológica.

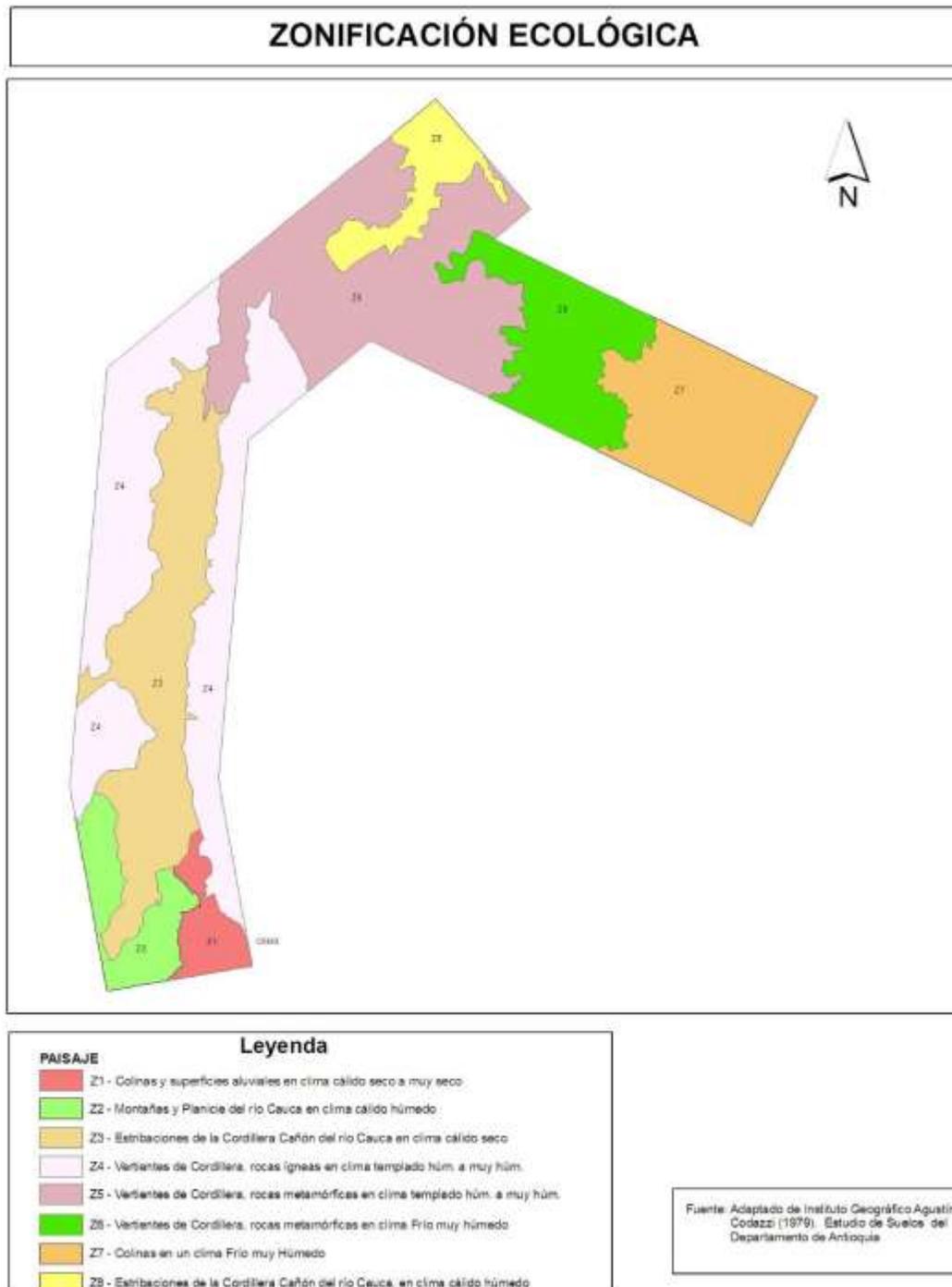
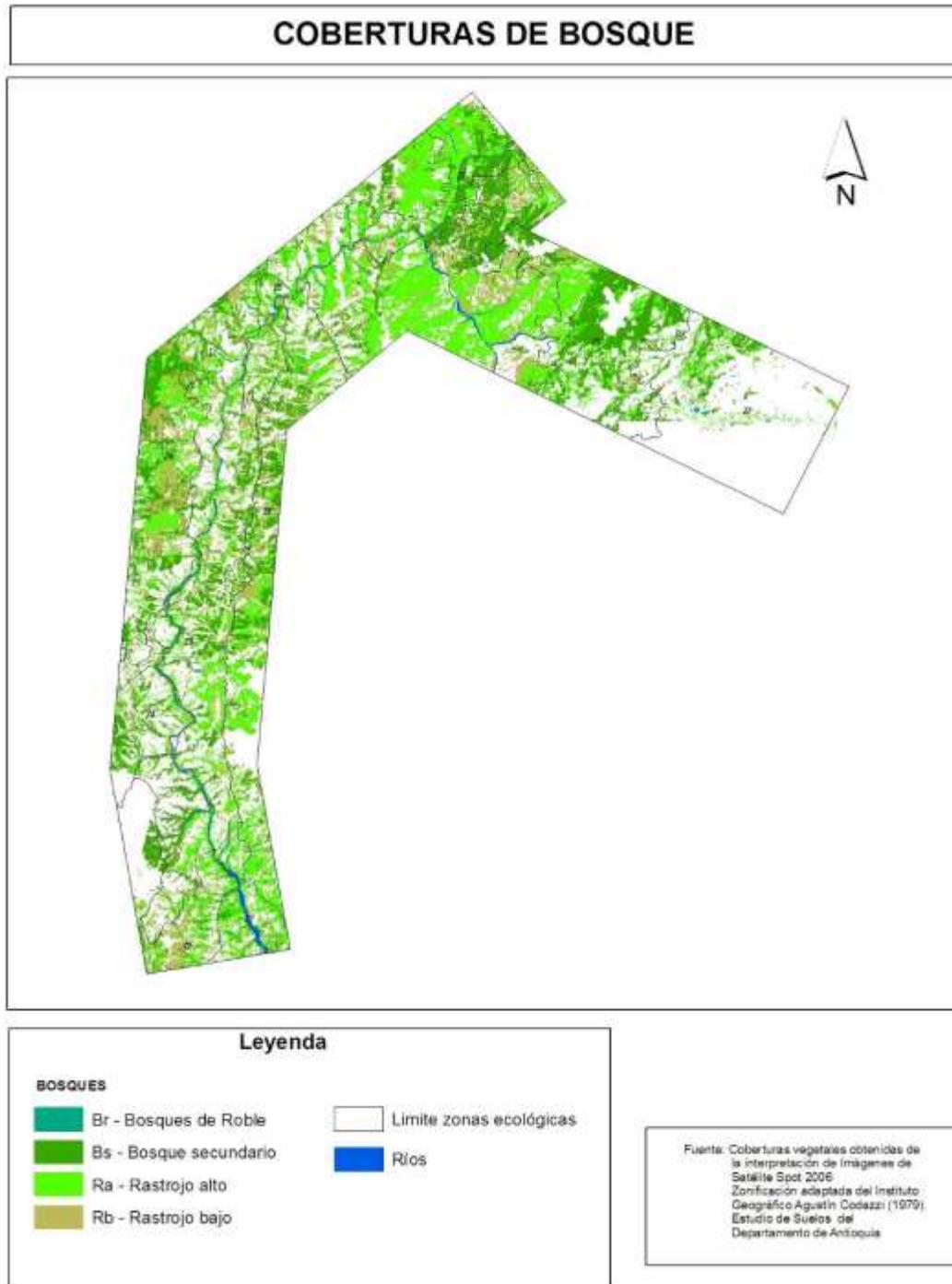




Figura 3.11. Coberturas boscosas con la delimitación de la zonificación ecológica.



- *Paisaje Z3.* Paisaje ubicado en las estribaciones de la cordillera, en clima cálido seco. Representa, aproximadamente, el 17% del área de estudio. Comprende el cañón del río Cauca, con pendientes largas y ápices agudos, constituido por rocas ígneas verdes, diabasas y andesitas, los suelos más representativos en éste paisaje corresponden a la Asociación Concordia
- *Paisaje Z4.* Ubicado en las Vertientes de la Cordillera, conformado por rocas ígneas en clima templado húmedo a muy húmedo. Con un cubrimiento en área de aproximadamente el 25%, constituye el paisaje de mayor área encontrado; se encuentra en un clima medio, en las estribaciones de la cordillera, con pendientes convexas, generalmente largas y ápices agudos, constituido por un material compuesto de rocas ígneas verdes, diabasas, dioritas y basaltos. Este paisaje está representado principalmente por la Asociación edáfica Santa Bárbara.
- *Paisaje Z5.* Paisaje ubicado en las vertientes de Cordillera, conformado por rocas metamórficas en clima Templado Húmedo a muy Húmedo. Se diferencia del anterior, principalmente, por la naturaleza del material metamórfico que lo compone e igualmente por la unidad de suelos que lo representa, constituida por la Asociación Ituango. Está presente en un 22,8% del área de estudio.
- *Paisaje Z6.* Paisaje de Vertientes de Cordillera, con rocas metamórficas en clima Frío muy Húmedo. Localizado en pisos altitudinales más elevados, y comprende las vertientes de la cordillera con pendientes rectas, convexas, generalmente largas, constituido por rocas metamórficas y esquistos. Lo integra la asociación de suelos denominada Ventanas.
- *Paisaje Z7.* Paisaje de Colinas en un clima Frío muy Húmedo. Hace parte del Altiplano de Santa Rosa, caracterizado por colinas masivas, ligeramente disectadas, pendientes cortas y largas, convexas, ápices planos y redondeados. Los materiales que lo constituyen están compuestos por rocas ígneas, granodioritas, granitos y cuarzdioritas. La Asociación Zulaibar es la más representativa. Tiene un área de 12,8% del área delimitada para el estudio.
- *Paisaje Z8.* Paisaje localizado en las estribaciones de la Cordillera, cañón del río Cauca, en clima cálido húmedo; se localiza en la zona más septentrional del proyecto, con un área de aproximadamente el 4,5%, cuyas montañas tienen pendientes convexas, generalmente largas, ápices agudos y redondeados. Está representado por la Asociación de suelos Raudal.

3.7.2.2 Caracterización de los patrones espaciales encontrados en la zonificación a partir de indicadores ecológicos del paisaje.

- **PAISAJE Z1.** Patrón de la vegetación en un Paisaje de Colinas y superficies aluviales en clima cálido seco a muy seco.

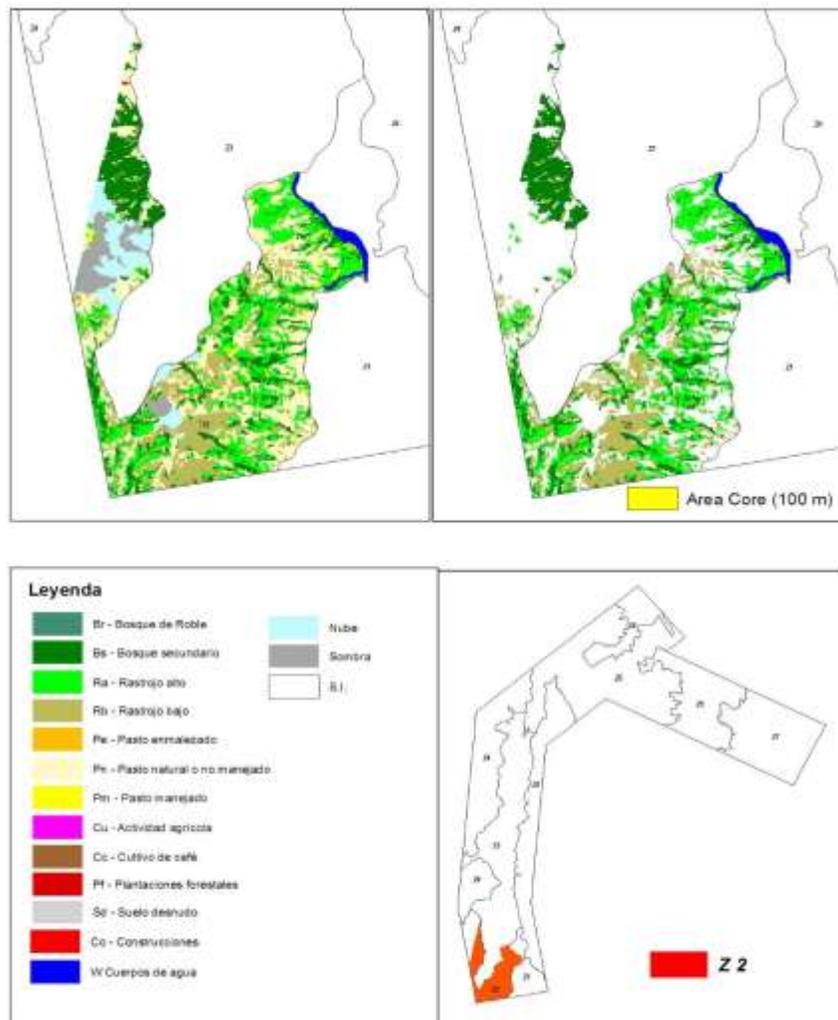
De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 3.23 y con el Patrón espacial descrito en la Figura 3.12, cerca del 55% del paisaje está representado por coberturas de Bosque Secundario, y, en mayor proporción, por Rastrojo Alto, constituyendo esta última la cobertura dominante, de acuerdo con el índice LPI, aunque sin alcanzar a representar una gran matriz.

Tabla 3.23. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z1.

CLASE	CA	%	NUMP	MPS	PSSD	MPFD	LPI	TCAI
Bosque secundario	366,7	12,54	155	2,37	6,13	1,41	1,95	8,93
Rastrojo alto	1.263,94	43,23	146	8,66	30,84	1,43	7,96	2,32
Rastrojo bajo	202,21	6,92	150	1,35	1,54	1,42	0,30	
Pasto natural	994,03	34,00	180	5,52	18,46	1,41	6,63	
Pasto manejado	93,88	3,21	81	1,16	1,21	1,41	0,28	
Construcciones	3,06	0,10	2	1,53	0,87	1,35	0,08	
TOTAL	2.923,81	100,00						

CA: Área (ha) por clase; %: porcentaje de ocupación por clase; NUMP: número de parches; MPS: tamaño medio parche; PSSD: desviación estándar del tamaño medio de los parches; MPFD: dimensión fractal media de los parches; LPI: índice del parche más grande; TCA: Area Core total para el paisaje; TCAI: índice de Area Core o interior.

Figura 3.12. Patrón espacial de la vegetación en Paisaje Z1.



Es importante observar dos aspectos que permiten considerar este paisaje como “alterado”; primero, la baja representatividad de bosques secundarios, y segundo, los valores de tamaño promedio de fragmentos para los bosques secundarios y rastrojos altos, que dan cuenta de una alta fragmentación. Sin embargo, al analizar la disponibilidad de hábitats con base en el *Area Core* (TCA), se encontraron 27,14 ha en bosque secundario y rastrojo alto, y una distancia media (MNN) entre fragmentos de 34,3 m, lo que indica ciertas potencialidades de la zona para conformar un “corredor biológico” a través de procesos de enriquecimiento de la vegetación con especies de interés.

- **PAISAJE Z2.** Patrón de la vegetación en un Paisaje de Montaña y Planicie del Río Cauca en un clima Cálido Húmedo.

El patrón de la vegetación para este paisaje se describe en la Tabla 3.24 y se ilustra en la Figura 3.13. En esta unidad se encuentra una mayor cantidad y diversidad de coberturas vegetales.

Tabla 3.24. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z2.

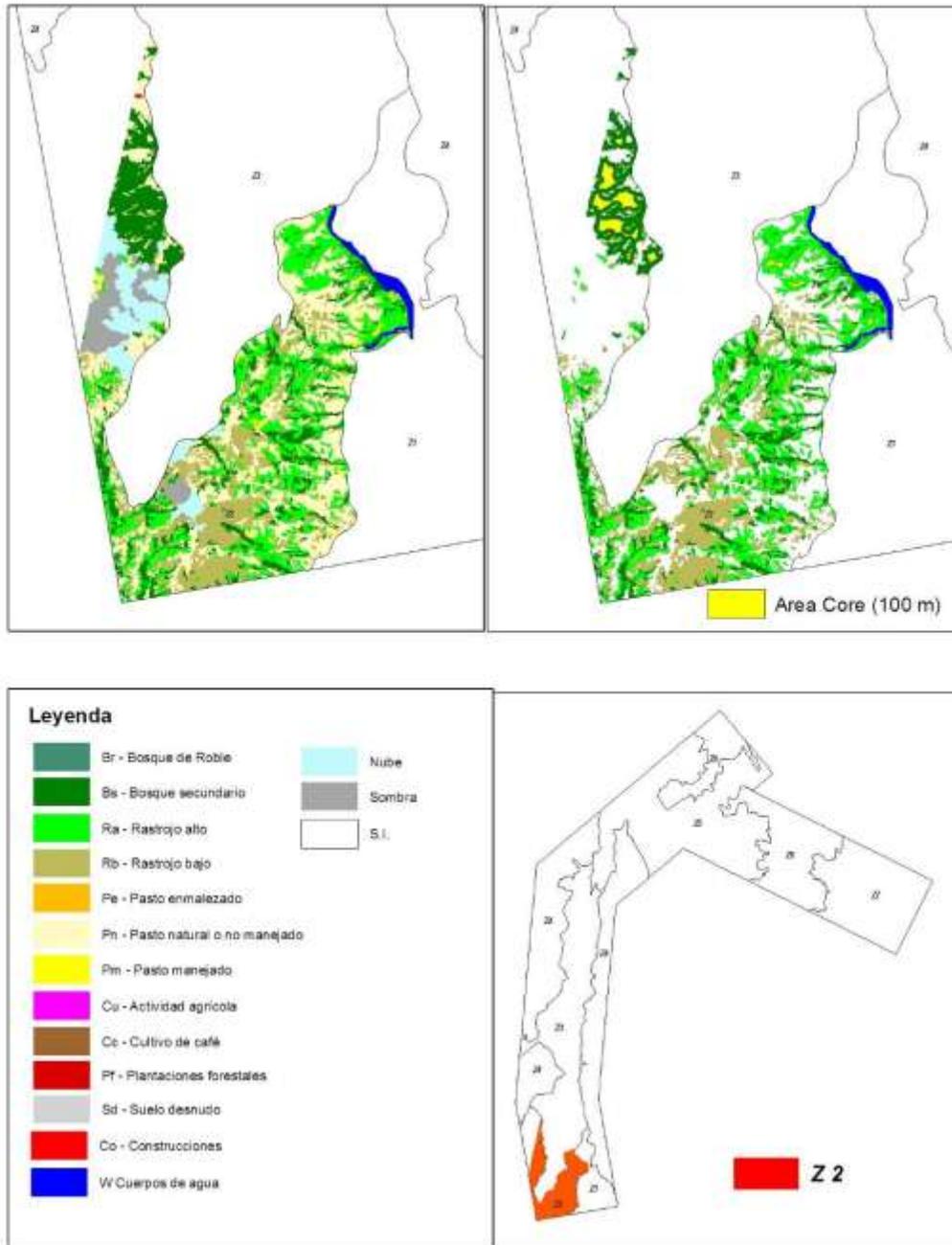
CLASE	CA	%	NUMP	MPS	PSSD	MPFD	LPI	TCAI
Bosque secundario	749,17	20,05	202	3,71	18,95	1,42	6,14	19,19
Rastrojo alto	947,21	25,35	233	4,07	12,37	1,42	3,40	4,60
Rastrojo bajo	783,04	20,96	318	2,46	12,99	1,42	5,13	
Pasto natural	1.207,64	32,32	202	5,98	16,51	1,42	3,34	
Pasto manejado	47,98	1,28	49	0,98	0,79	1,42	0,10	
Construcciones	1,38	0,04	1	1,38	0	1,36	0,03	
TOTAL	3.736,42	100,00	1.005					

CA: Área (ha) por clase; %: porcentaje de ocupación por clase; NUMP: número de parches; MPS: tamaño medio parche; PSSD: desviación estándar del tamaño medio de los parches; MPFD: dimensión fractal media de los parches; LPI: Índice del parche más grande; TCA: *Area Core* total para el paisaje; TCAI: índice de *Area Core* o interior.

Si se revisa el índice LPI, puede verse que en esta oportunidad la matriz está constituida por bosques, desde secundarios hasta rastrojos bajo. Con respecto a la calidad de hábitats, se observa un sector de bosque secundario con mayor disponibilidad áreas core o interior, 71,9 ha y una distancia media entre fragmentos de 60,2 m lo cual podría posibilitar la distribución y propagación de especies a través de este corredor.

El resultado obtenido con el índice de forma basado en la Dimensión Fractal, está reflejando el comportamiento irregular y alargado de la vegetación, que para el caso de los bosques, representa mayor exposición del fragmento a los flujos de energía que lo circundan.

Figura 3.13. Patrón espacial de la vegetación en paisaje Z2. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.



- **PAISAJE Z3.** Patrón espacial de la vegetación en un paisaje ubicado en las Etribaciones de la Cordillera, cañón del río Cauca en clima Cálido Seco (Z3).

El patrón de la vegetación para este paisaje se describe en la Tabla 3.25 y se ilustra en la Figura 3.14. De acuerdo con los resultados de área por clase de cobertura, la matriz está compuesta, en cerca del 45,86% del área, por pastos naturales o no manejados. La dominancia de esta matriz se confirma también a partir del indicador LPI que alcanza un valor de 3,76.

Tabla 3.25 Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z3.

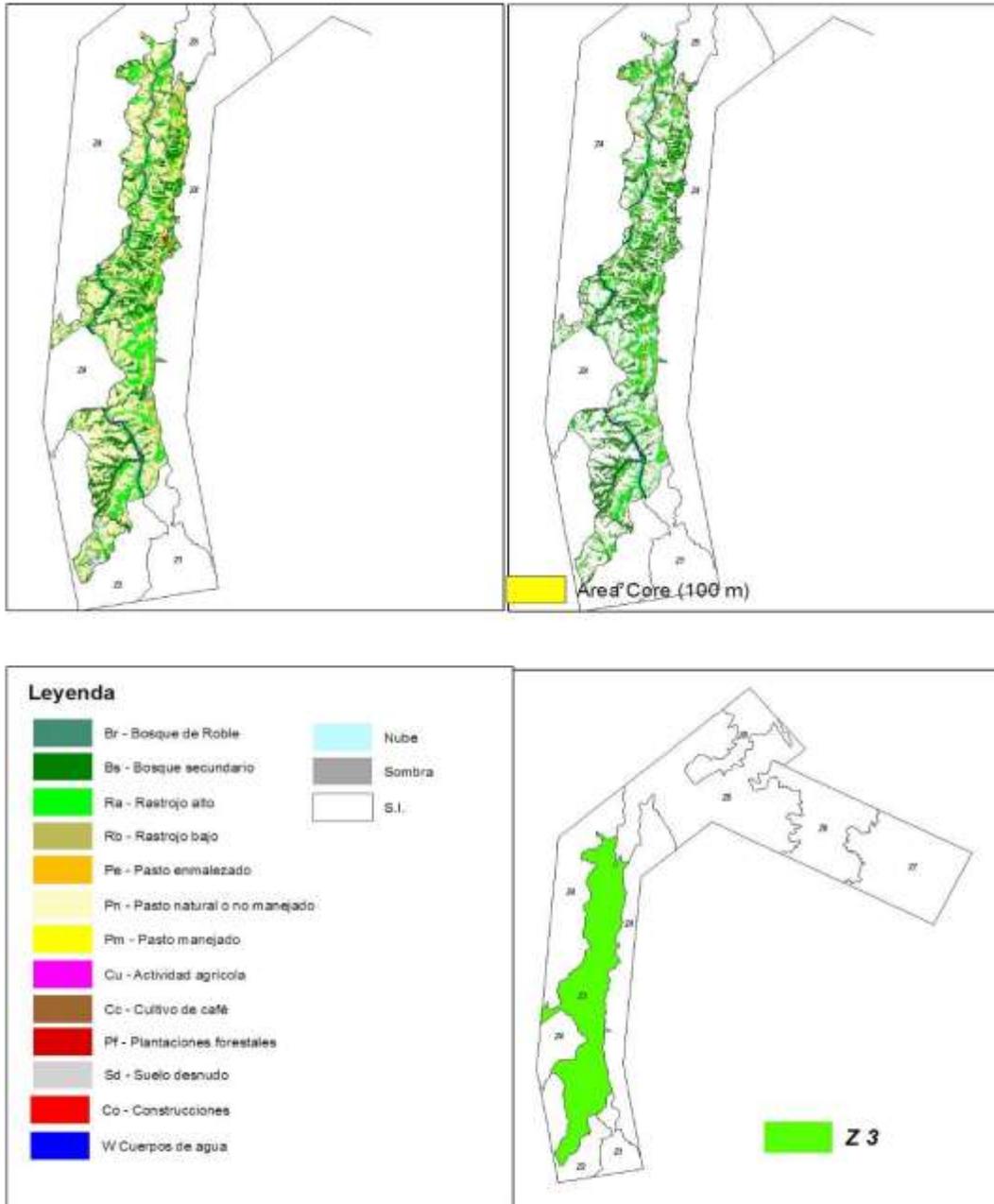
CLASE	CA	%	NUMP	MPS	PSSD	MPFD	LPI	TCAI
Bosque secundario	3457,43	18,33	514	6,73	26,69	1,42	1,94	3,32
Rastrojo alto	3644,75	19,33	1155	3,16	14,71	1,42	1,81	5,62
Rastrojo bajo	2470,67	13,1	1543	1,6	3,22	1,43	0,35	
Pasto natural	8648,76	45,86	659	13,12	50,13	1,42	3,76	
Pasto manejado	215,65	1,14	183	1,18	1,32	1,42	0,06	
Pasto enmalezado	311,39	1,65	299	1,04	1,04	1,42	0,06	
Suelo desnudo	88,84	0,47	92	0,97	0,99	1,41	0,03	
Construcciones	19,80	0,11	1	19,8	9	1,34	0,10	
TOTAL	18857,31	100	4446					

CA: Área (ha) por clase; %: porcentaje de ocupación por clase; NUMP: número de parches; MPS: tamaño medio parche; PSSD: desviación estándar del tamaño medio de los parches; MPFD: dimensión fractal media de los parches; LPI: Índice del parche más grande; TCA: *Area Core* total para el paisaje; TCAI: índice de *Area Core* o interior.

Estos resultados confirman que este paisaje ha sufrido una gran intervención humana, cuyos efectos se reflejan en la calificación obtenida para las coberturas de bosque, donde el indicador de *Area core* o corazón, expresado a través de los índices TCAI y TCA, con un valor igual a 157,39 ha, reflejan la escasa disponibilidad de hábitats que alberguen especies de interior del bosque, las cuales se caracterizan por unos mayores requerimientos de condiciones de calidad del hábitat y por comportamientos más especializados..

Si bien se presenta una buena oportunidad en la conexión de fragmentos debido a la distancia promedio obtenida de 61,5 m, se hace necesario establecer enriquecimientos de hábitats para promover el desarrollo de las *Area core*. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la presencia del río Cauca como una gran barrera natural que limita fuertemente el intercambio de algunos grupos entre las márgenes del río.

Figura 3.14. Patrón espacial de la vegetación en paisaje Z3. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.



- **PAISAJE Z4.** Patrón espacial de la vegetación en un paisaje de Vertientes de la Cordillera, conformadas por rocas ígneas en clima Templado Húmedo a Muy Húmedo.

El patrón de la vegetación para este paisaje se describe en la Tabla 3.26 y se ilustra en la Figura 3.15. Como puede observarse, estas vertientes de las cordilleras Occidental y Central, están subdivididas por el paisaje Z3 y presentan una barrera natural (el río Cauca), lo cual genera una ruptura de enlaces entre los dos sitios. La matriz dominante son los pastos naturales o no manejados, sin embargo se aprecian una mayor representatividad de bosques y probablemente una mejor disponibilidad de hábitats y de *Area core* con un área en hectáreas de 1.044,94 (índice TCAI). En la Figura 3.15 se aprecia el patrón de distribución de éstas *Area core*, donde se destaca una mayor presencia en la vertiente occidental. Este resultado, sumado a la distancia mínima promedia entre fragmentos (MNN=62,7), sugiere que esta zona ha sido un poco menos impactada que la vertiente oriental, por lo cual brindaría mejores condiciones para desarrollar programas de conservación de hábitats y fauna asociada.

Tabla 3.26 Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z4.

CLASE	CA	NUMP	MPS	PSSD	MPFD	LPI	TCAI
Bosque secundario	6405,6	950	6,74	35,68	1,41	3,07	21,53
Rastrojo alto	6.631,89	1.636	4,05	24,26	1,42	2,48	12,61
Rastrojo bajo	4.783,54	1.819	2,63	17,03	1,43	2,16	
Pasto natural	6.832,14	1.006	6,79	31,1	1,41	2,43	
Pasto manejado	261,31	193	1,35	2,2	1,41	0,08	
Pasto enmalezado	1.636,18	673	2,43	24,69	1,42	0,07	
Actividad agrícola	25,67	22	1,17	1,75	1,39	0,03	
Suelo desnudo	107,03	122	0,88	1,62	1,41	0,07	
Construcciones	15,77	1	15,77	0	1,29	0,06	
Total	26.699,13	6.422					1.044,94

CA: Área (ha) por clase; %: porcentaje de ocupación por clase; NUMP: número de parches; MPS: tamaño medio parche; PSSD: desviación estándar del tamaño medio de los parches; MPFD: dimensión fractal media de los parches; LPI: Índice del parche más grande; TCA: *Area Core* total para el paisaje; TCAI: índice de *Area Core* o interior.

- **PAISAJE Z5.** Patrón espacial de la vegetación en un paisaje de Vertientes de Cordillera, conformado por rocas metamórficas en clima Templado Húmedo a muy Húmedo.

El patrón de la vegetación para este paisaje se describe en la Tabla 3.27 y se ilustra en la Figura 3.16, la cual presenta una matriz dominada por rastrojos altos (LPI = 9,98), con una alta presencia de bosques secundarios. Sin embargo, esta unidad exhibe una elevada fragmentación, como se refleja en los indicadores MPS y PSSD. Estos indicadores, junto con el TCA de 2.983,93 ha y la MNN (56,3 m), le confieren a este paisaje valores importantes de calidad biótica.

Figura 3.15 Patrón espacial de la vegetación en un paisaje Z4. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.



Figura 3.16. Patrón espacial de la vegetación en paisaje Z5. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.

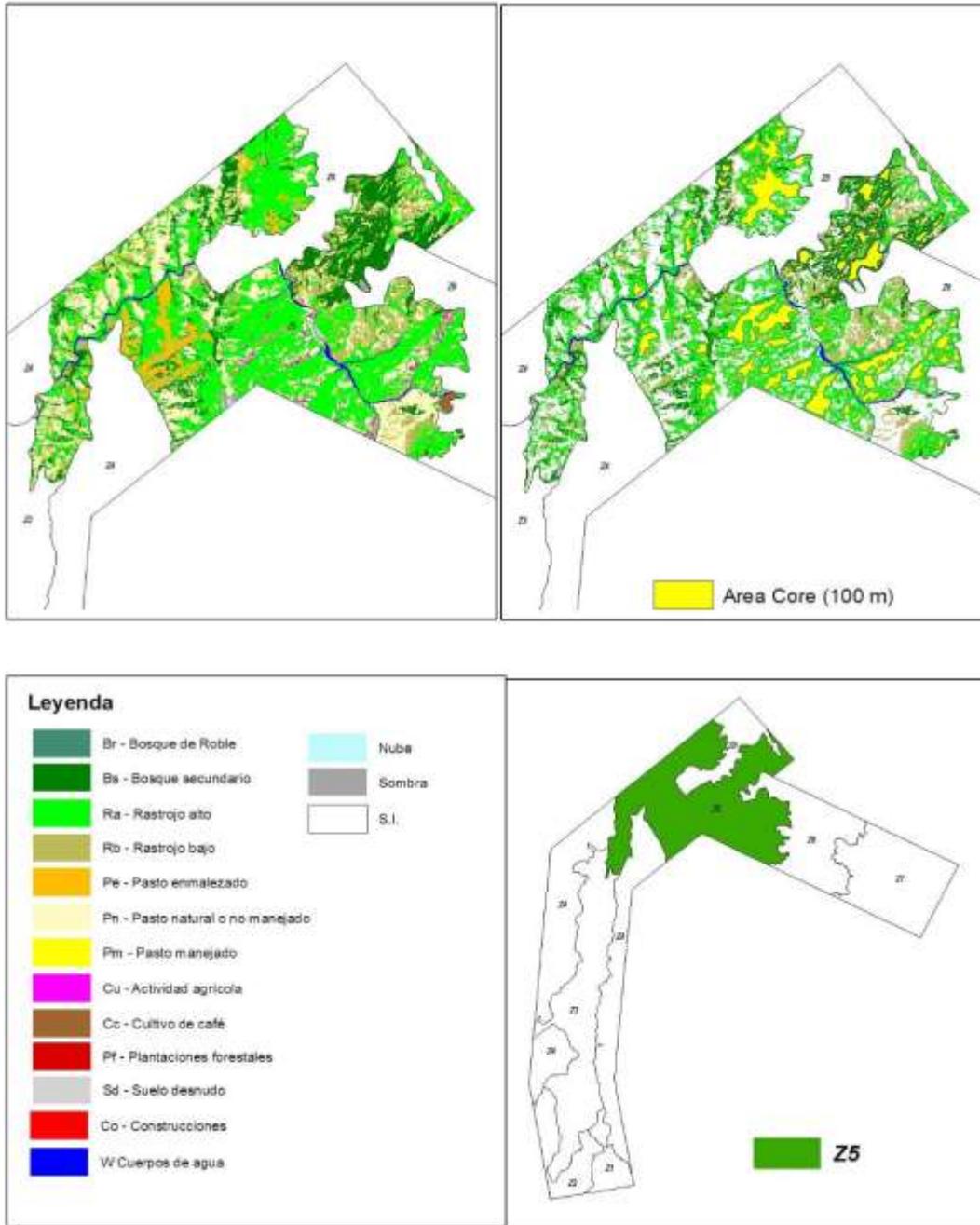


Tabla 3.27. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z5.

CLASE	CA	NUMP	MPS	PSSD	MPFD	LPI	TCAI
Bosque secundario	3.698,27	594	6,23	54,70	1,41	4,96	20,49
Rastrojo alto	10.413,84	1.031	10,10	103,19	1,42	9,98	28,05
Rastrojo bajo	3.760,65	1.483	2,54	11,51	1,42	1,48	
Pasto natural	5.715,95	1.118	5,11	24,24	1,41	2,23	
Pasto manejado	8,68	12	0,72	0,35	1,41	0,01	
Pasto enmalezado	1.343,58	411	3,27	27,84	1,42	2,15	
Actividad agrícola	181,64	110	1,65	1,89	1,41	0,05	
Cultivo de café	81,00	10	8,10	20,60	1,35	0,27	
Suelo desnudo	81,97	57	16,15	3,62	1,40	0,08	
Construcciones	1,02	1	1,02	0,00	1,39	0,00	

CA: Área (ha) por clase; %: porcentaje de ocupación por clase; NUMP: número de parches; MPS: tamaño medio parche; PSSD: desviación estándar del tamaño medio de los parches; MPFD: dimensión fractal media de los parches; LPI: Índice del parche más grande; TCA: *Area Core* total para el paisaje; TCAI: índice de *Area Core* o interior.

- **PAISAJE Z6.** Patrón espacial de la vegetación en un paisaje de de Vertientes de Cordillera, con rocas metamórficas en clima Frío muy Húmedo.

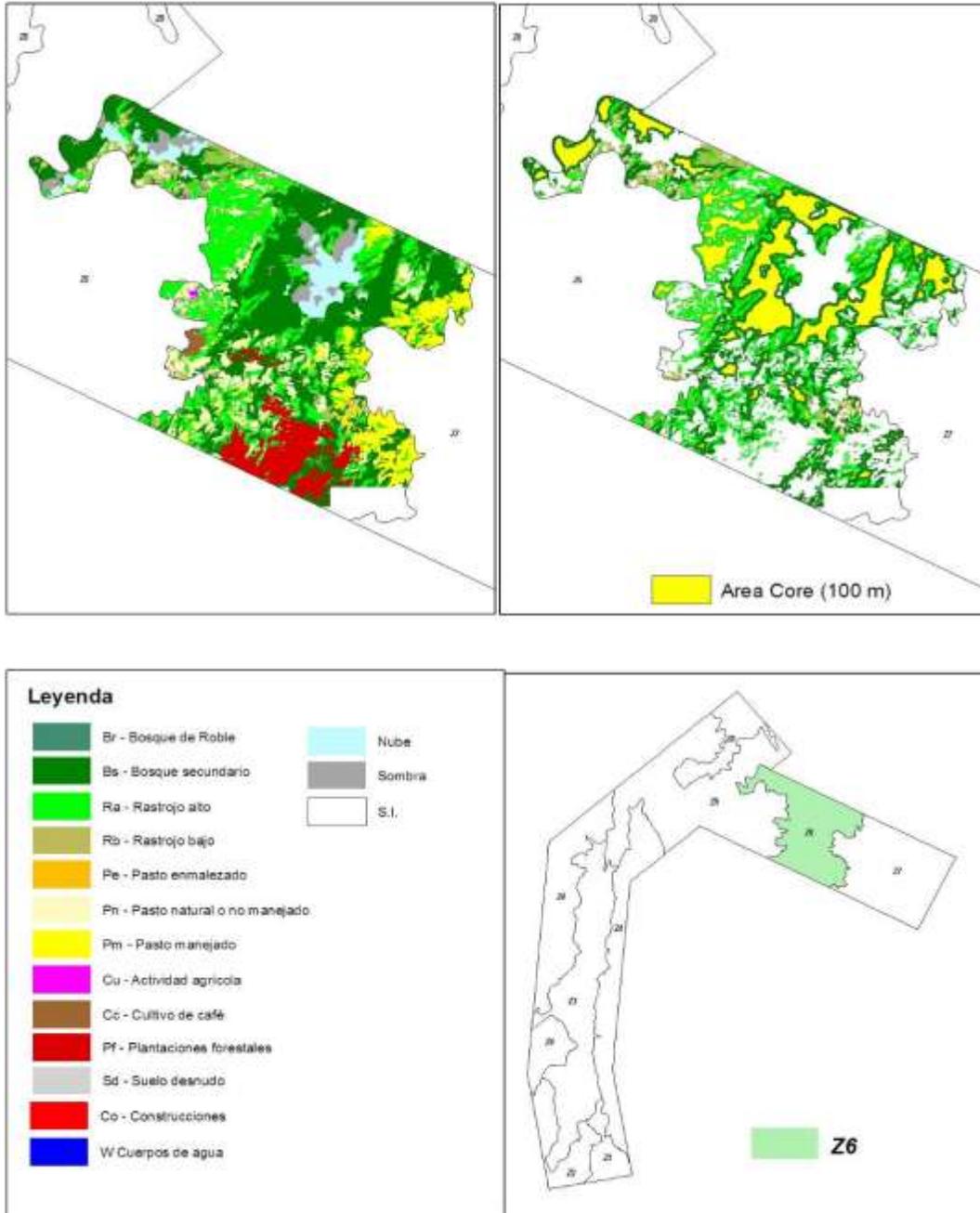
El patrón de la vegetación para este paisaje de vertiente en clima frío muy húmedo se describe en la Tabla 3.28 y se ilustra en la Figura 3.17. Está dominado por una matriz de bosque secundario, que de acuerdo con los indicadores obtenidos (MNN = 1622,95, entre otros), lo clasifica como un importante corredor de biodiversidad. Se observa que estos bosques están localizados en la zona alta de montaña, y que presentan fragmentos con *Area core* o de interior de mayor extensión e interés que los otros paisajes analizados.

Tabla 3.28. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z6.

CLASE	CA	NUMP	MPS	PSSD	MPFD	LPI	TCAI
Bosque de Roble	0,73	1	0,73	0,00	1,33	0,01	45,25
Bosque secundario	4063,05	227	17,90	148,26	1,41	20,08	27,93
Rastrojo alto	2466,08	510	4,84	35,83	1,43	6,88	
Rastrojo bajo	465,63	179	2,60	6,78	1,41	0,70	
Pasto natural	1163,81	300	3,88	12,00	1,41	1,04	
Pasto manejado	1003,84	124	8,10	39,51	1,41	2,88	
Pasto enmalezado	8,00	11	0,73	0,42	1,41	0,02	
Actividad agrícola	25,00	27	0,93	1,33	1,39	0,07	
Cultivo de café	69,38	7	9,91	22,57	1,38	0,57	
Plantación forestal	841,86	29	29,03	109,52	1,41	5,24	
Suelo desnudo	8,35	7	1,19	1,33	1,42	0,04	

CA: Área (ha) por clase; %: porcentaje de ocupación por clase; NUMP: número de parches; MPS: tamaño medio parche; PSSD: desviación estándar del tamaño medio de los parches; MPFD: dimensión fractal media de los parches; LPI: Índice del parche más grande; TCA: *Area Core* total para el paisaje; TCAI: índice de *Area Core* o interior

Figura 3.17. Patrón espacial de la vegetación en paisaje Z6. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.



- **PAISAJE Z7.** Patrón espacial de la vegetación en un paisaje de Colinas en un clima Frío muy Húmedo

El patrón de la vegetación está caracterizado por una amplia matriz de pastos manejados para la producción lechera del altiplano de Santa Rosa, con una dominancia muy marcada que alcanza el 71% del área total (LPI=61,55) (véase la Tabla 3.29). Como se observa en la Figura 3.18, las coberturas boscosas están relegadas a estrechas “Cejas de montaña” o a las zonas de drenaje, con *Areas Core* muy bajas (TCA=40,64 ha),

Tabla 3.29. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z7.

CLASE	CA	NUMP	MPS	PSSD	MPFD	LPI	TCAI
Bosque de Roble	45,83	10,00	4,58	4,64	1,37	0,18	8,92
Bosque secundario	973,63	204,00	4,77	14,26	1,41	1,70	6,08
Rastrojo alto	977,45	362,00	2,70	10,46	1,43	1,96	0,35
Rastrojo bajo	18,01	4,00	4,50	6,84	1,41	0,19	
Pasto natural	151,54	132,00	1,15	1,39	1,42	0,11	
Pasto manejado	5.770,95	224,00	25,76	286,80	1,41	61,55	
Actividad agrícola	0,26	1,00	0,26	0,00	1,55	0,00	
Plantación forestal	35,10	36,00	0,97	1,14	1,46	0,06	
Construcciones	143,42	5,00	28,68	55,80	1,40	1,65	

CA: Área (ha) por clase; %: porcentaje de ocupación por clase; NUMP: número de parches; MPS: tamaño medio parche; PSSD: desviación estándar del tamaño medio de los parches; MPFD: dimensión fractal media de los parches; LPI: Índice del parche más grande; TCA: *Area Core* total para el paisaje; TCAI: índice de *Area Core* o interior.

- **PAISAJE Z8.** Patrón espacial de la vegetación en un localizado en las Estribaciones de la Cordillera, Cañón del Río Cauca, en clima Cálido Húmedo.

En la Figura 3.19 y la Tabla 3.30 se aprecia que el patrón de distribución de la vegetación está dominado por una matriz de rastrojos altos y bosques secundarios, con áreas de interior o *Area core* que brindan una mejor calidad biótica a las especies. De acuerdo con la distribución espacial y la distancia promedio entre los fragmentos, este paisaje constituye un corredor que podría enriquecerse con especies de interés dentro de los programas de manejo de hábitats.

Figura 3.18. Patrón espacial de la vegetación en paisaje Z7. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.

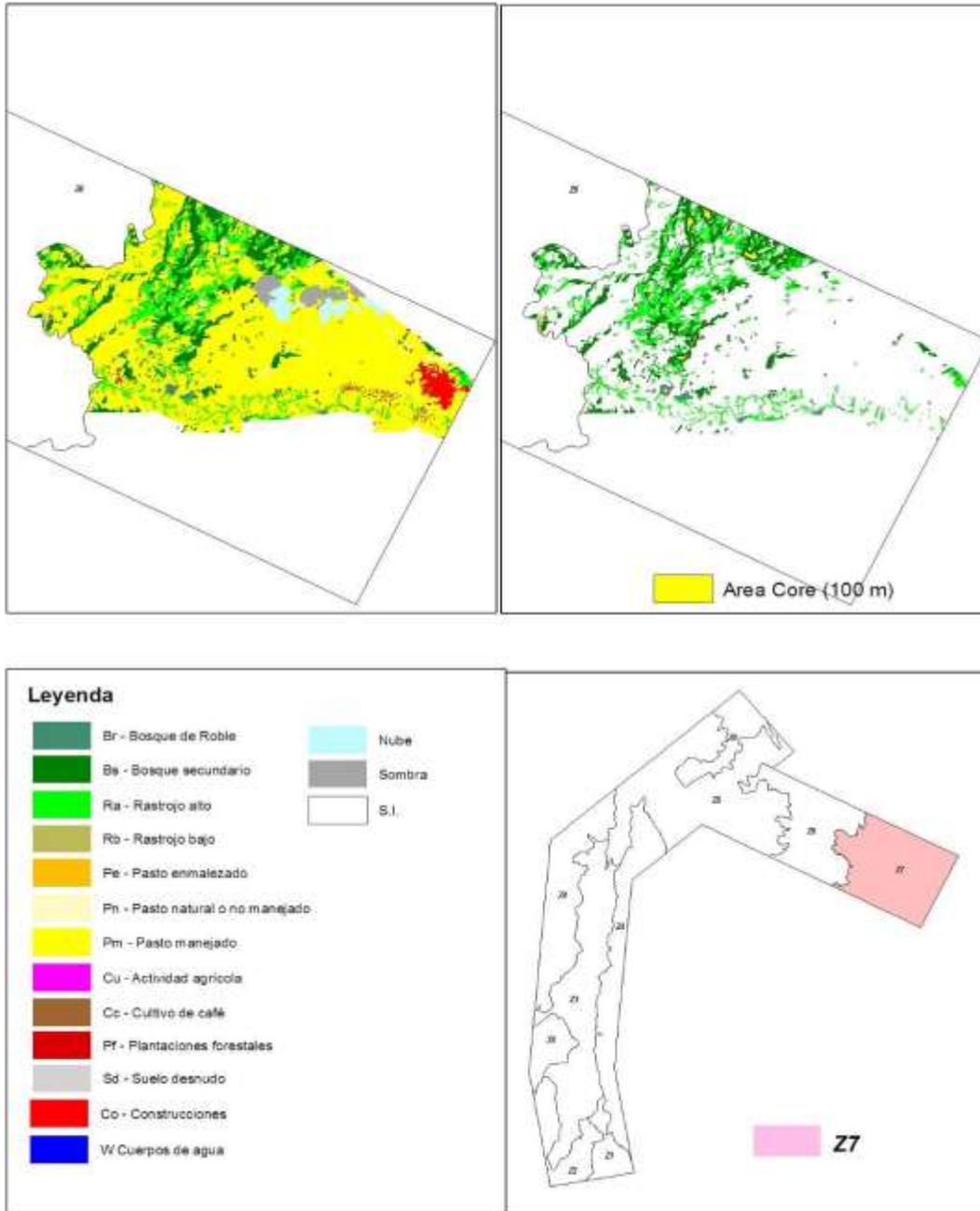
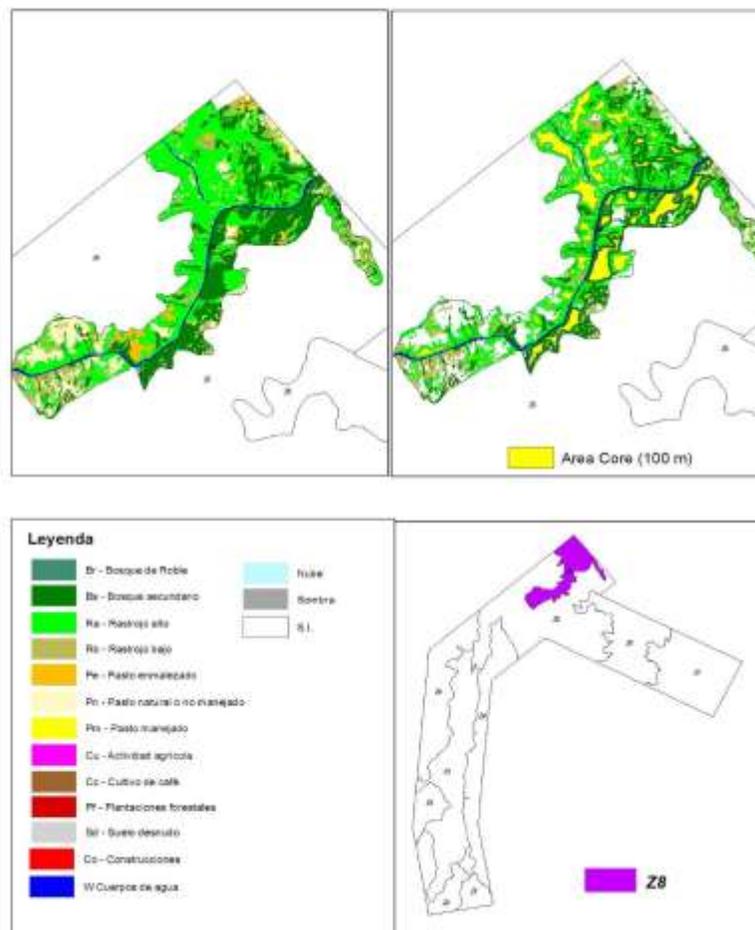


Tabla 3.30. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z8.

CLASE	CA	NUMP	MPS	PSSD	MPFD	LPI	TCAI
Bosque secundario	1451,53	151,00	9,61	64,65	1,42	15,22	22,32
Rastrojo alto	2132,15	179,00	11,91	79,01	1,41	19,94	23,04
Rastrojo bajo	488,35	212,00	2,30	4,91	1,41	0,75	
Pasto natural	657,53	175,00	3,76	11,88	1,41	2,21	
Pasto manejado	1,73	4,00	0,43	0,15	1,41	0,01	
Pasto enmalezado	193,32	66,00	2,93	8,87	1,42	1,34	
Suelo desnudo	0,74	2,00	0,37	0,07	1,43		

CA: Área (ha) por clase; %: porcentaje de ocupación por clase; NUMP: número de parches; MPS: tamaño medio parche; PSSD: desviación estándar del tamaño medio de los parches; MPFD: dimensión fractal media de los parches; LPI: Índice del parche más grande; TCAI: para el paisaje; TCAI: índice de Area Core o interior,

Figura 3.19. Patrón espacial de la vegetación en un paisaje Z8. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.



3.8 HIDROLOGÍA

A continuación se presentan un resumen de los análisis y resultados desde el punto de vista de caudales y niveles en el río Cauca. Dichos resultados se basan en la información secundaria oficial suministrada por el IDEAM, los cuales permiten describir las condiciones actuales del entorno sin proyecto. El objetivo principal de este estudio es predecir el impacto sobre la evolución que se espera, dadas las características encontradas. El estudio completo se presenta en el Anexo 3.1, que hace parte del Informe Técnico de la Complementación de la Factibilidad Técnica, Económica y Ambiental del proyecto hidroeléctrico Ituango

3.8.1 Información disponible y metodología empleada

En los Planos F-PHI-HYS-LB-AA-SEC, F-PHI-HYS-LB-AB-SEC, F-PHI-HYS-LB-RE-CU1, F-PHI-HYS-LB-RE-CU1CU2, se presentan la ubicación espacial de las estaciones seleccionadas con respecto al sitio de proyecto, así como las cuencas principales y algunas secciones del río Cauca.

La información hidroclimatológica para el estudio fue adquirida en el IDEAM y complementada con algunos registros disponibles en INTEGRAL utilizados en estudios anteriores del Proyecto Hidroeléctrico Pescadero - Ituango. Dicha información comprende registros de caudales y niveles de las estaciones hidrométricas La Virginia, La Pintada, Puente Iglesias, Bolombolo, Cañafisto, Pescadero, Valdivia, Apaví, La Coquera, Margento y Las Flores ubicadas a lo largo del río Cauca.

El análisis de caudales y niveles se hizo sobre los registros históricos disponibles en el IDEAM y con la base de datos hidrológica de INTEGRAL S.A para las estaciones seleccionadas en el estudio; algunos de los análisis se hicieron para estaciones desde la fecha de su instalación y otros sobre la serie histórica depurada de valores diarios de caudales (años 1984 -2000). En la Tabla 3.31 se presentan algunas de las características básicas de las estaciones, referenciadas desde el sitio de presa.

Los datos de caudales recopilados fueron analizados con el propósito de validar la información y complementar algunos registros faltantes, especialmente los referentes a caudales medios diarios.

Inicialmente se evaluaron las series de caudales, y los datos faltantes se completaron con ecuaciones establecidas en el estudio de Restricciones Ambientales (ERA, véase Anexo 3.2) desarrollado en el año 2004 entre las estaciones adyacentes. Una vez obtenida la serie completa de caudales, se procedió a verificar la coherencia en las series, identificando los datos espurios mediante correlaciones entre estaciones adyacentes, histogramas de rendimiento y promedios anuales de caudales. La escasez de información de caudales medios diarios procesada recientemente por el IDEAM (del año 2003 en adelante) y las inconsistencias encontradas en los datos de algunas estaciones (para los años 2001 y 2002) hizo que se optara por no completar la serie con registros adicionales.



Tabla 3.31 Características generales de las estaciones

Código	Nombre	Área de drenaje (Km ²)	Distancia desde el punto de referencia (Km.)	Elevación (msnm)
2617703	La Virginia	22 605	-317	900
2618711	La Pintada	27 175	-189	600
2620703	Puente Iglesias	29 890	-172	570
2620708	Bolombolo	31 730	-146	515
2621705	Cañafisto	33 110	-93	466
2623705	Pescadero	36 240	-7,9	425
N/A	Sitio de Presa	36 820	-0,5	220
2623704	Valdivia	38 280	37	129
2624703	Apaví	38 930	65	102
2624702	La Coquera	41 400	137	49
2502705	Margento	41 870	176	45
2502727	Las Flores	56 590	203	40

Notas:

- El código corresponde al asignado por el IDEAM
- El punto de referencia asumido es la desembocadura del río Ituango que esta a unos 500 m aguas abajo el eje de la presa seleccionado en el estudio de factibilidad. La distancia negativa quiere decir que el sitio o la estación está ubicado aguas arriba del punto de referencia.
- La elevación corresponde a la cota oficial que tiene el IDEAM para las estaciones, según las tablas donde se registra la información. Estos datos difieren un poco con los niveles de agua medio reales.

Luego del análisis anterior y teniendo en cuenta que en la estación Pescadero los caudales diarios suministrados por el IDEAM, corresponden a registros a partir del año 1984, se decidió utilizar como periodo de análisis de caudales diarios existentes o complementados desde el año de 1984 al año 2000, lo que representa 17 años continuos de información, los cuales permiten caracterizar el comportamiento hidrológico del río y evaluar el impacto del proyecto sobre el régimen de caudales.

3.8.2 Caudales medios característicos

Teniendo como base los registros de caudales diarios disponibles entre los años 1984 y 2000 para las distintas estaciones limnigráficas, se llevó a cabo una caracterización de cada estación en la cual se analizaron: caudales medios multimensuales, caudales medios, máximos y mínimos para cada uno de los años y curva de duración de caudales. De este análisis se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 3.32 y que se muestran de la Figura 3.20 a la Figura 3.22.



Tabla 3.32 Caudales característicos del río Cauca para el período 1984-2000

Parámetro	Caudal para cada estación (m ³ /s)							
	La pintada	Cañafisto	Pescadero	Valdivia	Apaví	La Coquera	Margento	Las Flores
Máximo promedio diario	2.640	3.327	3.446	3.478	3.514	3.729	3.767	5.622
Media de máximos promedio diario	1.597	2.102	2.162	2.236	2.427	2.576	2.569	3.856
Promedios	667	908	994	1069	1.163	1.336	1.424	2.298
Media de mínimos	242	366	461	534	584	687	712	1.102
Q (50%)	590	809	888	973	1079	1258	1348	2273
Media mes seco	417	632	728	855	950	1016*	1067*	1526*
Media mes caudaloso	928	1236	1317	1416	1544	1711	1822	2954

Notas:

- Los datos característicos se obtuvieron de la serie de caudales medios diarios registrados y depurados para el periodo de 1984 al año 2000.
- La media del mes caudaloso, corresponde al valor medio multianual del mes de noviembre, que se caracteriza por ser el de mayor caudal medio en el año; y la media del mes seco, corresponde al registro medio multianual del mes de agosto para las estaciones de La Pintada, Cañafiso, Pescadero, Valdivia y Apaví el cual coincide con el período seco de la parte alta de la cuenca, mientras que para las estaciones de La Coquera, Margento y Las Flores corresponde al mes de febrero, el cual coincide con el período seco de la parte baja de la cuenca.
- Q50%: corresponde al valor del caudal con probabilidad de excedencia del 50% leída de la curva de duración de caudales.

De otra parte, es importante precisar que aunque para las curvas de frecuencia se hicieron ajustes estadísticos con varias distribuciones como Normal, Log-Normal, Pearson, Log-Pearson, Gumbel y Log Gumbel, finalmente se seleccionó la que mejor ajuste gráfico mostrara; y se destaca porque como se estableció en el alcance de este estudio, las crecientes que tienen mayor importancia en el análisis corresponden a las crecientes de períodos de retorno relativamente bajas (menores a 5 años) en donde el ajuste de cualquier análisis probabilístico genera el mismo resultado.

Figura 3.20. Hidrógrafas típicas del río Cauca

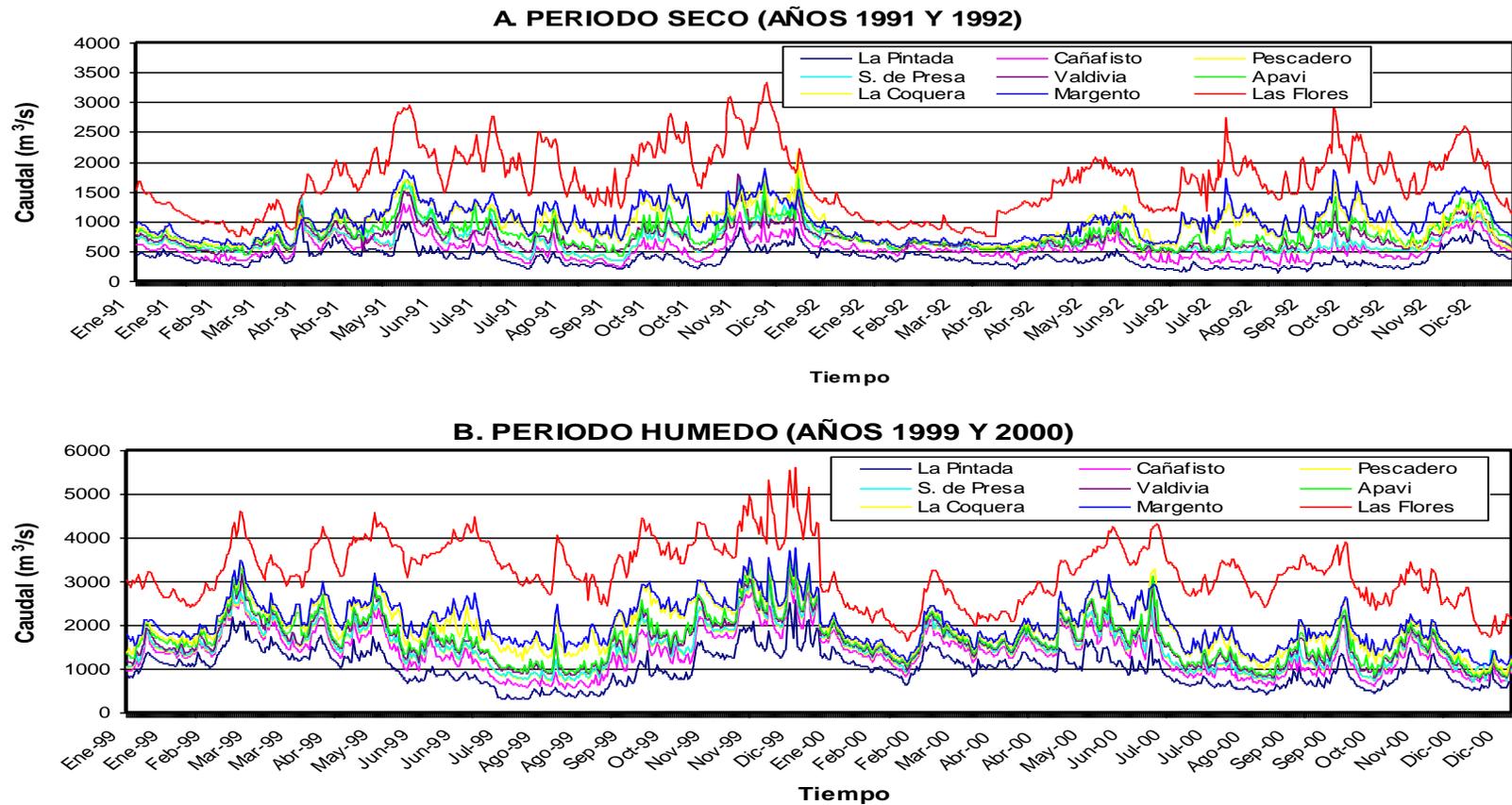


Figura 3.21. Caudales medios diarios característicos del río Cauca

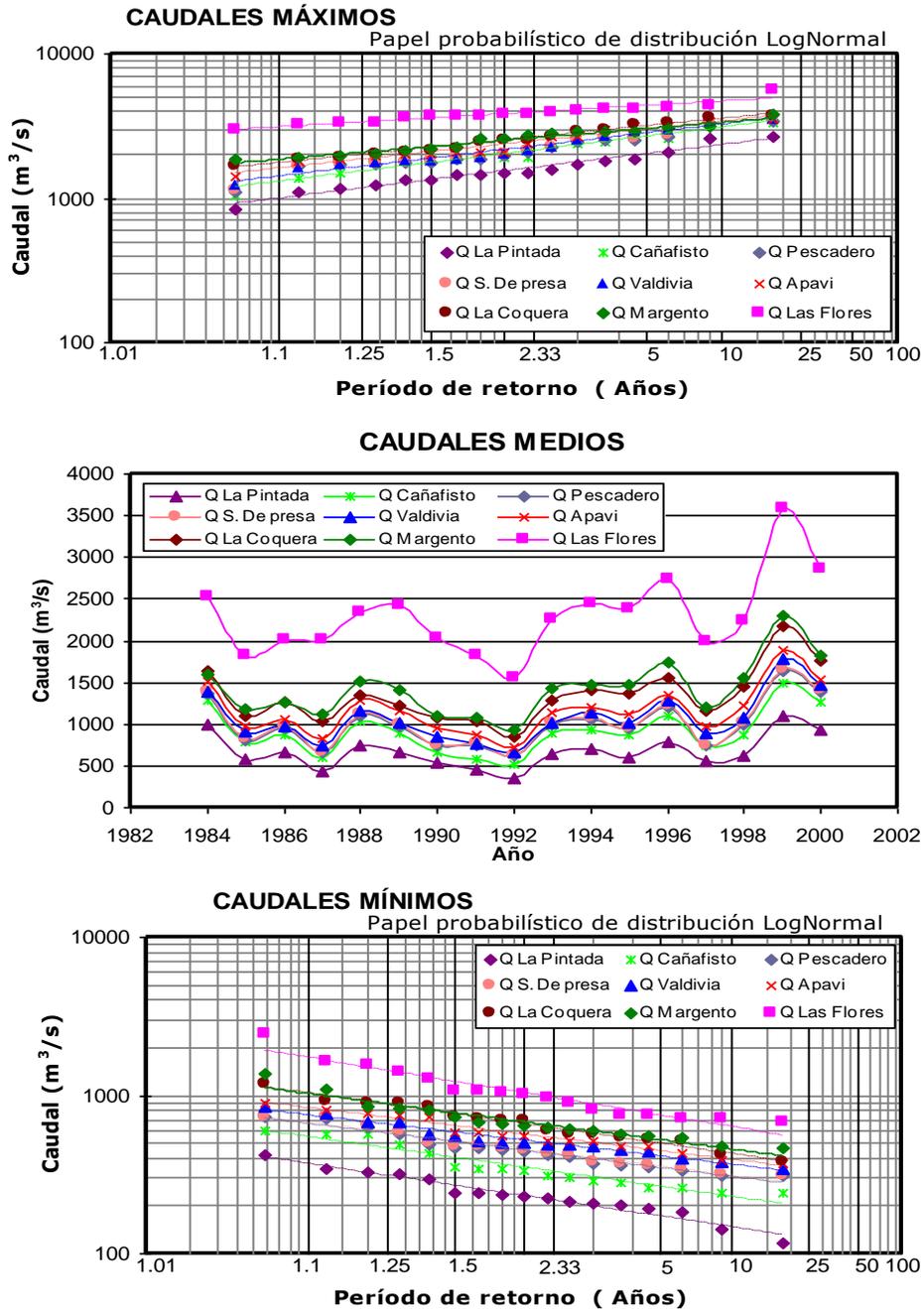
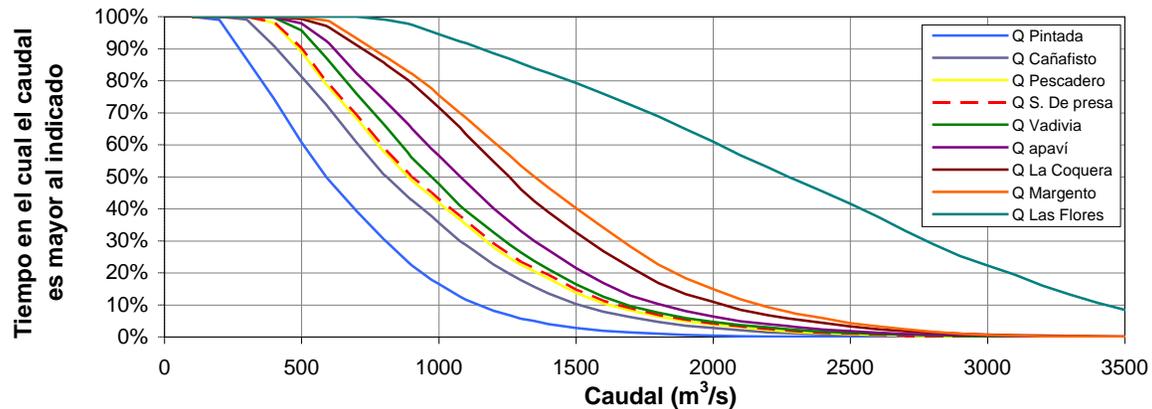


Figura 3.22. Curvas de duración de Caudales del río Cauca

Para obtener una idea general del comportamiento de los caudales medios diarios a lo largo del río Cauca, y determinar los caudales característicos generales, se analizaron los histogramas de caudales máximos, medios y mínimos para el período de información depurada, cuyos resultados se presentan en la Figura 3.23. De igual manera, se hizo una caracterización de los caudales medios anuales y mensuales para este mismo período de información, cuyo resultado se presenta en la Figura 3.25.

De los resultados obtenidos en el análisis de caudales, se puede analizar y concluir lo siguiente:

- Al comparar los caudales característicos mostrados en la Figura 3.23, se observa que para el caso de los valores medios y mínimos existe un incremento a medida que la cuenca de drenaje se hace más grande, situación que no ocurre con los caudales máximos, esto debido a los desbordamientos que presenta el río en épocas de creciente que atenúan los caudales pico por efecto del amortiguamiento natural que genera la anegación de zonas inundables o de desbordamiento del cauce principal. Este fenómeno se ve mucho más acentuado al comparar los registros de las estaciones La Coquera y Margento, donde la media de los caudales picos alcanza a disminuir por el efecto del amortiguamiento.
- Al observar la Figura 3.24 se aprecia como los caudales medios anuales del río Cauca son un fiel reflejo de los fenómenos de La Niña y El Niño en Colombia; es así como se aprecia que en la década de los ochenta y noventa, el año de mayor caudal medio corresponde a 1999, mientras que el más seco fue el año 1992, correspondientes a los años Niña y Niño más fuertes en los últimos años.
- A nivel mensual se observan dos temporadas de caudales altos y bajos en el río Cauca. Las mayores sequías se dan en los primeros meses del año y el veranillo se observa en el mes de agosto. Las épocas de creciente están repartidas entre los meses de mayo - junio y octubre - noviembre; según se observa en el primer esquema de la Figura 3.24.

Figura 3.23 Histogramas de caudales Característicos del río Cauca

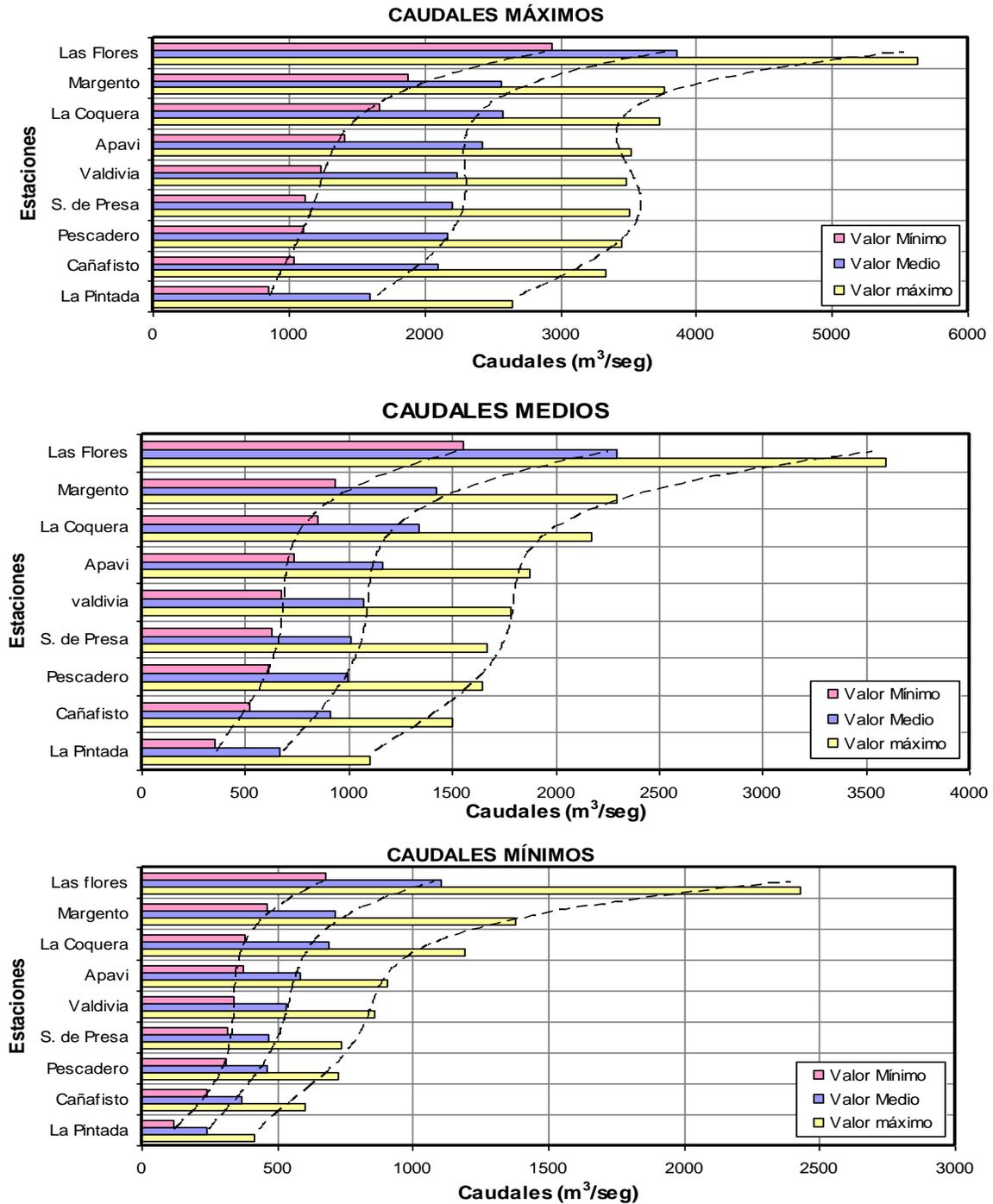
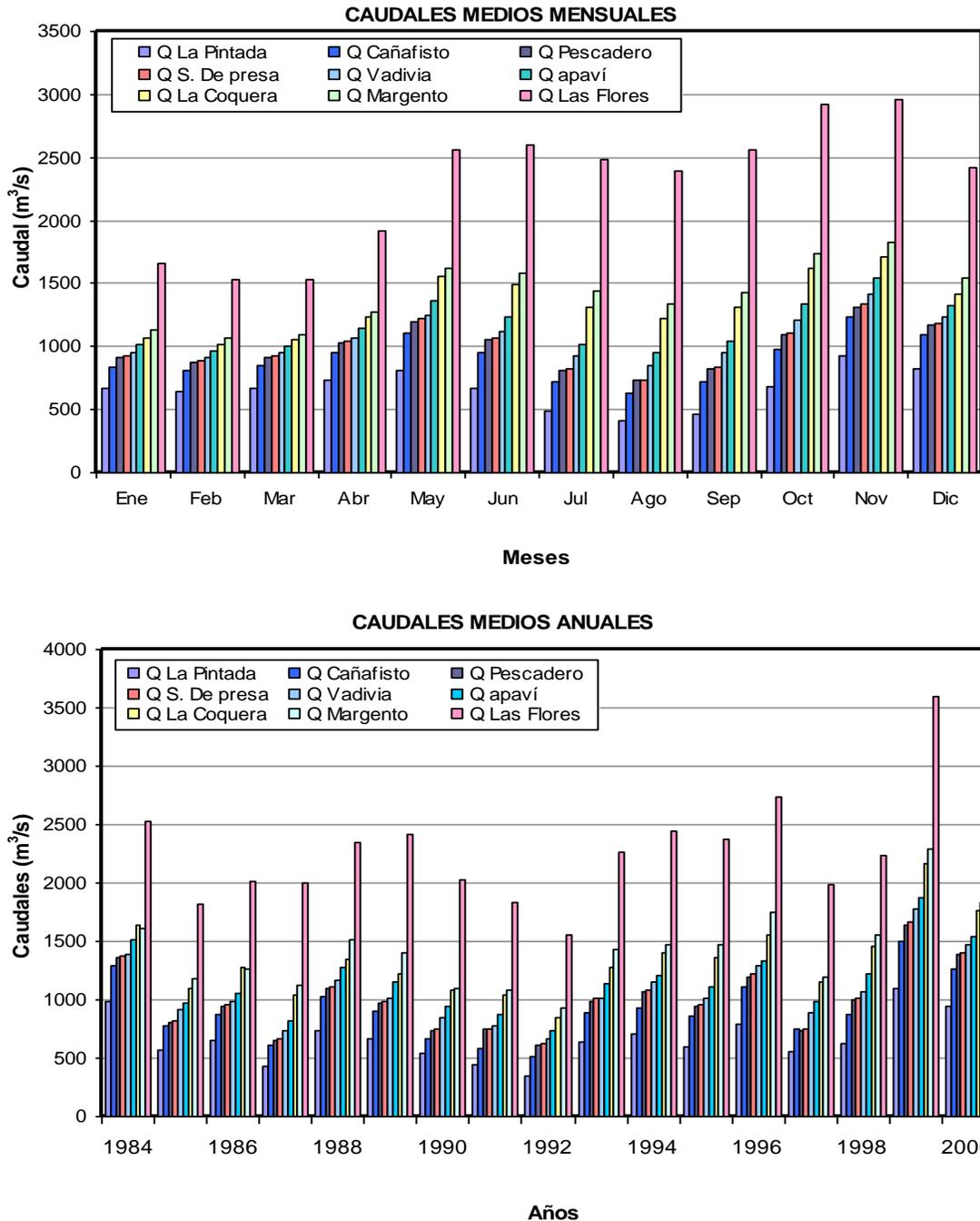


Figura 3.24 Distribución mensual y anual de caudales en el río Cauca



- Al comparar las curvas de frecuencia de caudales máximos promedios diarios (primer grafico de la Figura 3.21) de la distintas estaciones, se puede observar cómo se cruzan dichas curvas para las estaciones de Apaví, La Coquera y Margento, lo que puede reflejar la variación de la capacidad de caudal a banca llena del río, que va disminuyendo de unos cuatro años de período de retorno para los sectores cercanos a

la estación Apaví a una frecuencia casi anual en la zona cercana a la estación Margento.

Como un complemento a la caracterización de los caudales medios del río se llevó a cabo una evaluación del rendimiento a lo largo de la cuenca del río Cauca en la zona de estudio. Teniendo como base las áreas de drenaje, se estimaron los rendimientos de caudal medio en cada estación, asociados en primera instancia al área total de drenaje delimitada por dicha estación y luego para la porción de cuenca comprendida entre dicha estación y la ubicada inmediatamente aguas arriba. Los resultados de estos rendimientos se presentan en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33 Rendimiento de los caudales característicos

Parámetro	Rendimiento global de la cuenca (l/s por Km ²)							
	La pintada	Cañafisto	Pescadero	Valdivia	Apaví	La Coquera	Margento	Las Flores
Área de drenaje (Km ²)	27 175	33 113	36 240	38 280	38 930	41 400	41 870	56 590
Media mes caudaloso	34	37	36	37	40	41	44	52
Promedios	24	27	27	28	30	32	34	40
Medio (50%)	22	24	24	25	28	30	32	40
Media mes seco	15	19	20	22	24	25	25	27

Parámetro	Rendimiento por sectores (l/s por Km ²)							
	La pintada Cañafisto	Cañafisto Pescadero	Pescadero Valdivia	Valdivia Apaví	Apaví La Coquera	La Coquera Margento	Margento Las Flores	
Área de drenaje (Km ²)	5 935	3 130	2 040	650	2 470	470	14 720	
Rendimiento	41	28	37	145	70	185	59	

Según el análisis anterior, se puede concluir que la cuenca del río Cauca aguas abajo del sitio de presa, presenta un mayor rendimiento debido a que esta zona del departamento de Antioquia es la que registra las mayores precipitaciones sobre la cuenca del río Cauca, con valores que pueden alcanzar los 5.000 mm/año y que superan casi en un 100% las precipitaciones anuales que tiene la cuenca en otras zonas del país.

3.8.3 Crecientes máximas

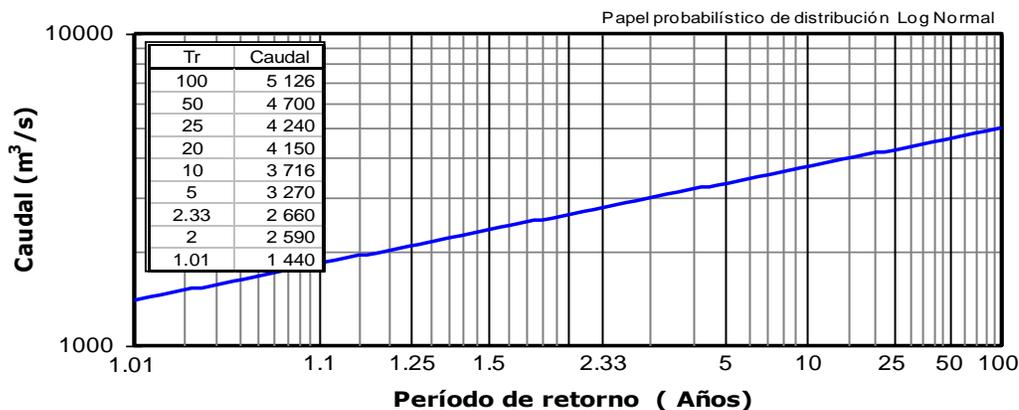
La información para llevar a cabo el estudio de crecientes máximas en el río Cauca fue proporcionada por el IDEAM y complementada por la base hidrológica de INTEGRAL S.A, obtenida en el desarrollo de estudios anteriores para diferentes estaciones. En la Tabla 3.34 se muestra la información total disponible para llevar a cabo la estimación de crecientes máximas.

Tabla 3.34 Estaciones y períodos para la estimación de crecientes máximas

Estación	Período	Estación	Período
La Virginia	1946-1951,1953-2005	Valdivia	1960-2003
La Pintada	1965-1996,1998-1999,2001-2002	Apaví	1972-2002
Bolombolo	1971-1999,2001-2002	La Coquera	1967-2000,2002
Cañafisto	1979-1999,2001-2002	Margento	1975-2002
Pescadero	1984-2001	Las Flores	1975-1978,1980-1991,1993-2002

En el caso de las crecientes de diseño, se llevó a cabo una revisión de la información disponible en estudios anteriores y se concluyó que para las crecientes menores a 100 años, se pueden seguir manejando los datos de caudal definido en el estudio de actualización de la factibilidad desarrollado en el año 1999, de donde se tiene que los caudales asociados a diferentes períodos de retorno corresponden a los indicados en la Figura 3.25.

Figura 3.25 Curva de frecuencia de caudales máximos



El estudio del año 1999 se basó en estimar la creciente media anual en el sitio de presa, en función del área de la cuenca, luego de relacionar este parámetro con la creciente media anual registrada en las estaciones localizadas entre La Pintada y Valdivia, y aplicando una curva normalizada de frecuencia deducida a partir de los registros de las mismas estaciones. Cabe destacar que el estudio del año 1999 se llevó a cabo con datos históricos disponibles hasta el año 1996; sin embargo, se ha identificado que la inclusión de nuevos registros, donde están los datos del año 1999 que fue un período de grandes caudales, no implica una variación en la estimación de las crecientes de diseño.

3.8.4 Caudales mínimos históricos

En la Figura 3.26 se presenta la curva de frecuencia de caudales mínimos estimada para las distintas estaciones, en función de los datos de caudales mínimos históricos disponibles en diferentes estaciones y proporcionados por el IDEAM, los cuales se encuentran consignados en la Tabla 3.35.

Esta información es básica para establecer las condiciones de llenado del embalse pues de acuerdo al Estudio de Restricciones Ambientales, (ERA) de 2004, se ha considerado indispensable establecer un sistema de cierre de túneles y llenado de embalse que permita garantizar por lo menos una capacidad de 300 m³/s, que corresponde a un valor cercano al caudal mínimo histórico registrado en el río Cauca en la zona del proyecto

Figura 3.26 Curva de frecuencia de caudales mínimos

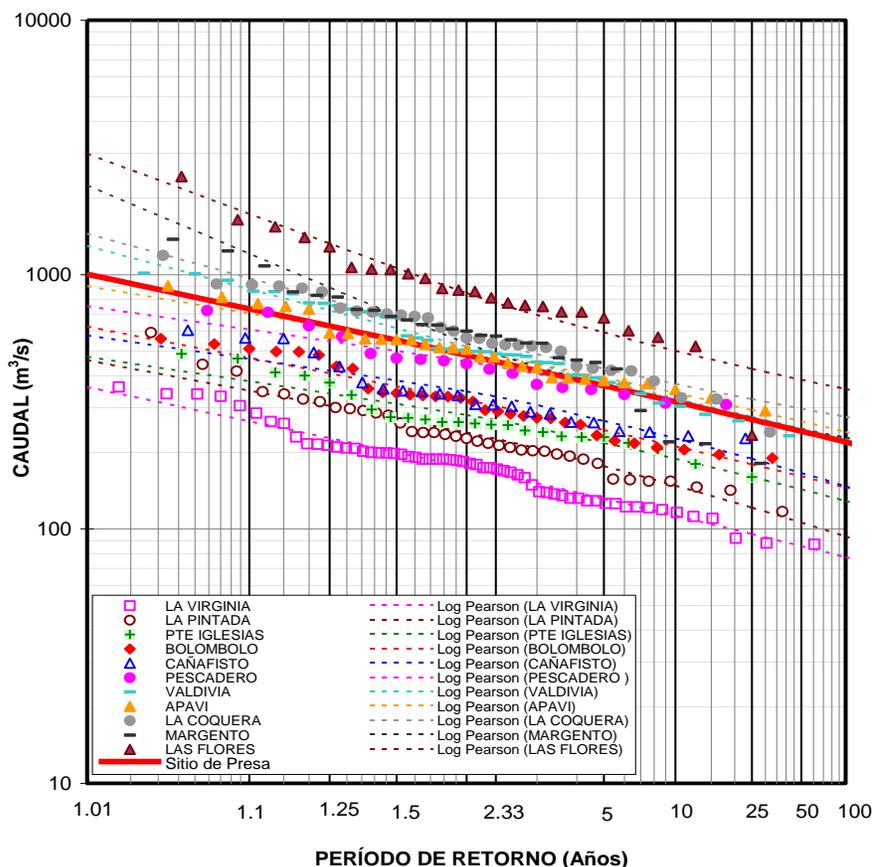


Tabla 3.35 Estaciones y períodos para la estimación de caudales mínimos

Estación	Período	Estación	Período
La Virginia	1946-2005	Valdivia	1960-2000
La Pintada	1965-2000, 2002	Apaví	1972-2000
Pte. Iglesias	1979-2002	La Coquera	1966-1979, 1984-2000
Bolombolo	1971-2002	Margento	1966-1970, 1975-1979, 1984-2000
Cañafisto	1979-2000	Las Flores	1974-1979, 1984-2000, 2002
Pescadero	1984-2000		

3.8.5 Niveles

Como se mencionó anteriormente en el origen de información y metodología empleada, la información de niveles fue suministrada por el IDEAM. En la Tabla 3.36, se observan los períodos y las estaciones con las cuales se trabajó para llevar a cabo el estudio de niveles en el río Cauca.



Tabla 3.36 Estaciones y períodos para el análisis de niveles

Estación	Período	Estación	Período
La Virginia	1972-1976,1981-2005	Valdivia	1972-2000
La Pintada	1974-1975,1977-2002	Apaví	1984-2000
Pte. Iglesias	1978-2002	La Coquera	1972-1975-1977-2001
Bolombolo	1974-1975,1977-2002	Margento	1966-1970,1975-2001
Cañafisto	1979-2002	Las Flores	1974-2001
Pescadero	1980-2002		

Para el análisis de niveles se trabajó con la totalidad de los registros suministrados, sin necesidad de llenar datos de registros faltantes, ya que los datos proporcionados son lecturas de mira que no dependen de calibración y que además no permiten hacer correlaciones directas entre estaciones.

De acuerdo con los análisis obtenidos de los registros de niveles en las distintas estaciones, se observa claramente como la diferencia entre los valores mínimos dados en condiciones de estiaje y los valores máximos que se presentan en condiciones de crecientes es mayor en la estación Pescadero, por tener una sección del río menos ancha ubicada en una zona sin ningún tipo de amortiguamiento por desbordamiento; esta variación de niveles disminuye a medida que se desplaza del sitio del proyecto hacia aguas abajo, donde se amplían la secciones y aparecen las zona de desbordamiento que atenúa la fluctuación de niveles. En el caso de las estaciones de La Pintada y Cañafisto, el cauce del río Cauca es un poco más amplio que la estación Pescadero, por lo que la variación de niveles disminuye.

En la Tabla 3.37 se muestra la variación de niveles, donde se comparan los valores máximos y mínimos promedios multianuales, y el valor extremo registrado en cada una de las estaciones, durante el periodo 1990 - 2000. En la Figura 3.27 se presenta la misma variación, pero a nivel esquemático, tomando como referencia el valor medio del río en cada estación y adicionado los valores extremos máximo y mínimo registrados en la década del 90 en las distintas estaciones.

De otra parte, en la Figura 3.28, se ilustran las relaciones de caudal y nivel para cada estación donde se observa la variación en la curva de calibración (Caudal vs. Nivel)

Analizando los datos de la Figura 3.28, se concluye que debido a las condiciones dinámicas del lecho (véase Figura 3.29), ha existido y existirá una variación natural de la curva de calibración de cada estación, lo que representa que para un mismo nivel del río Cauca, pueden darse diferentes caudales dependiendo de las condiciones del lecho en su momento, y viceversa, para un mismo caudal pueden existir diferentes niveles. En la Tabla 3.38 se señalan estas diferencias para algunos de los caudales característicos del río Cauca, en las ocho estaciones de la zona de interés.

Tabla 3.37 Variación de niveles del río en las distintas estaciones

Estación	Valores de la mira (cm.)			Diferencia de niveles (cm.)		
	Media de mínimos (1)	Promedio (2)	Media de máximos (3)	(2)-(1)	(3)-(2)	(3)-(1)
Pintada	175	268	417	93	149	242
Cañafisto	95	214	404	119	190	309
Pescadero	178	380	691	202	311	513
Valdivia	145	269	462	124	193	317
Apaví	138	268	479	130	211	341
La Coquera	99	206	351	107	145	252
Margento	336	482	634	146	152	298
Las Flores	419	589	750	170	161	331

Figura 3.27 Variación de niveles respecto al nivel medio en las distintas estaciones

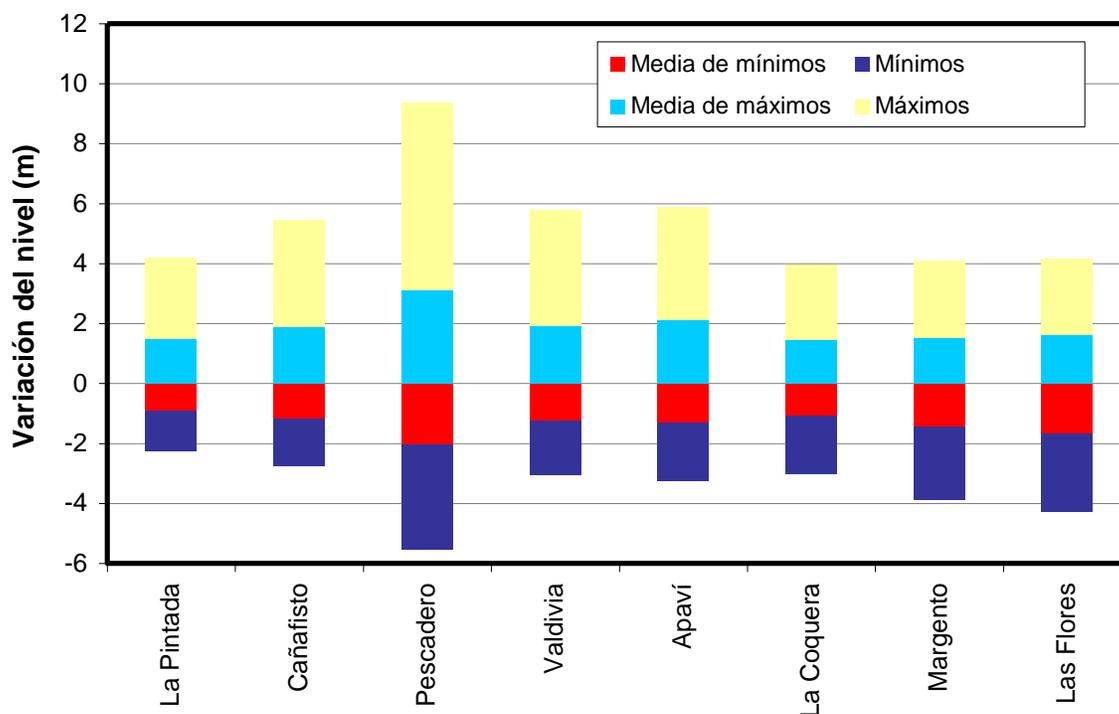


Figura 3.28 Relación caudal nivel en distintas estaciones para el período 1990-2000

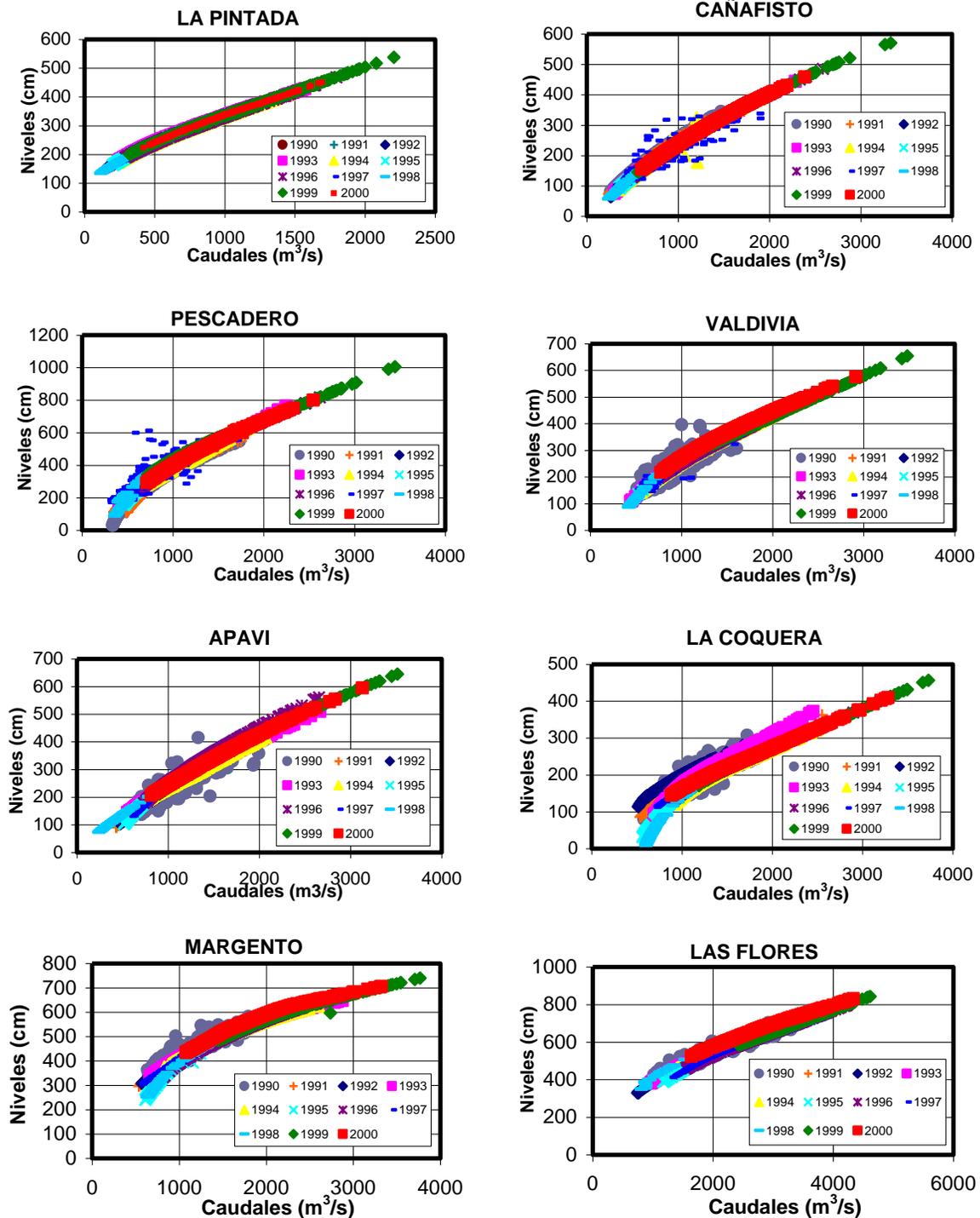


Figura 3.29 Variación del lecho del río en diferentes estaciones

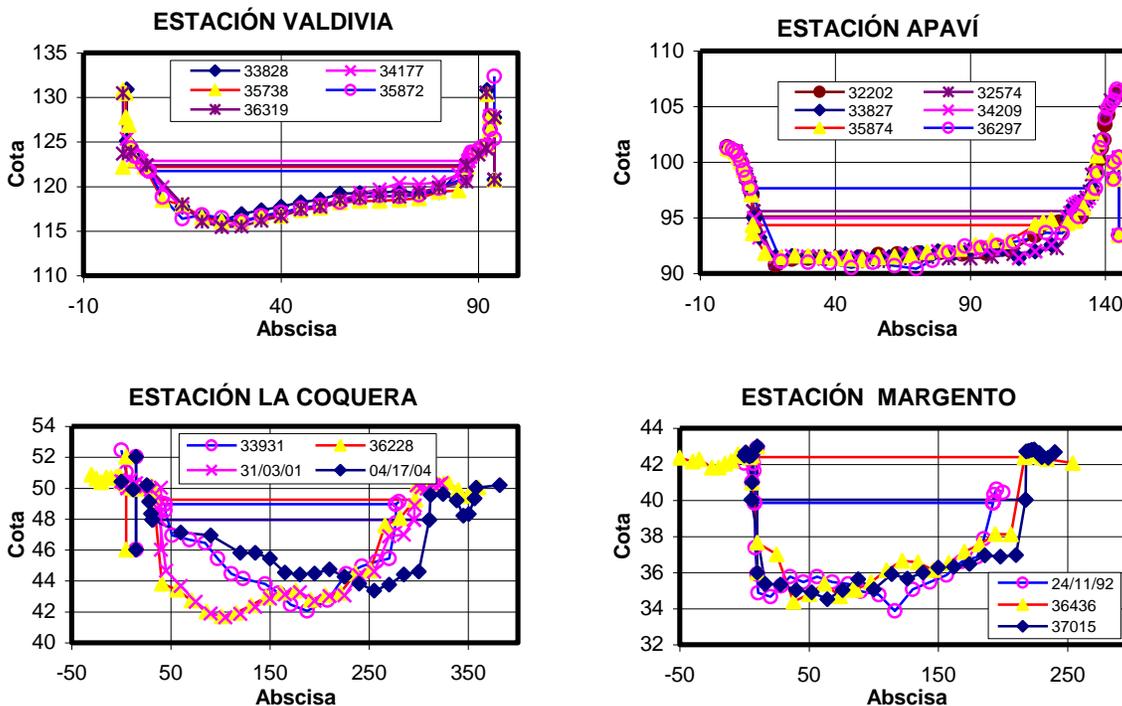


Tabla 3.38 Influencia de la curva de calibración en los caudales y niveles característicos del río Cauca.

Parámetro	Estación La pintada	Estación Cañafisto	Estación Pescadero	Estación Valdivia	Estación Apaví	Estación La Coquera	Estación Margento	Estación Las Flores
A. Variación de niveles en milímetros para un caudal dado								
Q Media de máximos	435	435	420	420	670	670	470	470
Q Promedio	270	280	220	240	370	440	270	285
Q Media de mínimos	175	185	95	110	140	215	130	155
B. Variación de caudales en m³/s para un mismo nivel								
N. Media de mínimos	635	660	810	905	810	995	995	1040
N. Promedio	655	680	910	960	910	1125	1035	1070
N. Media de máximos	675	700	1720	1015	1005	1270	1300	1125

Notas:

- Los valores de esta tabla se obtuvieron utilizando los gráficos de Caudal vs. Nivel para los valores medios diarios registrados para el periodo 1984 -2000.
- Los caudales medios máximos, promedios y medios mínimos corresponden a los presentados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para las distintas estaciones.
- Los niveles medios mínimos, promedio y media de máximos corresponde al valor medio leído en el gráfico de caudal vs. Nivel para el caudal con denominación equivalente.

En algunos casos, las variaciones en las curvas de calibración implica que para un mismo nivel, el caudal puede variar hasta en un 30 %; sin embargo, esto no quiere decir que los datos no sean confiables; por el contrario, se asume que las calibraciones periódicas que realiza el IDEAM se hacen para evitar que se presenten este tipo de inconsistencias, y que la información entregada es confiable.



3.9 SEDIMENTOS

Previo al desarrollo de este estudio, en la etapa de análisis de alternativas, se llevaron a cabo evaluaciones de la depositación de sedimentos en el embalse, retomando datos y análisis hechos en el estudio de factibilidad del año 1999, en el cual por medio de modelos semiempíricos, se estableció la forma del delta de sedimentos en el embalse, lo que permitió determinar la altura máxima de la presa. En este numeral se presenta un resumen del análisis donde se ratifica el resultado del modelo semiempírico obtenido en el planteamiento de alternativas, el cual se presenta completo en el Anexo 3.3, que hace parte del Informe Técnico de la Complementación de la Factibilidad Técnica, Económica y Ambiental del proyecto hidroeléctrico Ituango.

De otra parte, en los estudios del año 1983, se llevó a cabo una valoración cualitativa de los efectos que tendría el proyecto sobre el cauce aguas abajo del sitio de presa, el cual también fue analizado de manera cuantitativa en este estudio.

La metodología empleada para validar los estudios anteriores consistió en la estimación de la carga de transporte y la evaluación mediante modelos unidimensionales del arrastre, depositación y degradación de los sedimentos a lo largo del río, utilizando el programa HEC-6 desarrollado por el U.S. Corps of Engineers de los Estados Unidos.

Previo al análisis de transporte, depositación y degradación de sedimento, se llevó a cabo una recopilación de información secundaria que permitió estimar el arrastre de sedimentos, utilizando los registros de aforos llevados a cabo por el IDEAM a lo largo de las distintas estaciones de aforo del río Cauca y se desarrolló un estudio de dinámica fluvial, con base en el análisis del trazado del cauce del río Cauca en diferentes épocas. Como información primaria se llevó a cabo un reconocimiento de campo en el que se levantaron varias secciones hidrográficas y se tomaron muestras de material del lecho.

Vale la pena destacar que la zona definida para este estudio está asociada al trazado del río Cauca entre el sector de Santa Fe de Antioquia y el corregimiento de Margento, ubicado a unos 36 km aguas abajo de Caucasia. Para hacer referencia a los diferentes sitios o puntos específicos, se demarcó un eje a lo largo del río cuyo origen se determinó en el sitio de presa, más concretamente en la confluencia entre los ríos Ituango y Cauca. De este origen se definieron dos abscisados, uno hacia aguas arriba y otro hacia aguas abajo; es así como se puede determinar que el Puente de Occidente se localiza a unos 87 km aguas arriba del sitio de presa y la cabecera municipal de Caucasia está a 146 km aguas abajo del proyecto aproximadamente.

3.9.1 Estudio de divagación

En este numeral se presenta el análisis multitemporal de la divagación del cauce del río Cauca desde la confluencia del río Tonusco (Santa fe de Antioquia) hasta la población de Margento. El primero localizado aguas arriba y el segundo aguas abajo del sitio propuesto para la presa del Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Para este análisis se realizó una superposición cartográfica del canal del río en tres épocas diferentes: 1961 (planchas IGAC escala 1:25.000), 1980 (planchas IGAC escala 1:25.000) y una imagen de satélite SPOT (2005). (véase Plano F-PHI-EAM-AB-RE-DIV).



3.9.2 Geomorfología general

El río Cauca a pesar de corresponder a una cuenca de montaña, que divide geográficamente las cordilleras Central y Occidental, presenta una configuración variable en su cauce, mostrando una compleja secuencia de zonas de fondo amplio, caracterizados por procesos de acumulación de sedimentos; alternando con tramos encañonados, de valles en "V", rectilíneos, con mínima acumulación de sedimentos y modelados en general sobre roca fresca. Esta configuración refleja un fuerte control tectónico (Sistema de Fallas Cauca y satélites) así como un condicionamiento litológico. De manera genérica, desde el Puente de Occidente hasta el sector de El Doce, el canal del río Cauca transcurre por un valle profundo, con fondo estrecho y vertientes montañosas largas (superiores a 3 km). De manera contrastante, aguas abajo de El Doce y hasta el límite de la zona analizada (Margento), esta corriente transcurre por un valle amplio, poco profundo y en medio de un relieve colinado, con desarrollo de un fondo plano cuya amplitud aumenta aguas abajo. A partir de la información cartográfica, el análisis granulométrico de los sedimentos activos y la configuración morfodinámica del cauce se identificaron y describieron siete trayectos mayores:

- **Trayecto 1.** Confluencia río Tonusco (km 93+800 US) – Puente de Occidente (km 85+000 US). Zona amplia de acumulación de sedimentos, con gran aporte de material grueso granular por: el río Tonusco y las quebradas La Sopetrana y La Noarque. Corresponde a un canal aluvial trenzado, con abundantes islas barrera.
- **Trayecto 2.** Puente de Occidente (km 85+000 US) – Confluencia quebrada La Seca (km 77+100 US). Zona moderadamente amplia. Corresponde a un canal aluvial trenzado, con desarrollo de pequeñas y separadas islas barrera.
- **Trayecto 3.** Confluencia quebrada La Seca (km 77+1000 US) – Hacienda Canarias (km 55+500 DS). Zona estrecha, valle encañonado. Corresponde a un canal aluvial rectilíneo en roca.
- **Trayecto 4.** Hacienda Canarias (km 55+500 DS) – sector El Doce (km 60+500 DS). Zona amplia con importante acumulación de sedimentos grueso granulares aportados por el río Puquí y las quebradas Nerí y Purí. Corresponde a un canal aluvial trenzado.
- **Trayecto 5.** Sector El Doce (km 60+500 DS) – confluencia quebrada Tunaco (km 69+500 DS). Zona estrecha correspondiente a un canal rectilíneo en roca.
- **Trayecto 6.** Confluencia quebrada Tunaco (km 69+500 DS) - corregimiento Guarumo (km 126+000 DS). Zona amplia de acumulación de sedimentos. Canal aluvial trenzado.
- **Trayecto 7.** Corregimiento Guarumo (km 126+000 DS) – Margento (km 182+275 DS). Zona amplia de acumulación de sedimentos. Canal aluvial mixto entre meándrico y trenzado.



3.9.2.1 Trayecto 1. Confluencia río Tonusco (km 93+800 US) – Puente de Occidente (km 85+000 US)

Localizado en inmediaciones del municipio de Santa fe de Antioquia, y corresponde a un trayecto de 9,5 km de longitud, con dirección N-S y caracterizado por un fondo suave, con una amplitud máxima de 2,5 km, presencia de terrazas aluviales y aluviotorrenciales en ambas márgenes, además de una extensa llanura de inundación por donde el río ha divagado libremente. El caudal en este trayecto transcurre por un canal que alcanza hasta 1 km de amplitud, entre islas barrera y varios brazos activos.

Esta llanura aluvial corresponde a una potente zona de agradación de sedimentos, predominantemente grueso granulares, aportados por el río Cauca, el río Tonusco y las quebradas La Sopetrana, La Nuarque, entre otras; todas ellas con un claro comportamiento torrencial. En el caso del río Tonusco, el aporte de material grueso granular hacia la confluencia es tan abundante, que los abanicos asociados han deflectado el cauce del río Cauca en casi 90° hacia su margen derecha. Actualmente el Tonusco continúa aportando una importante cantidad de sedimentos gruesos (bloques, gravas y arenas gruesas) al cauce del río Cauca.

En este trayecto del río Cauca, el canal presenta un patrón trenzado, con desarrollo de varios ramales en su interior, que dan lugar al desarrollo de islas barrera de formas elongadas. En este sector la espesa acumulación de gravas y arenas aluviales con bajo contenido de finos favorece los procesos de erosión durante los eventos de crecientes, desplazando el curso del río y a su vez generando nuevos canales secundarios.

Para el año de 1961, entre la quebrada La Sopetrana y el puente de Occidente, se configuraron islas-barrera muy largas y continuas, de hasta 1.500 m de longitud por 250 m de amplitud; en algunos casos hasta dos islas paralelas, con formación de tres brazos en el río. Para el año 2005, estas islas-barrera ya habían sido removidas completamente o desplazadas aguas abajo; ninguna de ellas conserva la forma de los años anteriores.

El movimiento lateral del cauce es poco durante las cuatro décadas analizadas, a pesar de transcurrir en una llanura aluvial amplia. Las islas-barrera se desplazan al interior del canal principal, el cual tiene 1 km aproximadamente de amplitud.

3.9.2.2 Trayecto 2. Puente de Occidente (km 85+000 US) – Confluencia quebrada La Seca (km 77+100 US)

Trayecto localizado entre los municipios de Santa fe de Antioquia y Olaya, con 8 km de longitud y una dirección predominante N 30° W. Allí el río, con un cauce principal de unos 200 m de amplitud aproximadamente, transcurre por el fondo de un valle amplio que alcanza amplitudes entre 400 y 500 m. El canal presenta un patrón ligeramente sinuoso a rectilíneo, con desarrollo de pequeñas islas barrera, en general espaciadas entre sí más de un kilómetro y con tamaños de 80 por 250, 80 por 500 y 200 por 450 m. La sinuosidad del río en este trayecto está relacionada con el relieve colinado presente en ambas márgenes, generando una alternancia de sitios de agradación con otros de erosión. Los primeros con formación de playones amplios de material, principalmente grueso granular como gravas y arenas, en lugares como las orillas cóncavas de las



sinuosidades, así como en los sitios de confluencia de quebradas de orden mayor. Los sitios de erosión se observan en las orillas convexas, cerca de la base de las colinas.

El análisis multitemporal muestra una divagación mínima del canal del río en este sector; así mismo, las islas-barrera presentan poco desplazamiento; sin embargo, el no desarrollo de vegetación sobre ellas indica una continua circulación de sedimentos.

3.9.2.3 Trayecto 3. Confluencia quebrada La Seca (77+100 US) – Hacienda Canarias (km 55+500 DS)

Corresponde al trayecto del río Cauca en jurisdicción de los municipios de Liborina, Buriticá, Sabanalarga, Peque, Toledo, Ituango, Briceño, Valdivia y Cáceres. En este sector, el río presenta varias orientaciones: N 30° W desde la quebrada Cuití hasta la confluencia de las quebradas la Honda y La Clara; N 10° E hasta la quebrada Peque; N 45° E hasta el río San Andrés; de nuevo N 10° E hasta el río Ituango y por último N 45° E hasta la Hacienda Canarias.

Este trayecto corresponde a un valle en “V” estrecho, con un fondo que coincide casi exclusivamente con el cauce del río. Allí el patrón es rectilíneo con amplitud del cauce entre 70 a 150 m, y una dinámica predominante de erosión y socavación lateral del lecho. El canal se encuentra modelado en roca fresca de la siguiente manera: hasta la confluencia de la quebrada La Peña, corresponden a tonalitas del Batolito de Sabanalarga y basaltos del miembro volcánico de la Formación Barroso y aguas abajo de este lugar se presentan rocas metamórficas del Complejo de Cajamarca (esquistos verdes y cuarzo sericíticos, neises aluminicos, cuarzo feldespáticos y micáceos y la metatonalita de Puquí).

Este canal, controlado por la resistencia de la roca, no presenta en su lecho una cobertura continua de material aluvial grueso. En los sectores donde se presentan acumulaciones de gravas, éstas son temporales, removidas y transportadas continuamente por las crecientes. En este sector el río tiene mayor velocidad con respecto a los tramos trezados o meándricos.

Parte de este trayecto, entre las confluencias de los ríos Espíritu Santo y Pescado, está alineado con estructuras tectónicas regionales, especialmente con la Falla Espíritu Santo con dirección N 45° E.

La divagación del río en todo este tramo es prácticamente nula, debido al entallamiento rocoso del cauce.

3.9.2.4 Trayecto 4. Hacienda Canarias (km 55+500 DS) – sector El Doce (km 60+500 DS)

Hace parte de los municipios de Cáceres y Tarazá. Corresponde a un trayecto de 5 km, de dirección N-S, donde se observa un ensanchamiento local del fondo del valle del río Cauca, configurándose una llanura aluvial con amplitudes entre 0,8 y 1,2 km.

Este trayecto se caracteriza por ser una zona de agradación de sedimentos grueso granulares, aportados por el río Puquí, quebradas Nerí y Purí, y por el propio río Cauca, el



cual se ensancha en este sector y deposita parte de la carga de fondo y en suspensión que trae desde el canal rectilíneo y estrecho descrito anteriormente.

Por el alto contenido de sedimentos, el canal se ramifica, configurando un patrón fluvial trenzado, con aparición de islas barrera de formas elongadas en la dirección del río y de varios tamaños (desde 100 por 250 m hasta 400 por 1000 m).

Los sedimentos acumulados en las islas barrera son poco cohesivos, fácilmente erodables durante las crecientes. Para el año de 1961, el patrón trenzado del cauce y las islas-barrera se distribuían principalmente hacia la margen oeste (izquierda) de la llanura aluvial. Para el año de 1980, este sistema de barras y trenzamiento ocupaba la totalidad de la llanura. Para el año 2005, el movimiento continuó con migración del trenzamiento hacia la margen derecha de la llanura aluvial. En consecuencia, el trenzamiento del río en este tramo es activo, involucrando la totalidad de la llanura aluvial, restringido solo por los respaldos rocosos del valle.

3.9.2.5 Trayecto 5. Sector El Doce (km 60+500 DS) – confluencia quebrada Tunaco (km 69+500 DS)

Corresponde a un trayecto de 9 km, en dirección general N 30° W, localizado en jurisdicción de los municipios de Cáceres y Tarazá. En este sector el fondo del valle nuevamente se estrecha para dar lugar a un patrón lineal a ligeramente sinuoso, por las limitaciones que encuentra al transcurrir contiguo a un relieve colinado en ambas márgenes.

Se caracteriza por ser un valle en “V” estrecho, poco profundo, de amplitud del cauce entre 100 a 150 m, que transcurre en medio de un relieve colinado alto, modelado en roca fresca de la Metatonalita de Puquí.

Se observa un predominio de la socavación lateral hacia la base de las colinas respecto a los escasos sitios de agradación de sedimentos, los cuales son fácilmente removidos y transportados en épocas de creciente.

La divagación del río en todo este tramo es prácticamente nula, debido al entallamiento rocoso del cauce.

3.9.2.6 Trayecto 6. Confluencia quebrada Tunaco (km 69+500 DS) - corregimiento Guarumo (km 126+000 DS)

Se localiza hacia los municipios de Cáceres, Tarazá y Caucasia, en un trayecto de 56,5 km, con una tendencia N 20-30° W hasta el área urbana de Cáceres; allí hace un giro al este, para alcanzar una dirección N 30-40° E hasta el corregimiento de Guarumo.

Corresponde a una zona donde el fondo del valle oscila entre 2 y 4 km, compuesta por terrazas aluviales y una extensa llanura aluvial, en medio de un relieve colinado, modelado en rocas sedimentarias del Terciario. En este trayecto el cauce activo del río Cauca ocupa una franja con una amplitud variable entre 300 - 400 m, llegando a sobrepasar más de 1 km en lugares con presencia de islas barrera y varios cauces secundarios y/o brazos.

Este trayecto está asociado a una zona de agradación de sedimentos gruesos (gravas) y medios (arenas) aportados por el propio río Cauca, gracias al cambio de gradiente y régimen que allí se observa, puesto que el río hace transición entre un valle montañoso, estrecho y rocoso y una zona amplia de relieves suaves. Igualmente los ríos Rayo, Tarazá, Corrales, Tamaná y las quebradas de orden mayor como La Noé, Dentón, Dentoncito, Caracolí, Dantas, La Ceiba, Pilonés y El Saino, aportan gran cantidad de sedimentos.

El alto aporte de sedimentos al río ha generado en este tramo un canal fluvial trezado, con desarrollo de islas barrera, de diferentes tamaños, donde las de mayor tamaño se observan más estables en el tiempo. En ellas sólo se perciben cambios ligeros en los bordes por socavación lateral.

Para el año de 1961 se destacaban las islas barrera que se presentan en la Tabla 3.39

Tabla 3.39. Principales islas-barreras existentes en el año 1961

Isla Barrera	Extensión
La Cuatro	1,2 x 0,2 km
María	0,4 x 0,2 km
La Envidia	1,2 x 0,4 km
Nicopita	0,7 x 0,2 km
La Lucía	1,3 x 0,5 km
Méjico	1,2 x 0,5 km
Caracolí	0,6 x 0,3 km
Bonilla	0,7 x 0,4 km
Cristalina	0,6 x 0,1 km
La Plata	0,7 x 0,25 km
Tocino	1,9 x 0,6 km
Las Palmas	1,0 x 0,5 km
La Raya	1,5 x 0,6 km
El Guayabo	0,8 x 0,3 km
De Gómez	1,0 x 0,1 km
El Torín	1,0 x 0,2 km
Santa Rosa	3,0 x 0,6 km
Galvis	2,7 x 0,3 km

De acuerdo al análisis multitemporal, se observa que entre la abscisa 69+500 y la 80+000, para los años 1961 y 1980 era muy similar, mientras que para el período 1980 - 2005, el canal presenta una importante variación, así:

- Entre la abscisa 69+500 y 71+500, continúa el mismo canal, pero la isla La Cuatro se desplaza hacia la margen derecha y aumenta su extensión a 1,5 x 0,4 km.
- Entre la abscisa 71+500 y 72+000 se fragmenta la isla la María, y sus remanentes se constituyen como núcleos de nuevas islas más grandes que la inicial.
- Entre la abscisa 72+000 y 74+000, el río se desplazó 800 m hacia la margen derecha, inunda parte de la hacienda Tamaco, genera nuevos canales trezados y tres nuevas islas-barrera pequeñas.
- Entre la abscisa 74+000 y 76+000 el canal se estrecha hacia la margen derecha, dejando abandonadas en la margen izquierda las islas barrera La Envidia, Nicopita, entre otras de menor extensión. Adicionalmente, se desplazó el caño del Matadero 300 – 500 m, pero continúa su forma sinuosa.



- Entre las abscisas 76+000 a la 80+000, el canal del río pasa de tener un cauce principal definido y dos brazos en el 2005 a un fuerte trenzamiento con seis islas barrera, remodelando las islas La Lucía, Méjico y Caracolí.
- Entre las abscisas 80+000 y 87+000, el canal del río es semejante en las cuatro décadas analizadas; solo se identifica un ligero desplazamiento lateral en las islas barrera La Bonilla y otras de menor tamaño.
- En el tramo entre las abscisas 87+000 y 90+500, el canal claramente trenzado del año 1961, con una amplitud de 800 m, se transforma para el año de 1980 en un canal lineal, con 400 m de amplitud. Para el 2005 se desplaza de nuevo 400 m hacia la margen derecha, recupera el canal del año 1961 y conforma un nuevo brazo de forma sinuosa hacia la margen izquierda.
- Entre las abscisas 90+500 y 102+500 para el lapso de tiempo analizado, el canal del río, junto con las islas barrera (La Plata, Tocino y Las Palmas), transcurre por un canal estable. El mayor cambio se da para el año 2005 entre la abscisa 95+500 y 98+000, donde el brazo de la margen izquierda que limita la Isla Tocino, es abandonado o capturado por el canal principal del río Cauca.
- Entre las abscisas 102+500 y 105+500, el cambio fundamental se observa entre 1980 y 2005, definido por el desplazamiento hacia la margen izquierda de la isla barrera la Raya.
- Para el año 2005, entre las abscisas 105+500 y 108+000, el canal típicamente trenzado del río se concentra hacia la margen izquierda, hasta conformar un claro canal principal de 400 m de ancho.
- Entre la abscisa 108+000 y 126+000, el canal del río continúa un trayecto similar para todo período estudiado, con variaciones menores en cuanto a migración de islas barrera y desplazamiento lateral del canal entre 100 y 200 m por socavación lateral en terrazas y barras. Los cambios más marcados en este trayecto se presentan entre las abscisas 113+500 y 115+000, donde el canal abandona el brazo derecho del año 1980 y transcurre solo por el brazo izquierdo, y entre la abscisa 120+500 124+500 donde la isla Santa Rosa es dividida por un nuevo brazo del río.

En conclusión, el tramo entre la abscisa 69+500 y la abscisa 126+000 corresponde a un canal fluvial con un patrón sinuoso trenzado, muy fluctuante, con frecuentes inundaciones ocasionadas por desbordamiento del río en épocas de creciente del cauce. Estas inundaciones colmatan los canales abandonados y superficies planas aledañas, configurando ciénagas y pantanos permanentes o efímeros. Algunas de estas zonas susceptibles a la inundación se localizan en la parte baja de la quebrada El Toro, cerca de la hacienda Alemania, en los alrededores del corregimiento Puerto Antioquia, parte baja del río Tarazá, sector La Plata (corregimiento puerto Bélgica) y en las ciénagas Cachúa y López del corregimiento El Jardín.



3.9.2.7 Trayecto 7. Corregimiento Guarumo (km 126+000 DS) – Margento (km 182+275 DS)

Corresponde al último trayecto analizado del río Cauca y se localiza entre los municipios de Caucasia y Nechí. Se caracteriza por presentar una superficie muy suave y amplia (4 a 8 km) de acumulación de sedimentos aluviales finogranulares (arenas y limos). En este trayecto el río desplaza fácilmente su canal principal de una margen a otra, aprovechando la extensa llanura aluvial mencionada. Allí son comunes los eventos de inundación en épocas de creciente, que dejan ciénagas y pantanos.

El canal se comporta con un patrón fluvial meandriforme, con desplazamiento de meandros en toda la llanura aluvial, algunos de ellos abandonados por estrangulamiento. En ocasiones, al interior de los meandros, se genera un patrón trenzado con una dinámica de brazos activos e inactivos.

Dentro de este trayecto se identificaron varios tramos de interés:

- Entre las abscisas 126+000 y 133+500, el canal del río presenta una amplia divagación desde el año 1961 hasta el 2005, con formación de varios canales nuevos por estrangulamiento de meandros o desplazamiento de brazos del río; este movimiento se da en una zona de 3 km de amplitud y afecta ambas márgenes del río.
- Entre las abscisas 133+500 y 136+000, de 1961 a 1980, se estrangula un meandro (con algo de trenzamiento) de 2 km de amplitud por 2,5 km de longitud de onda. En el año 2005 se consolida un canal principal como la unión de las dos curvas del meandro.
- Entre las abscisas 136+000 y 139+000 el canal del río se desplazó hacia la margen izquierda 500 m desde el año 1961 al 2005, denotando la dinámica normal de un meandro.
- Entre las abscisas 139+000 y 143+500, en los años 1961 – 1980, se desplaza la curva del meandro 600 m afuera de la margen izquierda, y para el año 2005 la curva se desplaza de nuevo hacia la margen derecha 600 – 700 metros.
- Entre las abscisas 143+500 y 146+500, el canal del río se desplaza 500 m hacia la margen derecha, entre los años 1961 y 2005.
- Entre las abscisas 146+500 y 162+000, corresponde al trayecto del río con mayor divagación en el tiempo analizado, con desplazamientos de hasta 9 km, formando grandes meandros de gran dinámica.

Para el año 1961, entre las abscisas 146+500 y 150+000, el canal del río transcurría por un meandro de 3,4 km de amplitud por 3,3 km de longitud de onda, con varios brazos activos a su interior; para 1980 solo se generan desplazamientos pequeños en las orillas del meandro y en sus brazos internos. En el 2005 se observa un estrangulamiento entre estas dos abscisas, dejando el meandro abandonado (lago en cuello de buey), el cual fue invadido por asentamientos humanos (cerca del área urbana del municipio de Caucasia).



Más adelante en este trayecto, los meandros están en constante desplazamiento desde el año 1960 hasta la actualidad, asociado a éste proceso tan dinámico del canal, se forman extensas áreas de inundación que configuran ciénagas o zonas pantanosas en los meandros abandonados.

- Finalmente, entre las abscisas 162+000 hasta el sector de Margento (km 182+275), el canal del río divaga con un patrón meándrico, fluctuante, con formación de extensas ciénagas y pantanos en zonas de inundación de los canales abandonados del río.

3.9.3 Análisis de sedimentos

El análisis de sedimentos consistió en estimar el transporte y predecir la forma cómo se depositaría el sedimento en el embalse, y cuáles serían los efectos que se tendrían aguas abajo del sitio de presa, debido a la construcción de la misma. A continuación se presentan los análisis y resultados más representativos de este estudio, cuyo detalle se incluye en el anexo de hidrología y sedimentos del informe técnico.

Para el estimativo del transporte de sedimentos se utilizaron las mediciones realizadas en las estaciones de aforos, corrigiéndolas de modo que incluyan el transporte en la zona no muestreada y el transporte de fondo; esta corrección se efectuó mediante el método de Einstein Modificado¹⁸.

A partir de la información de sedimentos recopilada para cada estación, el modelo de Einstein Modificado permitió estimar la carga total de sedimentos suspendidos, así como la carga de fondo en toneladas por día; además suministró información del transporte total desagregado para diferentes tamaños de partícula.

En los estimativos efectuados se evaluó por separado el sedimento del material de lecho y el sedimento fino o carga lavada. Los cálculos se realizaron en las diferentes estaciones, con el fin de confrontar los resultados obtenidos y extrapolar los resultados a la zona de la presa.

Para el cálculo del transporte anual de los diferentes tipos de sedimentos, se elaboraron regresiones entre el caudal del río y los tipos de cargas, y luego se efectuó la integración de las curvas de duración de los diferentes transportes promedios diarios, obtenidas mediante la aplicación de las citadas regresiones a las curvas de duración de caudales promedios diarios. A continuación se explican los cálculos de los diferentes tipos de sedimentos y modos de transporte efectuados.

- **Sedimento en suspensión en la zona muestreada.** Para el cálculo del transporte de sedimento en suspensión en los sectores muestreados, se ajustó una curva a los datos de caudal del río y carga suspendida medida en los aforos, sin efectuar correcciones o

¹⁸ Holmquist-Johnson, C. L. and Raff, D., (2005 draft), "Bureau of Reclamation Automated Modified Einstein Procedure (BORAMEP) Program for Computing Total Sediment Load Manual", U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (Reclamation), Sedimentation and River Hydraulics Group, Denver, CO.



ajustes para considerar la carga en la zona no muestreada. Luego se efectuó la integración de la curva de duración de transporte promedio diario. En la Tabla 3.40 se indican los valores del sedimento muestreado, que se estimaron en los sitios de interés y las estaciones de aforo.

Tabla 3.40 Cuadro Resumen del Transporte Anual estimado.

Estación	Medido	Tasa de transporte de caudal sólido (10 ⁶ t/año)				
		No muestreado	Suspendido Total	Fino	Material Lecho en Suspensión	Fondo
La Pintada	15.4	12.2	27.6	13.7	13.9	0.5
Cañafisto	25.8	6.2	32.0	14.2	17.8	0.9
Sitio Presa	35.8	8.9	44.7	19.1	25.6	1.4
Pto. Valdivia	40.6	11.5	52.1	22.0	30.1	1.7
Apaví	38.8	16.1	54.9	25.6	29.4	1.2
La Coquera	30.4	35.2	65.6	45.0	20.6	1.8

- **Transporte en la zona no muestreada.** El transporte de sedimento se corrigió para incluir la cantidad de la zona no muestreada, empleando, como se mencionó, el método de Einstein Modificado¹⁸, el cual evalúa la cantidad de sedimentos suspendidos que viajan en la zona adyacente al lecho, a partir de los datos tomados en la zona muestreada. Se utiliza un procedimiento de extrapolación, basado en la función de carga de lecho de Einstein¹⁹ y en una modificación al método introducida por Einstein & Barbarossa (1952) para evaluar la rugosidad de los granos. Para los cálculos se utilizaron los parámetros hidráulicos y las características del sedimento determinados a partir de los aforos. El estimativo del transporte de sedimento en la zona no muestreada para las diferentes estaciones se indica en la Tabla 3.40.
- **Transporte de sedimento fino y de material de lecho en suspensión.** El sedimento suspendido se dividió en sedimento fino y en material de lecho en suspensión, considerando como sedimento fino el conformado por partículas con diámetro menor o igual a 0,125 mm en la curva granulométrica promedio de cada aforo. El material de lecho en suspensión se obtuvo al sustraer de la carga total de sedimentos, la carga de finos y la carga de fondo.
- **Transporte de fondo.** El método de Einstein Modificado permitió la estimación de este tipo de transporte de manera directa, que depende básicamente de las características hidráulicas de la corriente y del material de lecho.
- **Transporte total.** El transporte total del sedimento en las diferentes estaciones se obtuvo sumando el transporte de sedimento fino o carga lavada, el transporte de material de lecho en suspensión y el transporte de fondo. Los resultados del cálculo del transporte de sedimentos según las diferentes formas de transporte y las características del sedimento se resumen en la Tabla 3.40.

¹⁹ Einstein, H. A., 1950, "The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows", Technical Bulletin No. 1026, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC.



El estimativo del transporte total de sedimento en el sitio de presa se calculó a partir de curvas de área de la cuenca vs. transporte de sedimentos para cada una de las estaciones analizadas, realizando regresiones de tipo potencial para cada uno de los transportes estudiados, dando un total de sedimentos anual de 46,1 millones de toneladas, de los cuales 1,4 corresponden al transporte de fondo y los 44,7 restantes corresponden al transporte en suspensión, el cual, a su vez, está conformado por 25,6 millones de toneladas de material del lecho en suspensión y 19,1 de sedimento fino.

El transporte anual estimado corresponde a una tasa de producción anual de sedimentos en suspensión de 0,76 mm en toda la cuenca delimitada por el sitio de presa, considerando un peso específico de los suelos de 1,6 ton/m³. Si bien este valor puede considerarse como alto a nivel mundial, parece razonable para las condiciones topográficas, geomorfológicas y climáticas de la zona, de acuerdo con mediciones de sedimento efectuadas en otros embalses.

De otra parte, a nivel de transporte desagregado por tamaños de partículas, la Tabla 3.41 muestra la distribución de caudal sólido. Es de destacar que esta información desagregada por tamaño de partícula, fue la base para alimentar el modelo HEC-6 para analizar la depositación de sedimentos en el embalse y el estudio de degradación aguas abajo de la presa.

Tabla 3.41 Transporte anual de sedimentos desagregado por tamaños de partículas

Tamaño del grano	Tasa de transporte de caudal sólido (10 ⁶ ton/año)				
	Est. La Pintada	Est. Cañafisto	Est. Pto. Valdivia	Est. Apaví	Est. La Coquera
0.002 mm - 0.0625 mm	7,83	7,71	11,48	13,76	28,87
0.0625 mm - 0.125 mm	5,84	6,47	10,56	11,80	16,14
0.125 mm - 0.250 mm	4,66	5,03	9,20	9,60	9,38
0.250 mm - 0.500 mm	3,51	3,62	6,16	6,31	4,69
0.500 mm - 1.000 mm	2,25	2,41	4,11	4,22	3,00
1.000 mm - 2.000 mm	1,25	1,85	3,03	3,07	1,70
2.000 mm - 4.000 mm	0,68	1,46	2,51	1,90	0,87
4.000 mm - 8.000 mm	0,53	1,40	2,02	1,62	0,67
8.000 mm - 16.000 mm	0,52	1,15	1,84	1,47	0,90
16.000 mm - 32.000 mm	0,57	0,92	1,62	1,33	1,22
32.000 mm - 64.000 mm	0,37	0,85	1,25	1,01	0,00
64.000 mm - 128.000 mm	0,09	0,00	0,01	0,05	0,00
Total	28,10	32,87	53,79	56,14	67,45

3.10 CALIDAD DEL AGUA

Para la caracterización de la calidad del agua de la zona de influencia del proyecto, se seleccionaron seis estaciones sobre el Río Cauca y once estaciones en tributarios del Río Cauca, incluyendo una pequeña quebrada afluente del Río San Andrés, definida por su representatividad en términos de la influencia que se pueda presentar sobre ella durante la fase de construcción del proyecto.



Se realizó una visita a cada uno de los sitios de muestreo durante los meses de julio y agosto de 2006. La descripción y la ubicación de las estaciones de muestreo se presentan en la Tabla 3.42 y la Tabla 3.43.

Tabla 3.42 Ubicación de los puntos de muestreo

Punto de Muestreo	Cuerpo de agua	Longitud	Latitud	X	Y
1	Río Cauca PO	75° 48' 0.1''	6° 34' 52.0''	1'141615	1'219388
2	Qda La Barbuda	75° 48' 51.8''	6° 37' 56.9''	1'140069	1'225046
3	Qda Juan García	75° 49' 3.7''	6° 40' 38.2''	1'139690	1'230002
4	Río Cauca Lib.	75° 50' 22.5''	6° 40' 10.9''	1'137272	1'229159
5	Qda Rodas	75° 49' 24.9''	6° 45' 48.2''	1'139013	1'239525
6	Qda La Honda	75° 52' 27.1''	6° 47' 14.2''	1'133411	1'242154
7	Qda Clara	75° 52' 34.3''	6° 47' 23.4''	1'133190	1'242436
8	Río Cauca SL	75° 50' 52.6''	6° 52' 31''	1'136288	1'251897
9	Qda Peque	75° 48' 47.7''	7° 0' 49''	1'140084	1'267209
10	Qda La Peña	75° 46' 45.9''	7° 2' 56.6''	1'143812	1'271138
11	Qda Santamaría	75° 46' 6.5''	7° 3' 47.5''	1'145016	1'272707
12	Qda. Tacui	75° 41' 17.2''	7° 4' 13.1''	1'153897	1'273518
13	Río San Andrés	75° 40' 25.7''	7° 3' 28.2''	1'155480	1'272145
14	Río Cauca PP	75° 41' 52.1''	7° 5' 28.8''	1'152816	1'275842
15	Río Ituango	75° 46' 17.5''	7° 13' 24''	1'144629	1'290421
16	Río Cauca sitio de presa	75° 39' 46''	7° 7' 59''	1'156520	1'281280
17	Río Cauca después de descarga	75° 39' 39''	7° 8' 18''	1'157060	1'281560

NOTA: PP: Puente Pescadero; SL: Sabanalarga; Lib: Liborina; PO: Puente de Occidente



Tabla 3.43 Descripción de los sitios de muestreo

Estación de muestreo	Descripción
Río Cauca Puente Occidente (Río Cauca PO)	La cobertura de ambas márgenes es potrero bordeado con rastrojo bajo; en la margen derecha se observó una playa amplia de roca y arena; sustrato de roca y arena, aguas turbias y corriente fuerte.
Quebrada Barbuda	Márgenes cubiertas con rastrojo alto, agua clara y corriente suave; sustrato formado por roca, grava y arena; el lecho de la corriente está muy intervenido; en el sitio de muestreo se observó una construcción para el represamiento de la corriente con fines recreativos.
Quebrada Juan García	Ambas márgenes cubiertas por rastrojo alto; sustrato de roca, grava y arena; corriente fuerte y torrentosa; en el sitio de muestreo se observaron zonas con agua estancada. El lecho de la quebrada hace parte de la carretera.
Río Cauca - Liborina (Río Cauca Lib)	Playa rocosa y amplia, cubierta por rastrojo y potrero; talud izquierdo profundo, lecho formado por roca, grava y arena, agua turbia y corriente fuerte.
Quebrada Rodas	Playa rocosa bordeada por rastrojo alto; aguas claras de corriente moderada, playa amplia en la margen izquierda, corriente torrentosa, sustrato de roca, grava y arena.
Quebrada Honda	Ambas márgenes cubiertas con rastrojo alto; sustrato formado por roca, grava, cascajo y arena, carácter torrentoso, aguas claras y con corriente rápida.
Quebrada Clara	Ambas márgenes cubiertas con rastrojo alto; sustrato formado por roca, grava y arena, carácter torrentoso, aguas claras y corriente rápida.
Río Cauca – Sabanalarga (Río Cauca Sab)	Este muestreo se realizó aproximadamente 50 metros aguas abajo de la desembocadura de la Quebrada San Pedro (Niquia); ambas márgenes con playa rocosa bordeada por rastrojo alto, aguas turbias de corriente muy fuerte y sustrato formado por roca y arena.
Río Peque	Ambas márgenes están cubiertas por rastrojo alto, lecho de pendiente muy fuerte y cañón profundo, aguas claras y corriente fuerte; el sustrato está formado por roca, grava y arena.
Quebrada Pená	Cañón con pendiente muy fuerte y profundo, cubierta en su parte alta por potreros y árboles aislados; corriente torrentosa, de aguas claras y sustrato formado por roca, grava y arena.
Quebrada Santamaría	Ambas márgenes cubiertas por rastrojo alto, sustrato formado por roca, grava y arena, de aguas claras y corriente fuerte.
Quebrada Tacui	La cobertura de la margen izquierda la conforman cultivos de yuca y maíz, la margen derecha por rastrojo bajo; la corriente es suave, el agua es clara, el sustrato está formado por roca, grava y arena. El ancho de la corriente en el sitio de muestreo es de aproximadamente 2 metros y la profundidad de 20 cm; es afluente del río San Andrés.
Río San Andrés	En la margen derecha se observa una playa rocosa y ancha, bordeada por rastrojo bajo; la margen izquierda está formada por un cañón de alta pendiente cubierta por rastrojo alto, el río es muy turbulento, el sustrato es formado por roca y arena. Este tramo es utilizado para la recreación.
Río Cauca, Puente Pescadero (Río Cauca PP)	Las riberas en ambas márgenes están formadas por rastrojo alto, playa rocosa; sustrato formado por roca y arena oscura; agua turbia, corriente fuerte, este sitio es visitado con fines recreativos y para pesca, además es explotado para la minería.
Río Ituango	Cobertura vegetal de rastrojo bajo y potrero en la margen derecha y rastrojo alto en la margen izquierda; la corriente es fuerte y el río turbulento, el sustrato está formado por arena, roca y grava.
Río Cauca, sitio de presa (Río Cauca SP)	Las márgenes están cubiertas por rastrojo alto, el sustrato formado por roca y arena; agua turbia, corriente fuerte.
Río Cauca, después de la descarga (Río Cauca DD)	Márgenes con rastrojo alto, sustrato formado por roca y grava, aguas turbias y corriente fuerte.

3.10.1 Caracterización físico-química y bacteriológica

Para el ordenamiento del recurso, según el Artículo 23 del Decreto 1594/84, deben tenerse en cuenta los criterios de calidad del agua, lo cual permite establecer sus usos adecuados y la capacidad admisible de vertimientos; además, la caracterización del



afluente también se constituye en la información de partida para la aplicación de modelos de simulación.

3.10.1.1 Metodología

Para establecer la calidad del recurso en el área de estudio del proyecto hidroeléctrico Ituango, se identificaron los afluentes más importantes de la zona, cuyas características de ubicación y tamaño de la cuenca fueran relevantes; así mismo, se definieron puntos específicos a lo largo del Río Cauca, que permitieran caracterizar su calidad. En total se realizaron 17 muestreos durante los meses de julio, agosto y septiembre de 2006, seis de ellos sobre el Río Cauca. La localización de los puntos se presenta en la Tabla 3.42 y la descripción de cada uno en la Tabla 3.43. En estos mismos sitios se realizó el muestreo para el análisis de macroinvertebrados y perifiton.

- **Protocolos de muestreo**

Con equipos portátiles previamente calibrados, se determinó *in situ* en cada uno de los sitios de muestreo: temperatura ambiente, temperatura del agua, pH, conductividad y oxígeno disuelto; el levantamiento de dicha información se consignó en un formato diseñado para tal fin y se complementó con registro fotográfico.

Los demás análisis se realizaron en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) y Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), ambos acreditados por el IDEAM. Las muestras se recolectaron siguiendo todas las indicaciones del IDEAM en cuanto a toma de muestras, preservación, refrigeración y transporte²⁰. Los parámetros evaluados se presentan en la Tabla 3.44

- **Indicadores ambientales**

“En su sentido más amplio, un *índice o indicador ambiental* es un número o una clasificación descriptiva de una gran cantidad de datos o información ambiental cuyo propósito principal es simplificar la información para que pueda ser útil a los decisores y al público”.²¹

- **Índice de calidad NFS-WQI**

Un índice de calidad de agua es un único número que expresa la calidad del agua en un punto y un momento determinado, basado en diversas variables medidas sobre la fuente. El objetivo es convertir una gran cantidad de información en un solo dato que sea fácilmente entendible.

²⁰ Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y aguas subterráneas. IDEAM. www.ideam.gov.co (consultado: junio 2007)

²¹ Canter W. Larry, 1998. Manual de Evaluación de Impacto Ambiental. Pág 149

Tabla 3.44 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados

Parámetro	Lugar de medición
Oxígeno Disuelto (OD)	In Situ
pH	In Situ
Conductividad eléctrica	In Situ
Temperatura del agua	In Situ
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	UPB
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	UPB
Sólidos Suspendidos	UPB
Sólidos Disueltos	UPB
Sólidos Totales	UPB
Turbidez	UPB
Nitrógeno total (NTK: N Total Kjeldahl)	UPB
Nitritos (NO ₂)	UPB
Nitratos (NO ₃)	CORANTIOQUIA
Amonio (NH ₃)	UPB
Alcalinidad	UPB
Dureza	UPB
Sulfatos (SO ₄)	UPB
Cloruros (Cl ⁻)	UPB
Fósforo total	UPB
Ortofosfatos	UPB
Hierro	UPB
Coliformes Totales	UPB, CORANTIOQUIA
Coliformes Fecales	UPB, CORANTIOQUIA

Los índices de calidad dependen de las variables incluidas, de la importancia sanitaria de cada una de ellas de acuerdo al uso específico a que se destine el agua, y de los objetivos para los cuales son aplicados.

El índice de calidad de agua WQI fue desarrollado a principios de los años 70 por la fundación para la Sanidad Nacional de los Estados Unidos (NSF en sus siglas en inglés), como resultado de la conciliación de criterios de 142 expertos de ese país. Permite tener una idea general de los problemas que puede tener el agua y del enfoque que debe darse a posteriores estudios; además, sirve como base de comparación espacial y temporal de calidad en diferentes cuerpos de agua.

La determinación de índice WQI requiere de la medición de las variables: oxígeno disuelto, coliformes fecales, pH, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, fosfatos, cambio de temperatura, turbiedad y sólidos totales, y se calcula como:

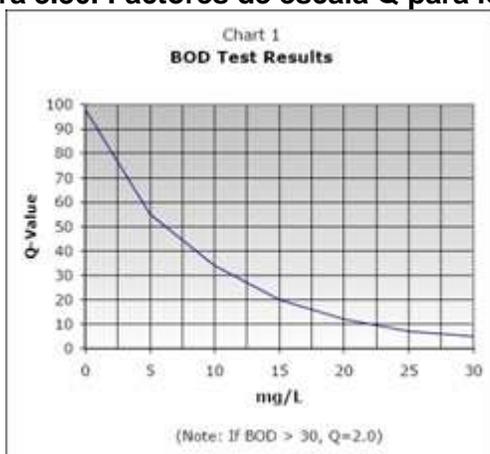
$$WQI = \sum_{i=1}^9 W_i \times Q_i$$

Donde W_i denota el factor de importancia de la variable i , respecto a las restantes variables involucradas en el índice, y Q_i corresponde al factor de escala de la misma. Este último depende de la magnitud de la variable y es independiente de las restantes. En la Tabla 3.45 se presentan los pesos de cada variable y la Figura 3.30. Factores de escala Q para los parámetros involucrados en el WQI-NSF esquematiza la obtención de Q para la cada una de éstas.

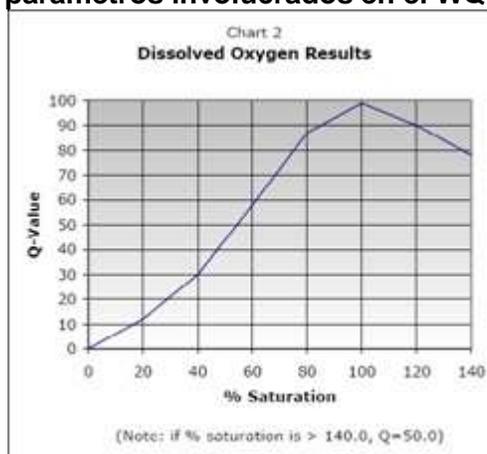
Tabla 3.45 Factores de ponderación NSF (tomada de <http://www.nsf.org>)

Variable	Factor W_i
% Saturación de oxígeno	0,17
Coliformes fecales	0,16
pH	0,11
Demanda bioquímica de oxígeno	0,11
Nitratos	0,10
Fosfatos	0,10
Temperatura ΔT	0,10
Turbiedad	0,08
Sólidos totales	0,07

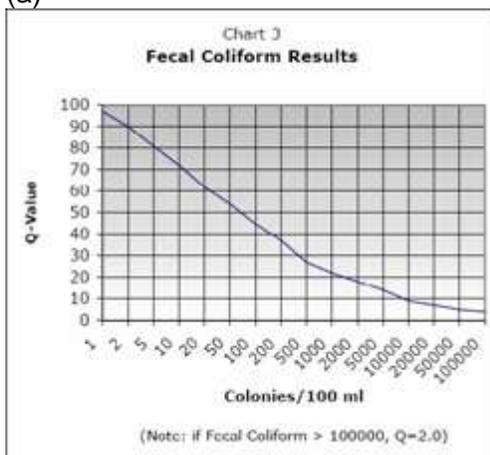
Figura 3.30. Factores de escala Q para los parámetros involucrados en el WQI-NSF



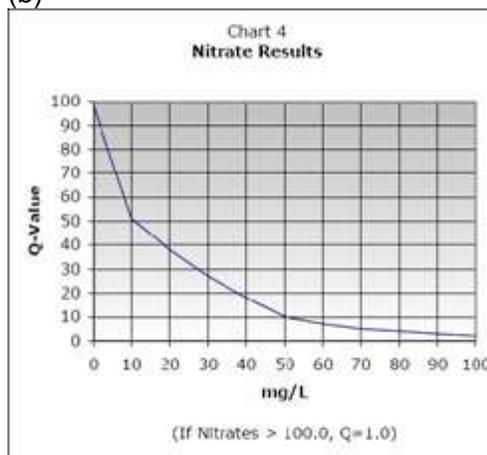
(a)



(b)

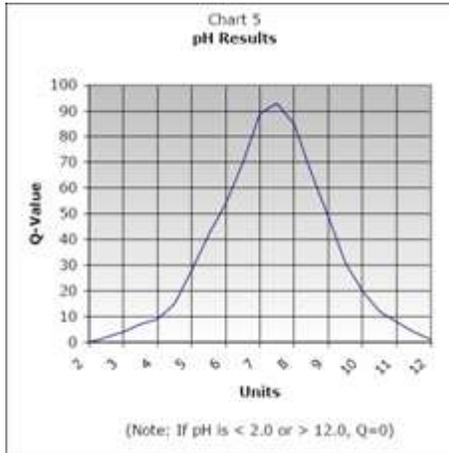


(c)

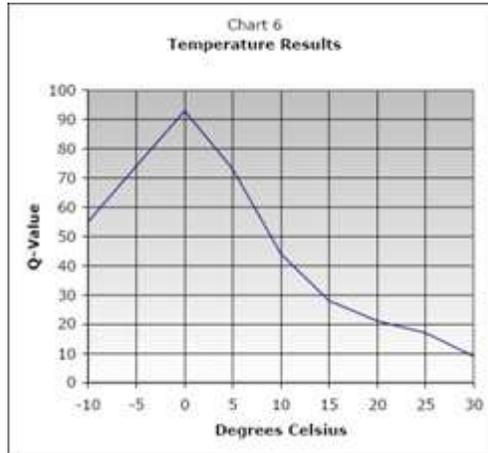


(d)

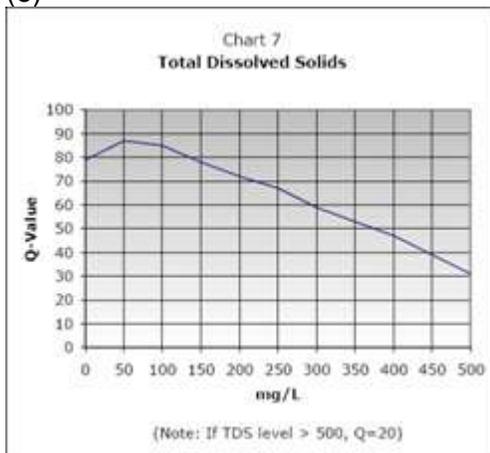
Figura 3.30. Factores de escala Q para los parámetros involucrados en el WQI-NSF (Continuación)



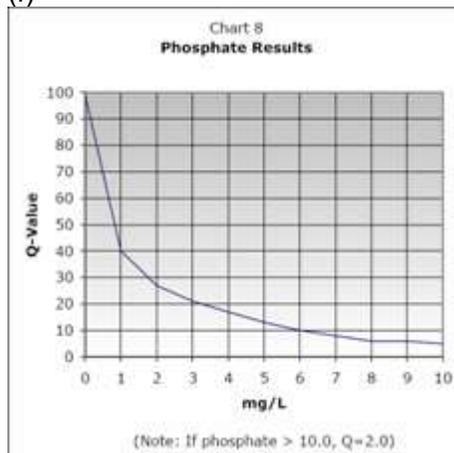
(e)



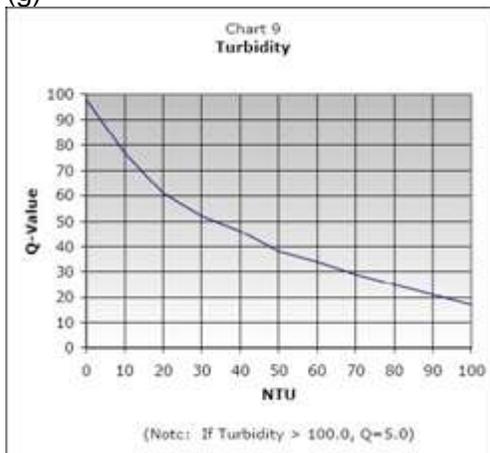
(f)



(g)



(h)



(i)

Una vez determinado el índice WQI en un punto determinado, puede clasificarse la fuente de acuerdo con los rangos que se señalan en la Tabla 3.46

Tabla 3.46. Clasificación de calidad del agua en función del índice NSF

Valor del índice	Clasificación
0 – 25	Calidad muy mala (MM)
26 – 50	Calidad mala (M)
51 – 70	Calidad media (R)
71 – 90	Calidad buena (B)
91 – 100	Calidad excelente (E)

Para calcular el % de saturación de oxígeno disuelto, se utiliza el oxígeno disuelto y el oxígeno de saturación, o sea el oxígeno disuelto en el agua pura, sin ninguna contaminación. Para calcular el oxígeno de saturación a diferentes alturas, se emplea la siguiente ecuación:

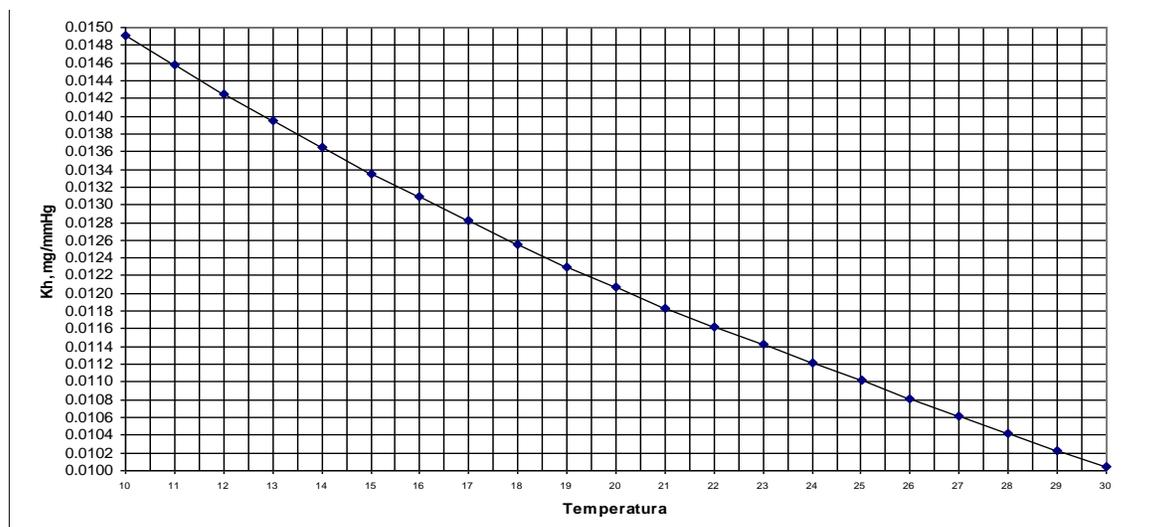
$$\text{Oxígeno de saturación} = Kh * (760 - 0,833 * h)$$

Donde:

Kh: constante de Henry para diferentes temperaturas; se determina a partir de la curva de la Figura 3.31.

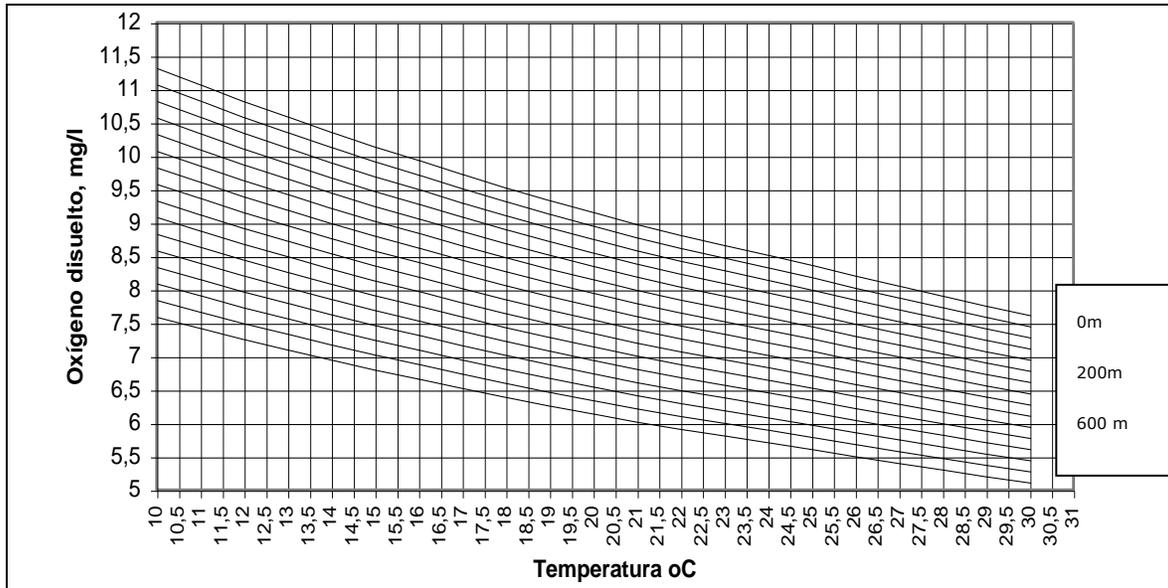
h: altura sobre el nivel del mar de la estación de muestreo.

Figura 3.31. Variación de la constante de Henry con la temperatura



Las curvas de oxígeno de saturación mostradas en la Figura 3.32 se construyen a partir de la constante de Henry a diferentes temperaturas y alturas.

Figura 3.32. Variación del oxígeno de saturación con la temperatura y la altura sobre el nivel del mar



- Índice de calidad Objetivo (ICA Obj)

El Departamento de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Chile, diseñó el denominado ICA Objetivo, basados en los parámetros Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Coliformes Fecales(CF)

Este índice se calcula de la siguiente forma:

$$ICA_{OBJ} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot (ICA)_i, \text{ donde}$$

n = número de parámetros

P_i = peso atribuido al parámetro i,

(ICA)_i= índice de calidad ambiental para el parámetro i, el cual se calcula de acuerdo con la establecido en la Tabla 3.47.

Tabla 3.47. Índices de Calidad Ambiental para cada parámetro

(ICA) _i	OD mg/l	DBO ₅ mg/l	Coliformes Fecales NMP/100 ml
1	OD > 5	DBO ₅ < 2	10 ⁰ ≤ CF ≤ 10 ³
2	3 < OD ≤ 5	2 ≤ DBO ₅ < 60	10 ³ < CF ≤ 10 ⁴
3	0 < OD ≤ 3	60 ≤ DBO ₅ < 100	10 ⁴ < CF ≤ 10 ⁵
4	OD = 0	DBO ₅ ≥ 100	CF > 10 ⁵

Fuente: Sancha, A.; Espinoza, C. y Castillo, G.V. 1998. Proyecto OTAS I y II Etapa



El peso asignado a cada uno de los parámetros considerados en el ICA_{OBJ} , que se presentan en la Tabla 3.48, se basó en:

- La concentración del parámetro en aguas limpias y contaminadas
- El impacto del contaminante en el ecosistema (vida acuática)
- El impacto del contaminante en el tratamiento posterior del agua
- El impacto del contaminante en el uso riego y recreación

Tabla 3.48. Ponderación de Parámetros del ICA Objetivo (ICA_{OBJ})

Parámetros	Peso Ponderado
Oxígeno Disuelto (<i>OD</i>)	0.33
Demanda de Bioquímica de Oxígeno (<i>DBO₅</i>)	0.33
Coliformes Fecales	0.33

Fuente: Sancha, A.; Espinoza, C. y Castillo, G.V. 1998. Proyecto OTAS I y II Etapa.

Finalmente, la valoración de cada parámetro y su agregado posterior permite obtener el Índice de Calidad Ambiental Objetivo, cuyo valor se clasifica de acuerdo con lo establecido en la Tabla 3.49.

Tabla 3.49. Rangos para el valor ($ICA_{objetivo}$)

Valor ICA	Calidad del Agua Superficial
$0 < ICA < 1.5$	Alta. Apta para uso potable con filtración directa en lecho granular y desinfección. Uso en riego sin restricción.
$1.5 \leq ICA < 2.5$	Media. Requieren procesos convencionales de coagulación, decantación, filtración y desinfección. Uso en riego restringido.
$2.5 \leq ICA \leq 3.0$	Baja. Su uso potable requiere tratamientos avanzados (membranas, carbón activado y ozono) adicionales a los convencionales. Inadecuada para riego de hortalizas de consumo crudo.
$3.0 \leq ICA \leq 4.0$	Muy Baja. No apta para ningún uso.

Fuente: Sancha, A.; Espinoza, C. y Castillo, G.V. 1998. Proyecto OTAS I y II Etapa

- Índice de Langelier

El índice de Langelier indica la tendencia de las aguas, bien sean naturales o tratadas, a ser corrosivas o incrustantes, así mismo permite conocer el grado de saturación del agua en carbonatos de calcio. Para determinar este índice se deben analizar los siguientes parámetros fisicoquímicos:

- pH
- Dureza cálcica, mg/l de $CaCO_3$
- Alcalinidad total, mg/l de $CaCO_3$

- Sólidos disueltos mg/l

El índice se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$IL = pH(A) - pH(s),$$

en donde:

- $pH(A) = pH$ del agua
- $pH(s) = A + B - \log(Ca^{+2}) - \log(\text{alcalinidad})$

A y B se determinan a partir de las curvas presentadas en la Figura 3.33 y en la Figura 3.34.

De acuerdo con el valor del índice, se define la tendencia del agua en la siguiente forma: Si el Índice de Langelier es negativo, indica que el agua disuelve el Carbonato de calcio ($CaCO_3$) y por lo tanto es corrosiva. Si el Índice de Langelier es positivo, indica que el agua está saturada con carbonato de calcio y por lo tanto es probable que forme depósitos.

Los resultados de los índices NFS-WQI, ICAObj y Langelier para los cuerpos de agua muestreados se presentan en la Tabla 3.50

Tabla 3.50. Resultados de los parámetros microbiológicos

Cuerpo de agua	Coliformes Totales	Coliformes Fecales
Río Cauca- Puente Occidente	>160,0*105	90,0*104
Quebrada La Barbuda	>160,0*105	0,5*103
Quebrada Juan García	160,0*104	14,0*103
Río Cauca- Liborina	60,0*105	14,0*103
Quebrada Rodas	90,0*104	2,5*103
Quebrada La Honda	>160,0*104	3,5*102
Quebrada Clara	160,0*103	3,5*102
Río Cauca- Sabanalarga	110*103	11*103
Quebrada Peque	79*103	49*103
Quebrada. Pená	23*103	13*103
Quebrada Santamaría	8*103	2*103
Quebrada Tacui	30,0*103	0,5*103
Río San Andrés	13*103	13*103
Río Cauca- Puente Pescadero	35,0*104	3,0*103
Río Ituango	33*103	8*103
Río Cauca sitio de presa	23*103	8*103
Río Cauca descarga	46*103	46*103



Figura 3.33. Constante A - Cálculo Índice de Langelier

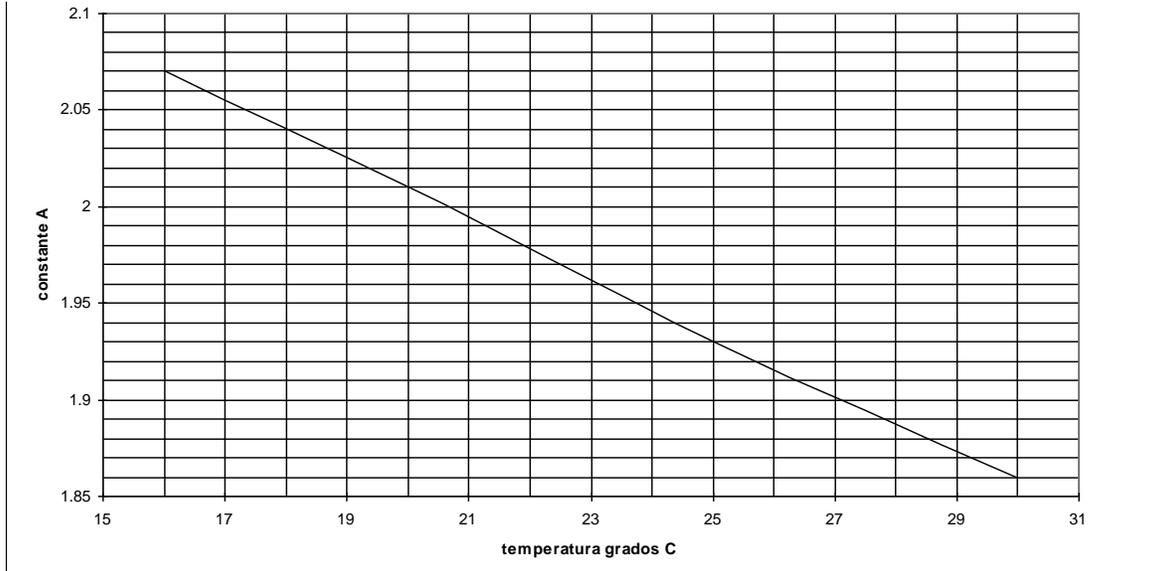
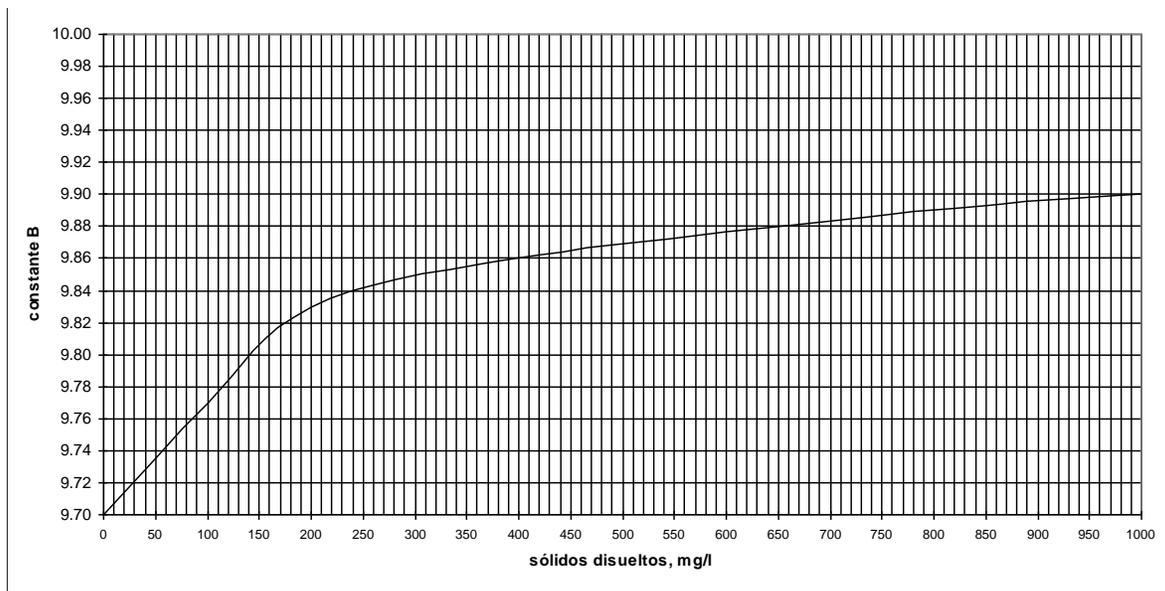


Figura 3.34 Constante B, Cálculo del Índice de Langelier



3.10.1.2 Marco Legal

En nuestro país, los usos permitidos de acuerdo con la calidad del agua de las fuentes superficiales, están establecidos por el Decreto 1594 de 1984 (Capítulo IV: "De los



criterios de calidad para destinación del recurso”) y por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000; Ministerio de Desarrollo Económico) en su Título B para el caso de destinación del recurso para agua potable.

De acuerdo con el uso final que ha de dársele al agua, el Decreto 1594 ha establecido los umbrales que se presentan en la Tabla 3.51. Sólo se presentan aquellos parámetros que fueron analizados en este estudio.

Tabla 3.51 Criterios de calidad admisible según su uso

Referencia	Expresado como	Consumo humano – tratamiento convencional	Consumo humano - desinfección	Uso agrícola	Uso pecuario	Uso recreativo contacto primario	Uso recreativo contacto secundario
Nitratos (ppm)	N	10	10		100		
Nitritos (ppm)	N	1	1		10		
pH (unidades)	Unidades	5-9	6,5 – 8,5	4,5 – 9,0		5-9	5-9
Coliformes totales (micro/100 ml)	NMP	20.000		5.000		200	5000
Coliformes fecales (micro/100 ml)	NMP	2.000	1.000	1.000		1.000	
Turbiedad (UJT)			10				
Oxígeno disuelto (% de la concentración de saturación)						70	70

Para los usos referentes a transporte, dilución y asimilación no se establecen criterios de calidad, aunque si se establecen controles para los vertimientos. Para el uso industrial sólo se definen límites para las actividades relacionadas con explotación de cauces, playas y lechos.

En la Tabla 3.52 se presenta la clasificación de los niveles de calidad de las fuentes de abastecimiento establecidos por el RAS para la potabilización de aguas superficiales, en función de variables mínimas de análisis fisicoquímicos y microbiológicos, y el grado de tratamiento asociado.



Tabla 3.52 Niveles de calidad de agua establecidos para la potabilización de fuentes superficiales (Tomada del RAS 2000, numeral B.3.3.2.1)

Parámetros	Análisis según		Nivel de calidad de acuerdo al grado de polución			
	Norma técnica NTC	Standard Method ASTM	Fuente aceptable	Fuente regular	Fuente deficiente	Fuente muy deficiente
DBO ₅	3630					
Promedio mensual mg/l			≤ 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 4	>4
Máximo diario mg/l			1 – 3	3 - 4	4 – 6	>6
Coliformes totales (NMP/100 mL)						
Promedio mensual		D-3870	0 – 50	50 – 500	500 – 5.000	>5.000
Oxígeno disuelto mg/l	4705	D-888	≥4	≥4	≥4	<4
pH promedio	3651	D 1293	6,0 – 8,5	5,0 – 9,0	3,8 – 10,5	
Turbiedad (UNT)	4707	D 1889	<2	2 – 40	40 – 150	≥ 150
Color verdadero (UPC)			<10	10 –20	20 – 40	≥ 40
Gusto y olor		D 1292	Inofensivo	Inofensivo	Inofensivo	Inaceptable
Cloruros (mg/l - Cl)		D 512	< 50	50 – 150	150 – 200	300
Fluoruros (mg/l - F)		D 1179	<1,2	<1,2	<1,2	>1,7
GRADO DE TRATAMIENTO						
- Necesita un tratamiento convencional			NO	NO	Sí, hay veces (ver requisitos para uso FLDE : literal C.7.4.3.3)	SI
Necesita unos tratamientos específicos			NO	NO	NO	SI
Procesos de tratamiento utilizados			(1) = Desinfección + Estabilización	(2) = Filtración Lenta o Filtración Directa + (1)	(3) = Pretratamiento + [Coagulación + Sedimentación + Filtración Rápida] o [Filtración Lenta Diversas Etapas] + (1)	(4) = (3) + Tratamientos específicos

3.10.1.3 Resultados

Los resultados de los parámetros medidos *in situ* se presentan en la Tabla 3.53 y en la Figura 3.35 y la Figura 3.36; los evaluados en el laboratorio en la Tabla 3.54 y la Figura 3.37 y los parámetros microbiológicos medidos en laboratorio en la Tabla 3.55. Además en la Tabla 3.56 se presentan los resultados de los cálculos de los índices de calidad de agua.

Tabla 3.53. Resultados de los parámetros medidos *in situ*

Punto de muestreo	Cuerpo de agua	T ambiente (°C)	T agua (°C)	Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH UN	Oxígeno Disuelto mg/l
1	Río Cauca Puente Occidente (R Cauca PO)	29,8	25,8	142	6,22	7,8
2	Quebrada La Barbuda	25,9	23,5	323	9,40	8,90
3	Quebrada Juan García	29,1	25,6	200	8,70	9,3
4	Río Cauca Liborina	36,1	27,8	166	8,58	6,6
5	Quebrada Rodas	36,2	25,8	197	9,65	10,8
6	Quebrada La Honda	35,0	27,1	195	9,70	11,2
7	Quebrada Clara	35,0	26,4	190	9,5	10,1
8	Río Cauca Sabanalarga.	37,9	28,1	167	9,10	1,9
9	Quebrada Peque	27,5	24,2	250	9,43	6,0
10	Quebrada Pená	31,2	26,4	210	9,38	5,4
11	Quebrada Santamaría	28,9	22,7	179	9,51	7,4
12	Quebrada Tacui	26,5	25,6	340	7,06	4,5
13	Río San Andrés	23,1	20,2	110	9,05	9,5
14	Río Cauca Puente Pescadero	33,4	27,3	166,2	9,0	5,0
15	Río Ituango	36,2	23,2	159	9,1	8,5
16	Río Cauca, sitio de presa (R Cauca SP)	34,2	24,8	170	9,1	6,3
17	Río Cauca, después descarga (R Cauca DD)	35,1	25,7	203	8,95	5,9

Figura 3.35. Variación de los parámetros *in situ*

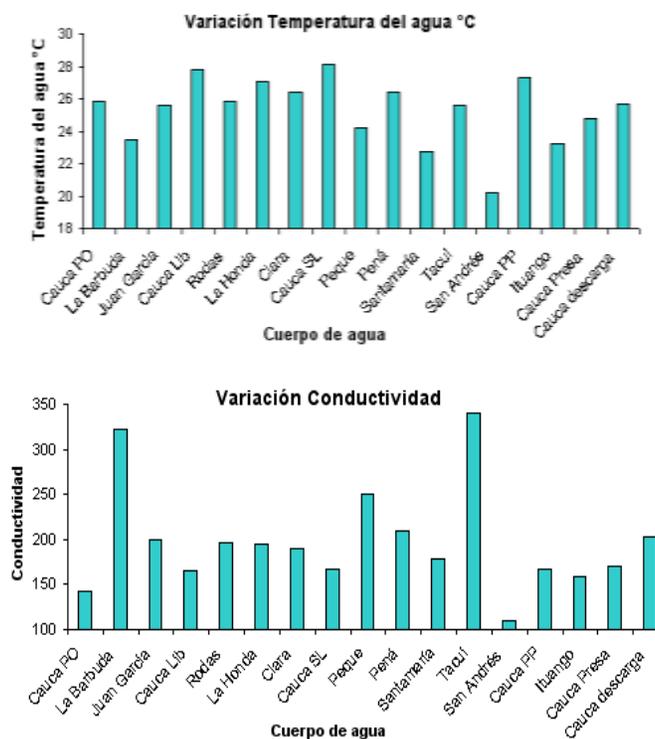


Figura 3.36. Variación de los parámetros *in situ*

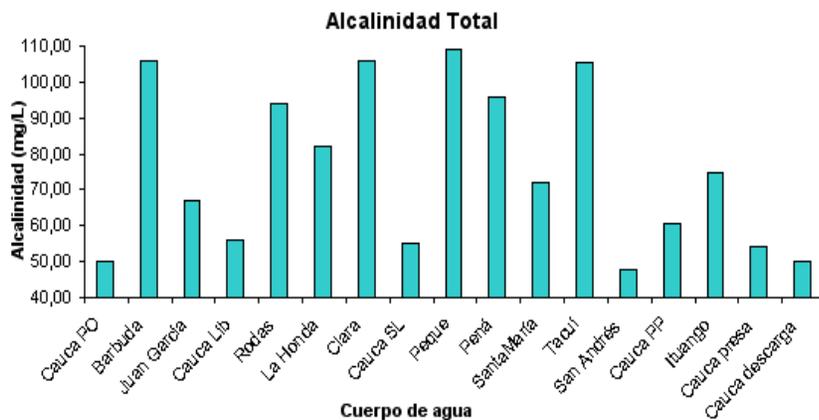
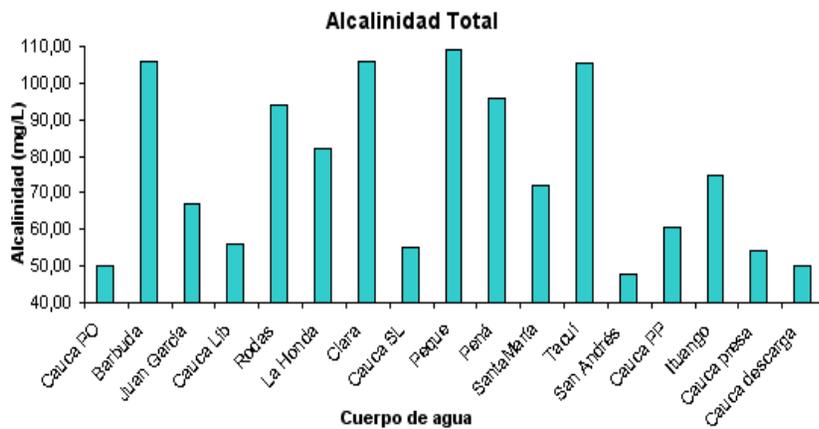
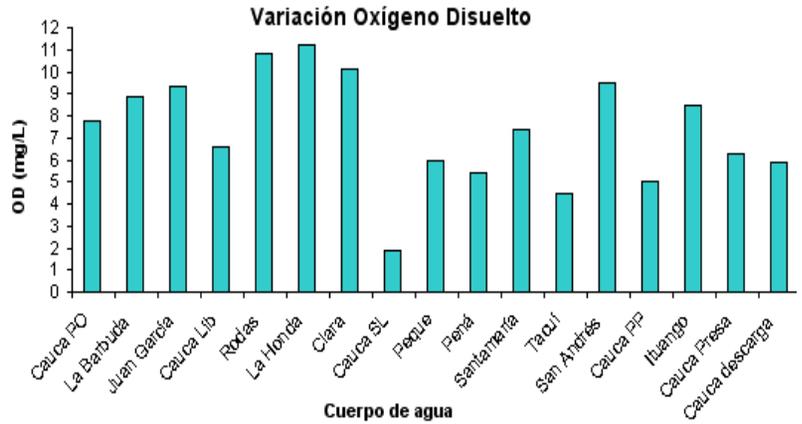




Tabla 3.54 Resultados de los parámetros Fisicoquímicos en Laboratorio (Los resultados se presentan en mg/l excepto para Turbiedad (NTU))

Cuerpo de agua	Alcalinidad Total	Cloruros	DBO ₅	DQO	Dureza Total	Fósforo Total	Fósforo Reactivo	Nitritos	Nitrógeno Amoniacal	Nitrógeno Total	Nitratos	Sólidos Totales	Sólidos Suspendidos	Sólidos disueltos	Sulfatos	Turbiedad NTU	Hierro
Río Cauca- PO	50	4,3	5,20	93,5	48,47	0,76	0,07	<0,002	<3,0	<3,0	6,93	1260	1041	219	32,06	1000	0,042
Q. Barbuda	106	<3,0	2,70	<47	143,58	0,07	<0,04	<0,002	<3,0	<3,0	1,68	282	11,2	270,8	74,69	6,95	0,366
Q. Juan García	67	3,9	2,36	<47	77,528	0,08	<0,04	0,006	<3,0	<3,0	0,23	165	24,3	140,7	36,87	15,62	1,107
Río Cauca Lib.	56	6,7	2,86	<47	44,391	0,41	0,09	0,008	<3,0	<3,0	<0,04	772	588,5	183,5	21,77	695	97,29
Q. Rodas	94,0	<3,0	<2,00	<47	83,98	0,08	0,07	0,006	<3,0	<3,0	0,06	145	7,0	138	22,83	6,57	0,042
Q.. La Honda	82	<3,0	2,66	<47	61,548	0,14	0,09	<0,002	<3,0	<3,0	0,07	156	19,2	136,8	21,96	9,26	0,801
Q.. Clara	106	7,2	2,16	<47	116,391	0,05	<0,04	0,003	<3,0	<3,0	<0,04	233	35,2	197,8	35,04	19,3	1,630
Río Cauca SL	55	4,5	<2,00	<47	62,054	0,47	0,20	0,015	<3,0	<3,0	16,4	645	374	271	23,31	142	8,353
Q. Peque	109	<3,0	<2,00	<47	121,879	0,10	0,06	0,007	<3,0	<3,0	28,4	237	58,2	178,8	40,71	45,4	3,061
Q.. Pená	96	<3,0	<2,00	<47	95,65	0,05	<0,04	0,005	<3,0	<3,0	27,0	166	19,3	146,7	41,62	25,1	1,478
Q. Santa maría	72,0	<3,0	<2,00	<47	65,870	0,08	<0,04	0,007	<3,0	<3,0	15,9	147	43,3	103,7	27,35	32,4	2,419
Q. Tacuí	105,3	<3,0	<2,00	<47	130,614	0,17	0,06	<0,002	<3,0	<3,0	17,6	267	18,7	249	85,10	8,70	0,389
R. San Andrés	48,0	<3,0	4,27	<47	58,422	0,23	<0,04	0,015	<3,0	<3,0	12,4	613	514	99,2	15,23	263	17,67
R. Cauca PP	60,5	3,9	<2,00	<47	66,89	0,23	0,04	0,013	<3,0	<3,0	14,0	279	150	131	11,50	138,0	8,961
R. Ituango	75,0	<3,0	2,79	<47	78,701	0,18	0,07	0,011	<3,0	<3,0	17,4	383	261	122	17,92	211	16,66
R. Cauca- Sitio presa	54,0	6,4	10,7	<47	68,366	0,3250	0,07	0,0176	<5,0	3,9	5,46	407,0	327,7	79,3	18,4	276,0	14,159
R. Cauca- Abajo descarga	50,0	7,9	8,8	<47	64,761	0,45	0,095	0,0166	<5,0	<3,0	5,5	505,0	402,7	102,3	17,5	15,248	15,248

Nota. PP: Puente Pescadero; SL: Sabanalarga; Lib: Liborina; PO: Puente de Occidente



Figura 3.37. Variación de los parámetros fisicoquímicos

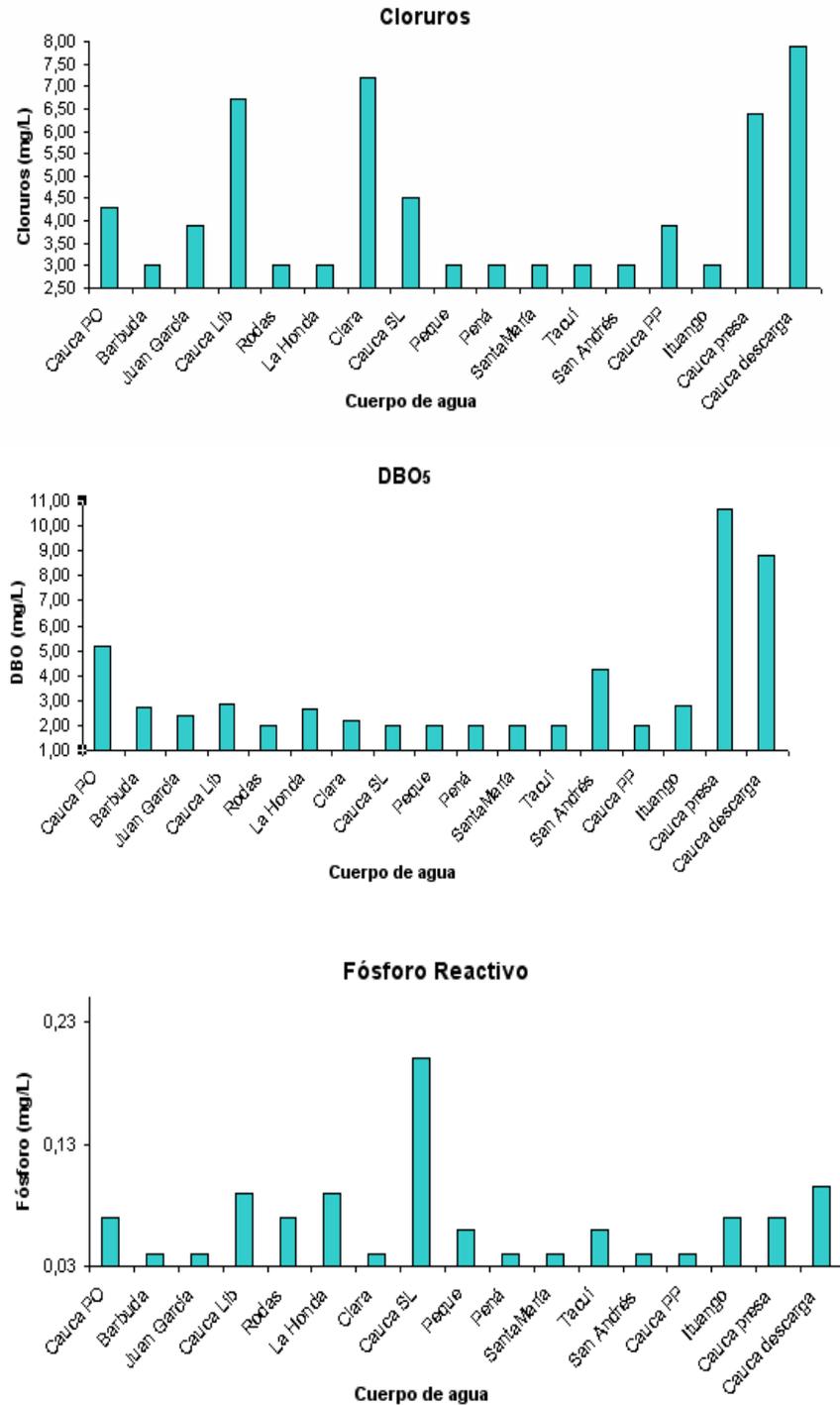


Figura 3.37. Variación de los parámetros fisicoquímicos (Continuación)

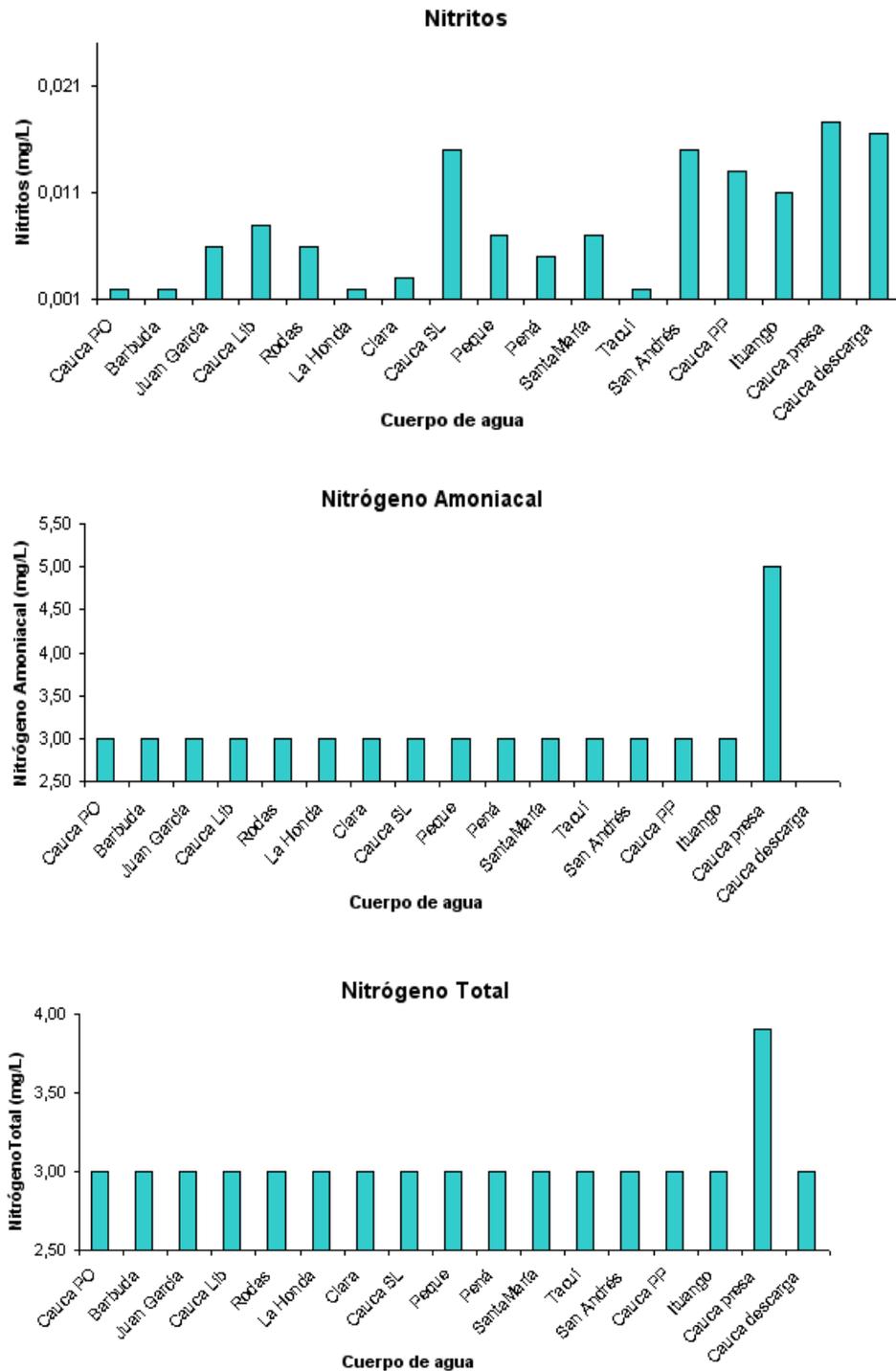


Figura 3.37. Variación de los parámetros fisicoquímicos (Continuación)

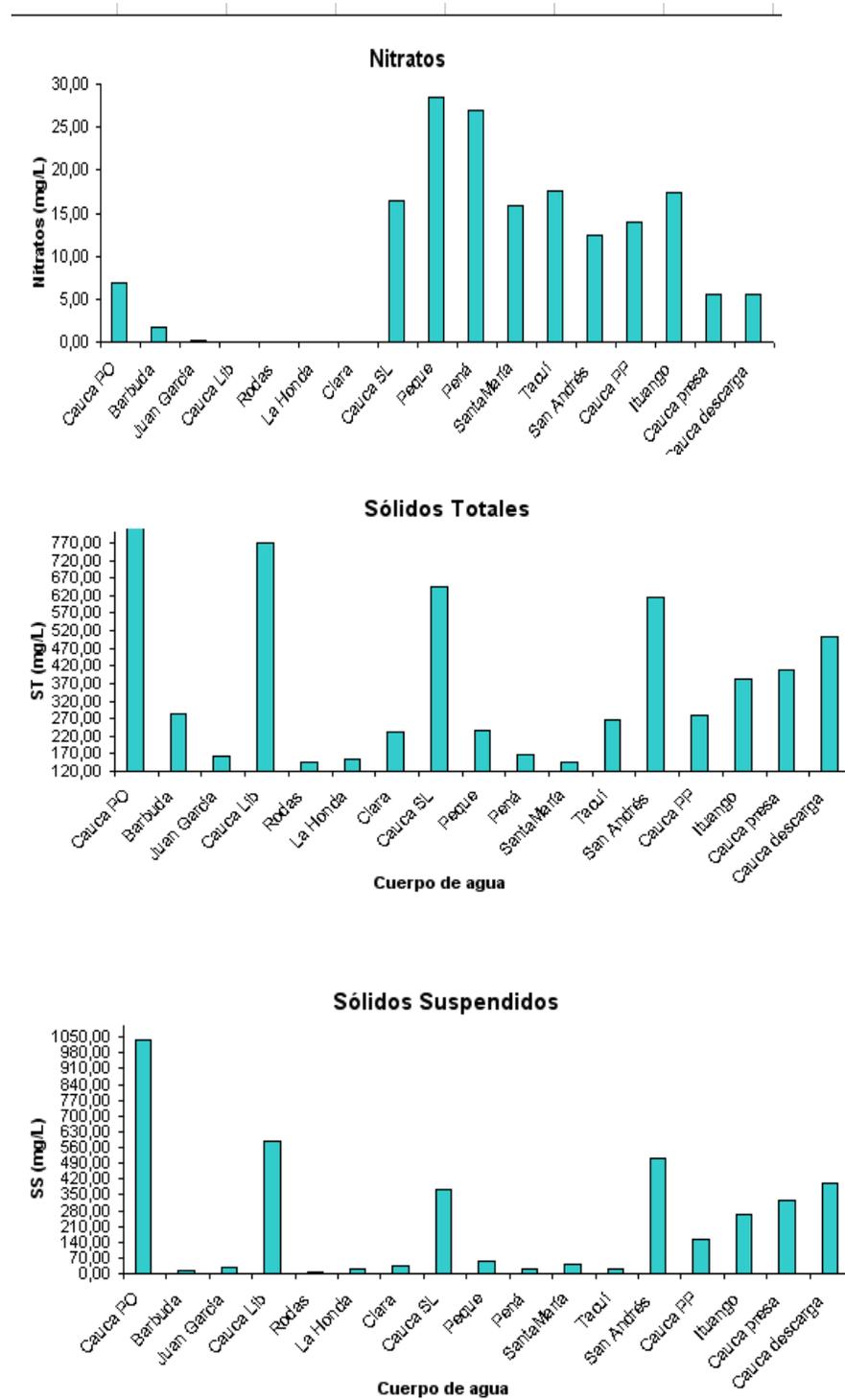


Figura 3.37. Variación de los parámetros fisicoquímicos. (Continuación)

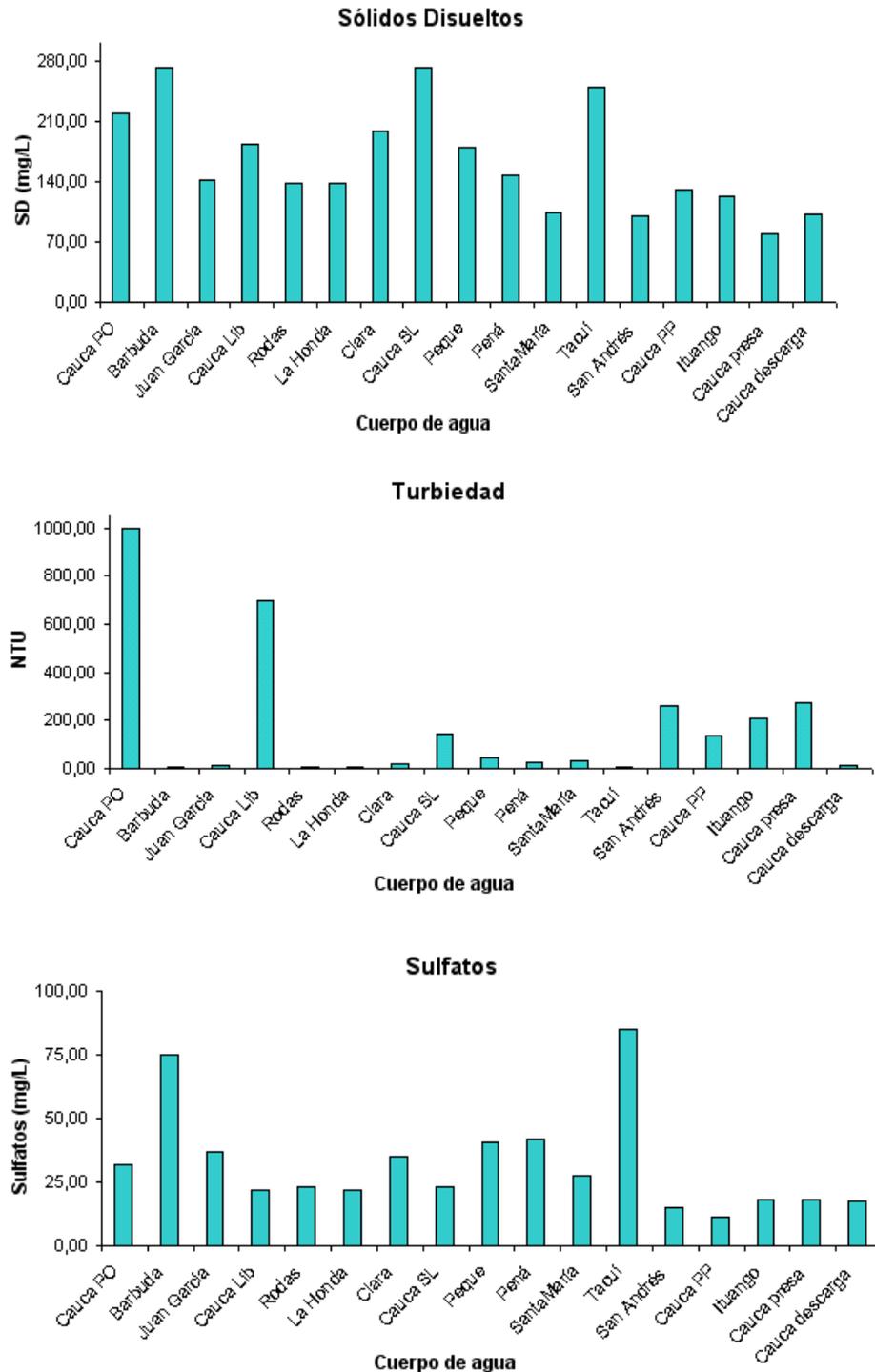


Figura 3.37. Variación de los parámetros fisicoquímicos. (Continuación)

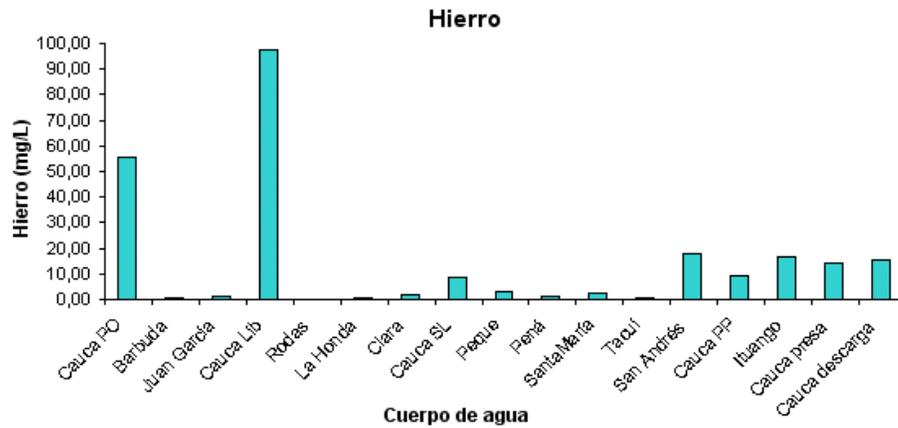


Figura 3.4. Variación de los parámetros microbiológicos

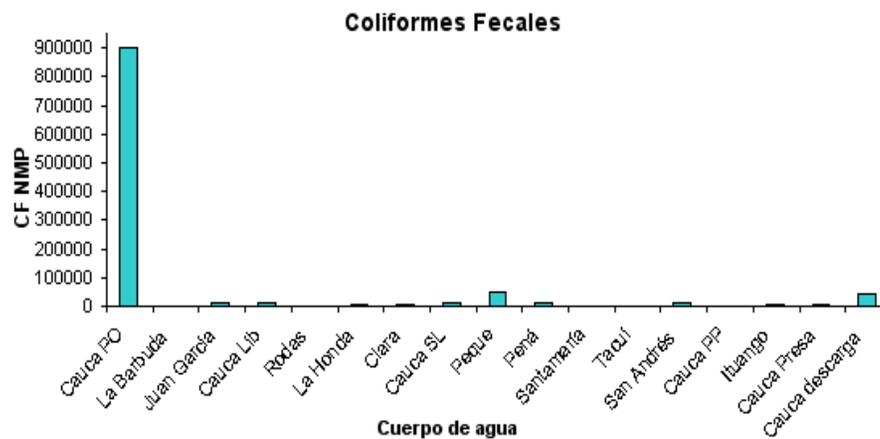
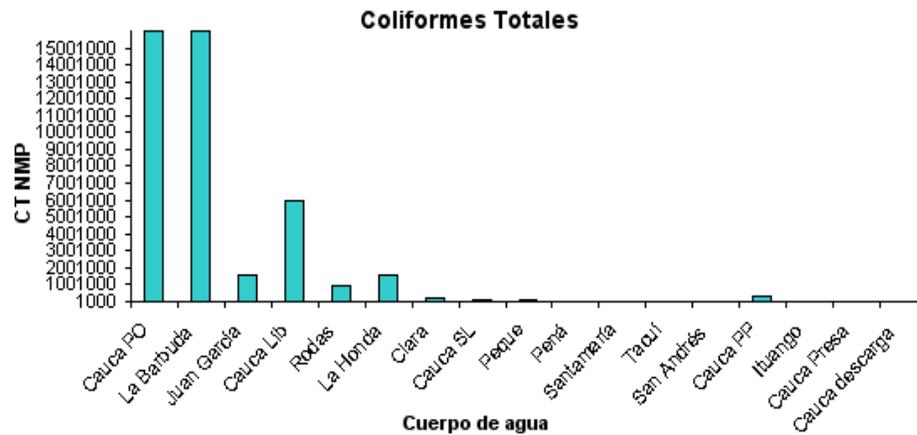




Tabla 3.55 Resultados de los parámetros microbiológicos

Cuerpo de agua	Coliformes Totales	Coliformes Fecales
Río Cauca- Puente Occidente	$>160,0 \cdot 10^5$	$90,0 \cdot 10^4$
Quebrada La Barbuda	$>160,0 \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^3$
Quebrada Juan García	$160,0 \cdot 10^4$	$14,0 \cdot 10^3$
Río Cauca- Liborina	$60,0 \cdot 10^5$	$14,0 \cdot 10^3$
Quebrada Rodas	$90,0 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^3$
Quebrada La Honda	$>160,0 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^2$
Quebrada Clara	$160,0 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^2$
Río Cauca- Sabanalarga	$110 \cdot 10^3$	$11 \cdot 10^3$
Quebrada Peque	$79 \cdot 10^3$	$49 \cdot 10^3$
Quebrada. Pená	$23 \cdot 10^3$	$13 \cdot 10^3$
Quebrada Santamaría	$8 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
Quebrada Tacui	$30,0 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^3$
Río San Andrés	$13 \cdot 10^3$	$13 \cdot 10^3$
Río Cauca- Puente Pescadero	$35,0 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^3$
Río Ituango	$33 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$
Río Cauca sitio de presa	$23 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$
Río Cauca descarga	$46 \cdot 10^3$	$46 \cdot 10^3$

Tabla 3.56. Índices calidad NFS-WQI, ICAObj, Langelier y clasificación de afluentes

Cuerpo de agua	Índice NFS- WQI		Índice ICA Obj		Índice de Langelier	
	Valor	Clasificación	Valor	Clasificación	Valor	Clasificación
Río Cauca- Puente Occidente	55	Media	2,31	Media	-2,15	Corrosivo
Quebrada La Barbuda	71	Buena	1,32	Alta	1,80	Incrustante
Quebrada Juan García	65	Media	1,98	Media	0,67	Incrustante
Río Cauca- Liborina	58	Media	1,98	Media	0,29	Incrustante
Quebrada Rodas	64	Media	1,32	Alta	1,87	Incrustante
Quebrada La Honda	61	Media	1,32	Alta	1,70	Incrustante
Quebrada Clara	66	Media	1,32	Alta	1,85	Incrustante
Río Cauca- Sabanalarga	38	Mala	2,31	Media	0,95	Incrustante
Quebrada Peque	56	Media	1,65	Media	1,79	Incrustante
Quebrada. Pená	57	Media	1,65	Media	1,61	Incrustante
Quebrada Santamaría	61	Media	1,32	Alta	1,45	Incrustante
Quebrada Tacui	65	Media	1,32	Alta	-0,57	Corrosivo
Río San Andrés	54	Media	1,98	Media	0,62	Incrustante
Río Cauca- Puente Pescadero	53	Media	1,65	Media	0,92	Incrustante
Río Ituango	52	Media	1,65	Media	3,05	Incrustante
Río Cauca Sitio de presa	46	Mala	1,65	Media	0,91	Incrustante
Río Cauca abajo descarga	51	Media	1,98	Media	0,75	Incrustante

3.10.1.4 Análisis de resultados

Según el Decreto 1594 los afluentes, de acuerdo con su calidad, pueden ser destinados para: consumo humano con tratamiento convencional o desinfección, para uso agrícola, para uso pecuario y/o para uso recreativo con contacto primario o secundario; así mismo el RAS 2000 clasifica en nivel de calidad de las fuentes para su potabilización, en la Tabla

3.57 se indican los usos y el nivel de calidad para los diferentes cuerpos de agua, este análisis se realizó teniendo en cuenta los resultados de los parámetros evaluados y las interacciones entre ellos.

Tabla 3.57 Uso recomendado y clasificación de los afluentes

Cuerpo de agua	Dec 1594/84							RAS 2000		
	Consumo Humano-tratamiento convencional	Consumo Humano-desinfección	Uso Agrícola	Uso Pecuario	Uso recreativo contacto primario	Uso recreativo contacto secundario	Fuente aceptable	Fuente regular	Fuente deficiente	Fuente muy deficiente
Río Cauca- Puente Occidente										X
Quebrada La Barbuda										X
Quebrada Juan García										X
Río Cauca- Liborina										X
Quebrada Rodas										X
Quebrada La Honda										X
Quebrada Clara										X
Río Cauca- Sabanalarga										X
Quebrada Peque										X
Quebrada. Pená										X
Quebrada Santamaría					X					X
Quebrada Tacui										X
Río San Andrés					X					X
Río Cauca- Puente Pescadero										X
Río Ituango										X
Río Cauca- Sitio de presa										X
Río Cauca Debajo de descarga										X

El parámetro más limitante para el uso de los afluentes es el pH, el cual al sobrepasar el valor de 9,0 un. excluye cualquiera de los usos considerados en el Decreto 1594/84 en once de las diecisiete estaciones analizadas. Otro factor limitante es el valor de coliformes totales, que limita exclusivamente a uso pecuario las aguas de la Quebrada Santamaría y del Río San Andrés. Con respecto al RAS, el parámetro coliformes totales caracteriza todos los afluentes como fuentes muy deficientes, sin embargo, es necesario aclarar que para el análisis señalado se utilizó el dato del muestreo puntual obtenido en este estudio ante la ausencia de valores promedio mensual como lo recomienda el reglamento.

La importancia de la temperatura radica en el hecho de que un gran número de reacciones que tienen lugar en el agua, son altamente dependientes de ésta. Así, por ejemplo, altas temperaturas pueden acelerar los procesos de descomposición de materia orgánica y el crecimiento de colonias de bacterias.

La temperatura encontrada durante los muestreos oscila entre los 20,2°C y los 28,1°C, en el Río Cauca se presentó un valor máximo de 28,1°C y un valor mínimo de 25,7°C; variación que se relaciona directamente con la hora del muestreo y la radiación solar.



En la práctica ambiental, la medición de pH es muy importante; para el suministro de agua potable, es un factor a considerar en los procesos de coagulación, desinfección, ablandamiento y control de corrosión; y en los procesos de tratamiento biológico, en donde el pH debe ser controlado en un rango que favorezca el crecimiento bacteriano.

El pH en los afluentes estudiados varía entre 6,22 para el Río Cauca Puente de Occidente y 9,70 para la quebrada La Honda; según Roldán (1992), los valores de pH en las aguas naturales varían entre 6 y 9, pero once de los diecisiete afluentes analizados sobrepasan el rango mencionado.

Se presenta un rango bastante amplio en el Oxígeno disuelto detectado durante los muestreos, con un valor mínimo de 1,9 mg/l para el Río Cauca en Sabanalarga y un valor máximo para la quebrada La Honda de 11,2 mg/l; estos valores, además de estar influenciados por el grado de contaminación del agua, lo están por factores como la temperatura, la salinidad y la presión atmosférica. El comportamiento de este parámetro también depende de las condiciones propias del sitio de muestreo; así por ejemplo, la baja concentración encontrada en el Río Cauca en Sabanalarga probablemente se deba a que el muestreo se realizó aguas abajo de la desembocadura de la quebrada La Niquia (San Pedro), la cual es receptora de las aguas residuales del municipio de Sabanalarga, y la quebrada La Honda tiene un carácter torrentoso lo cual airea el agua, y aumenta la concentración de oxígeno disuelto.

La DBO₅ y la DQO presentan los valores más altos en el Río Cauca – sitio de presa, los cuales corresponden respectivamente a 10,7 mg/l y 93,5 mg/l, el resto de los afluentes presentan valores muy bajos; como referencia se puede considerar que la medición de DBO₅ en aguas residuales domésticas generalmente está por encima de 250 mg/l y la DQO por encima de 600 mg/l²², estos resultados dan un indicio de que el grado de contaminación debida a materia orgánica es poco significativa.

“La concentración total de sustancias o minerales disueltos en las aguas es un parámetro útil para conocer las relaciones edáficas y la productividad en un cuerpo de agua”²³. Los sólidos totales encontrados en los afluentes estudiados presentan un rango entre 145 mg/l para la quebrada Rodas y 1.260 mg/l para el Río Cauca-Puente de Occidente, los demás tienen en promedio 334 mg/l. Los sólidos suspendidos tienen el mismo comportamiento, es decir, el mínimo y el máximo valor, se presentan en iguales afluentes. Pero para los sólidos disueltos, el valor más alto se presenta en la quebrada Tacui y el menor en el río San Andrés. Según Castagnino Walter la concentración de Sólidos Suspendidos Totales en aguas residuales domésticas de una población entre 2.500 y 10.000 habitantes es de 286 mg/l en promedio, comparando dicho valor con lo determinado en los muestreos realizados sólo el Río Cauca Puente de Occidente sobrepasa este valor; el valor de sólidos disueltos reportado para este tipo de efluente es de 1.213 mg/l, todos los datos se encuentran por debajo de este valor.

²² CEPIS. Polución del Agua, Modelos y Control. Castagnino Walter, Serie Técnica 20

²³ Roldán, 1992



Los Sólidos en suspensión disminuyen la transparencia del agua y dificultan los procesos fotosintéticos; si los sólidos sedimentan y forman depósitos, se producen cambios en los ecosistemas bénticos. Altas concentraciones impiden la penetración de la luz, y por lo tanto limitan el proceso de fotosíntesis, disminuyendo de esta manera el oxígeno disuelto con lo que se limita el desarrollo de la vida acuática.

Para agua potable es de mayor interés conocer el contenido de sólidos disueltos y totales; ya que altas concentraciones de sólidos disueltos pueden ocasionar reacciones fisiológicas desfavorables en los consumidores.

Los sólidos suspendidos se encuentran en cantidades muy pequeñas, y por ello se emplea la turbiedad como medida indirecta. El término turbiedad es aplicado a aguas que contienen materia suspendida que interfiere el paso de la luz a través de un agua. Puede ser causada por una amplia variedad de materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos e incluso microorganismos, que se presentan principalmente en aguas superficiales, dependiendo también del grado de turbulencia de la corriente del agua.

Una manera rápida y simplificada de medir los Sólidos Totales Disueltos es a través de la conductividad, que es la medida de la disponibilidad de una solución para conducir la corriente eléctrica y varía de acuerdo con la cantidad y el tipo de iones que contenga. El Río San Andrés presenta el valor más bajo debido a su correlación con la temperatura, ya que ésta presenta el menor valor. Los cuerpos de agua estudiados tienen un rango entre 110 y 340 $\mu\text{g}/\text{cm}$, en el Río Cauca la conductividad se mantiene relativamente constante en las cuatro estaciones, con un valor máximo de 203 $\mu\text{g}/\text{cm}$ y un valor mínimo de 142, valores que están relacionados con la naturaleza geoquímica del terreno y con el período climático en el cual se realizó la medición; tomando como referencia los registros retomados por Roldán (1992), estos valores están dentro del promedio reportados para los principales ríos colombianos.

La alcalinidad es una medida de la cantidad de iones bicarbonato y carbonato presentes en el agua; el menor valor (48 mg/l) corresponde al río San Andrés, y el valor más alto corresponde a la quebrada Peque con un valor de 109 mg CaCO_3/l . Si se comparan los valores encontrados con lo definido por Roldán (1992), quien establece que las aguas tropicales presentan generalmente una concentración por debajo de 100 mg/l, solo cuatro cuerpos de agua sobrepasan por poco este valor (quebrada Tacui, quebrada Peque, quebrada Clara, quebrada Barbuda).

Según la clasificación propuesta por Ohle (1934), las aguas, de acuerdo con la alcalinidad, se clasifican en poco productivas, medianamente productivas y muy productivas, estas últimas son aquellas que poseen valores superiores a 25 mg/l. Todas las corrientes estudiadas se encuentran en este último rango; debe tenerse en cuenta que por lo regular este tipo de aguas son muy productivas y a estas se asocian pocas especies que se han adaptado a estas condiciones.

Los sulfatos son los aniones más importantes en el agua después de los carbonatos, y en los puntos muestreados presentan un rango desde 11,50 mg/l en el Río Cauca Puente Pescadero, hasta un valor de 85,10 mg/l en la quebrada Tacui, estos valores están estrictamente relacionados con el sustrato de los cuerpos de agua y con el pH. Su



análisis es importante ya que bajo condiciones anóxicas, el azufre pasa a formar ácido sulfhídrico (H_2S) y su presencia en el fondo de los embalses para generación eléctrica constituye en un problema en cuanto a la corrosión de equipos. Según Roldán (1992) se tiene reporte de concentraciones de 20 mg/l para el Río Cauca, en las estaciones muestreadas se identificaron concentraciones de 32,06 mg/l en el Puente de Occidente, de 21,77 mg/l para el sector de Liborina, de 23,31 para Sabanalarga, 11,50 mg/l para el Puente Pescadero, 18,4 en el sitio de presa y 17,5 para el denominado sitio de descarga, estos datos se asemejan a los reportados anteriormente.

Los cloruros, que ocupan el tercer lugar en porcentaje de los aniones en el agua, expresan en gran parte la salinidad del agua; nueve de los puntos estudiados presentan muy baja concentración (<3 mg/l), valor acorde con lo reportado en la bibliografía para ríos de montaña (<5 mg/l). El Río Cauca, en todos los puntos muestreados, presenta valores más altos; este parámetro es condicionante para la distribución de los organismos.

El mayor valor del Fósforo Total, 0,76 mg/l, se presenta en el Río Cauca - Puente de Occidente. Los valores encontrados en este estudio son muy bajos, si se comparan con otros registros existentes en el Río Cauca, donde se tiene valores de 20 mg/l (Roldán, 1992), en lo referente al Fósforo Reactivo la mayor concentración se presentó en el Río Cauca Sabanalarga.

El Hierro en lagos y embalses se encuentra generalmente en estado trivalente en las capas superiores; pero a medida que se desciende a capas anóxicas, se torna en hierro bivalente, lo cual puede ser problemático cuando se capta agua anóxica para generación hidroeléctrica. Como consecuencia, el hierro soluble al llegar a las turbinas se oxigena y se convierte en férrico, precipitándose y causando problemas de incrustación en el sistema de enfriamiento. Se han reportado concentraciones de 5,0 y 6,0 mg/l en ríos con cierto grado de contaminación; en el presente estudio se encontraron valores mucho más altos, especialmente cabe destacar el valor encontrado en el Río Cauca sector de Liborina el cual corresponde a 97,29 mg/l, seguido del Río San Andrés y el Río Ituango, con concentraciones de 17,67 y 16,66 mg/l respectivamente. Estos valores tan elevados son inexplicables, si se tiene en cuenta que en la zona no se identificaron fuentes antrópicas de este mineral y tampoco se encuentran realaciones evidentes con los componentes geológicos y edáficos.

El índice de calidad NFS-WQI para catorce de los afluentes estudiados tuvo clasificación media, el Río Cauca sector Liborina, y el Río Cauca sitio de presa se clasifican como de calidad mala, el factor más determinante en dicho resultado fue la baja concentración de oxígeno disuelto en el agua, debido a que el muestreo se realizó aproximadamente 50 metros aguas debajo de la desembocadura de la quebrada Niquia (San Pedro) y aguas debajo de la desembocadura del río Ituango los cuales son receptores de las aguas negras del municipio de Sabanalarga e ituango respectivamente. La quebrada Barbuda presentó una clasificación buena con un valor de 71, los pesos relativos de los parámetros fosfatos, nitritos y turbiedad fueron influyentes en el resultado.

Los afluentes según el ICA Obj se clasifican entre calidad alta lo cual implica que las fuentes son aptas para uso potable con filtración y desinfección y para riego sin restricción, y calidad media con lo cual requieren procesos convencionales y uso para



riego restringido; la contradicción que se aprecia con el análisis realizado respecto al Decreto 1594 se presenta porque el parámetro que restringe los usos según el decreto es el pH, parámetro que en este índice no se considera.

El índice de Langelier considera los parámetros de pH, dureza cálcica, alcalinidad y sólidos disueltos. El Río Cauca en el Puente de Occidente y la quebrada Tacui presentaron carácter corrosivo debido principalmente a la influencia del pH; estos dos cuerpos de agua son los únicos que presentan un pH neutro para la quebrada Tacui (7,06) y con tendencia ácida para el Puente de Occidente (6,22); el valor de pH está directamente relacionado con la alcalinidad y la dureza y de este depende la presencia de las sustancias en el agua.

Por último vale la pena mencionar que además de los índices citados, se están utilizando en la actualidad técnicas estadísticas como el Análisis de Componentes Principales - ACP, para analizar los aspectos de calidad de las aguas. El ACP se ha aplicado en estudios limnológicos clásicos (Margalef, 1983) encontrándose entre la literatura nacional el estudio de Ramírez & Viña (1998), que aborda el estudio de varios sistemas hídricos colombianos (lóticos y lénticos) a partir de un volumen considerable de información físico-química y bacteriológica, cuyas recomendaciones metodológicas generales acogemos en este estudio.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) pertenece a un grupo de técnicas estadísticas multivariantes, eminentemente descriptivas, que fue propuesta a principios del siglo XX por Karl Pearson, como parte del análisis de factores. Sin embargo, la complejidad de los cálculos retrasaron su desarrollo hasta la aparición de los computadores, en la segunda mitad del siglo. El enfoque francés de este análisis, desarrollado por Benzecri (1980), ha sido el más difundido, especialmente en el tratamiento de grandes masas de datos. Es conveniente recordar que el ACP permite reducir la dimensionalidad de los datos, transformando un conjunto de p variables originales en otro conjunto de q variables no correlacionadas ($q < p$), de media cero, que pueden escribirse como combinaciones lineales de las primeras y que se llaman factores o componentes principales, las cuales pueden ordenarse por la magnitud de su varianza que viene dada por un valor propio de la matriz Sigma (en la práctica la matriz "S").

Podría decirse que el objetivo principal que persigue el ACP es la representación de las medidas numéricas de varias variables en un espacio de pocas dimensiones (generalmente dos o tres, máximo cuatro) donde nuestros sentidos puedan percibir relaciones que de otra manera permanecerían ocultas. Dicha representación debe ser tal que al desechar las dimensiones restantes (generalmente de la tercera o cuarta en adelante) la pérdida de información sea mínima.

En el ACP existe la opción de usar la matriz de correlaciones o bien, la matriz de covarianzas. En la primera opción se da la misma importancia a todas y cada una de las variables, y es recomendable cuando las variables tienen unidades diferentes o sus magnitudes son muy heterogéneas. La segunda opción (matriz de covarianzas) se puede utilizar cuando todas las variables tienen las mismas unidades de medida y además, cuando se quiere destacar cada una de las variables en función de su grado de



variabilidad. En nuestro caso, y por recomendaciones de la metodología misma utilizaremos la primera de ellas, matriz de correlaciones.

Las q nuevas variables (componentes principales) se obtienen como combinaciones lineales de las variables originales y se ordenan en función del porcentaje de varianza explicada. En este sentido, el primer componente será el más importante por ser el que explica mayor porcentaje de la varianza de los datos.

Aunque todas las variables originales entran en la composición de cada componente principal, algunas son más importantes que otras, siendo aquellas (las más importantes), las que vienen a determinar la naturaleza de cada componente.

Estos aportes o "loadings" de las variables son en realidad las correlaciones entre las variables originales y el componente principal, e indican de manera gruesa la contribución/importancia relativa de cada una de las variables a cada uno de los componentes principales. Debe señalarse aquí que esta contribución de la variable es independiente su valor absoluto original y de su varianza intrínseca, es decir, una variable de valor absoluto alto y amplia varianza no necesariamente tendrá carga alta en la composición de los CP.

El análisis se realiza en el espacio de las variables y, en forma dual, en el espacio de los individuos (mediante unos gráficos llamados "biplots"). Se acostumbra a representar gráficamente los puntos-variables y los puntos-individuos tomando como ejes de coordenadas los componentes. A veces, puede facilitar la interpretación de los resultados, el observar la similar ubicación de los puntos en los planos respectivos, y aunque el plano de puntos-variables no se superpone al plano de puntos-individuos, es de gran utilidad "interpretar" la cercanía de un grupo de puntos-individuos, a ciertas variables.

Para proceder entonces a la aplicación de la metodología señalada fue necesario efectuar algunas transformaciones a los datos originales que se describen a continuación:

- Los valores que incluían ">", se reemplazaron por el valor absoluto de la medición, prescindiendo del signo ">" (p ej. >120000 se reemplazó por 120000). Este fue el caso de los coliformes.
- Los valores que incluían "<" se reemplazaron por el valor medio absoluto entre ese valor y cero (p ej. <0,04 se reemplazó por 0,02). Variables como cloruros, DBO₅, DQO, fósforo reactivo, nitritos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, y nitratos presentaron esta característica.
- Variables como la temperatura ambiental, que no tienen incidencia directa en el proceso que se está estudiando, no se incluyeron en el análisis.
- Variables agregadas como dureza total, sólidos totales, etc se deben eliminar del análisis cuando están presentes sus variables desagregadas (dureza cálcica + dureza magnesio + dureza carbonácea)
- Finalmente, se descartaron las variables que presentaron el mismo valor en todas las



estaciones, como nitrógeno amoniacal.

El análisis de componentes principales- ACP se realizó utilizando el paquete estadístico PAST - Palaeontological Statistics, versión 1.12, y el conjunto definitivo de datos que se muestra en la Tabla 3.58.

Tabla 3.58. Datos de calidad de agua manipulados para realizar el ACP

Corriente	T agua (°C)	Conduc-tividad	pH	OD	Coliformes Totales *	Colifor. Fecales*	Alcali-nidad Total	Cloru-ros	DBO ₅	DQO
Q_Barbuda	23,5	323,0	9,4	8,9	16000	0,5	106,0	1,5	2,7	23,5
Q_Juan_García	25,6	200,0	8,7	9,3	1600	14	67,0	3,9	2,4	23,5
Q_Rodas	25,8	197,0	9,7	10,8	900	2,5	94,0	1,5	1,0	23,5
Q_LaHonda	27,1	195,0	9,7	11,2	1600	0,35	82,0	1,5	2,7	23,5
Q_Clara	26,4	190,0	9,5	10,1	160	0,35	106,0	7,2	2,2	23,5
Q_Peque	24,2	250,0	9,4	6,0	79	49	109,0	1,5	1,0	23,5
Q_Pena	26,4	210,0	9,4	5,4	23	13	96,0	1,5	1,0	23,5
Q_Santa María	22,7	179,0	9,5	7,4	8	2	72,0	1,5	1,0	23,5
Q_Tacui	25,6	340,0	7,1	4,5	30	0,5	105,3	1,5	1,0	23,5
R_SanAndrés	20,2	110,0	9,1	9,5	13	13	48,0	1,5	4,3	23,5
R_Ituango	23,2	159,0	9,1	8,5	33	8	75,0	1,5	2,8	23,5
R_Cauca_PO	25,8	142,0	6,2	7,8	16000	900	50,0	4,3	5,2	93,5
R_CaucaLibo	27,8	166,0	8,6	6,6	6000	14	56,0	6,7	2,9	23,5
R_Cauca_SL	28,1	167,0	9,1	1,9	110	11	55,0	4,5	1,0	23,5
R_Cauca_PP	27,3	166,2	9,0	5,0	350	3	60,5	3,9	1,0	23,5
R_Cauca_Presa	24,8	170	9,1	6,3	23	8	54	6,4	10,7	23,5
R_Cauca_abDe	25,7	203	8,95	5,9	46	46	50	7,9	8,8	23,5
Promedio	25,30	198,07	8,91	7,36	2527,94	63,84	75,64	3,43	3,04	27,62
Desviación est	2,04	58,78	0,92	2,49	5276,50	215,96	22,78	2,37	2,84	16,98

* para obtener los valores originales se debe multiplicar por mil.



**Tabla 3.58. Datos de calidad de agua manipulados para realizar el ACP.
(Continuación)**

Corriente	Dureza total	Fósforo Total	Fósforo Reactivo	Nitritos	Nitra-tos	Sólidos suspendidos	Sólidos disueltos	Sulfatos	Turbiedad NTU	Hierro
Q_Barbuda	143,6	0,07	0,02	0,001	1,68	11,2	270,8	74,7	7,0	0,37
Q_Juan_García	77,5	0,08	0,02	0,006	0,23	24,3	140,7	36,9	15,6	1,11
Q_Rodas	84,0	0,08	0,07	0,006	0,06	7,0	138,0	22,8	6,6	0,04
Q_LaHonda	61,5	0,14	0,09	0,001	0,07	19,2	136,8	22,0	9,3	0,80
Q_Clara	116,4	0,05	0,02	0,003	0,02	35,2	197,8	35,0	19,3	1,63
Q_Peque	121,9	0,10	0,06	0,007	28,40	58,2	178,8	40,7	45,4	3,06
Q_Pena	95,7	0,05	0,02	0,005	27,00	19,3	146,7	41,6	25,1	1,48
Q_SantaMaría	65,9	0,08	0,02	0,007	15,90	43,3	103,7	27,4	32,4	2,42
Q_Tacui	130,6	0,17	0,06	0,001	17,60	18,7	249,0	85,1	8,7	0,39
R_SanAndrés	58,4	0,23	0,02	0,015	12,40	514,0	99,2	15,2	263,0	17,67
R_Ituango	78,7	0,18	0,07	0,011	17,40	261,0	122,0	17,9	211,0	16,66
R_Cauca_PO	48,5	0,76	0,07	0,001	6,93	151,7	219,0	32,1	71,0	0,04
R_CaucaLibo	44,4	0,41	0,09	0,008	0,02	588,5	183,5	21,8	71,0	97,29
R_Cauca_SL	62,1	0,47	0,20	0,015	16,40	374,0	271,0	23,3	142,0	8,35
R_Cauca_PP	66,9	0,23	0,04	0,013	14,00	150,0	131,0	11,5	138,0	10,81
R_Cauca_Presa	68,4	0,33	0,07	0,018	5,46	327,7	79,3	18,4	276,0	14,16
R_Cauca_abDe	64,8	0,45	0,1	0,017	5,5	402,7	102,3	17,5	15,25	15,25
Promedio	81,72	0,23	0,06	0,008	9,95	176,82	162,92	31,99	79,80	11,27
Desviación est	29,61	0,19	0,05	0,006	9,52	195,32	60,598	20,2	92,10	23,10

Aunque según algunos autores lo deseable es que con los dos primeros componentes se explique más de un 70% de la varianza, en este caso se tiene que considerar cuatro componentes principales para acumular, en conjunto, un poco más del 75% de la varianza total (véase la Tabla 3.59).

Tabla 3.59. Valores obtenidos de varianza explicada para los cuatro primeros CP

Eigenvalue	% de varianza explicada	% de varianza explicada acumulada
1	86,5379	33,953
2	49,072	19,253
3	32,082	12,587
4	28,51	11,186
		76,979

Al examinar los valores de los coeficientes de correlación y los estimados de los aportes de las distintas variables (loadings) a cada uno de los cuatro componentes principales, se empieza a visualizar los conjuntos de variables determinantes en cada CP (véase la Tabla 3.60). Los valores positivos en negrilla corresponden a las variables de mayor importancia en cada componente.

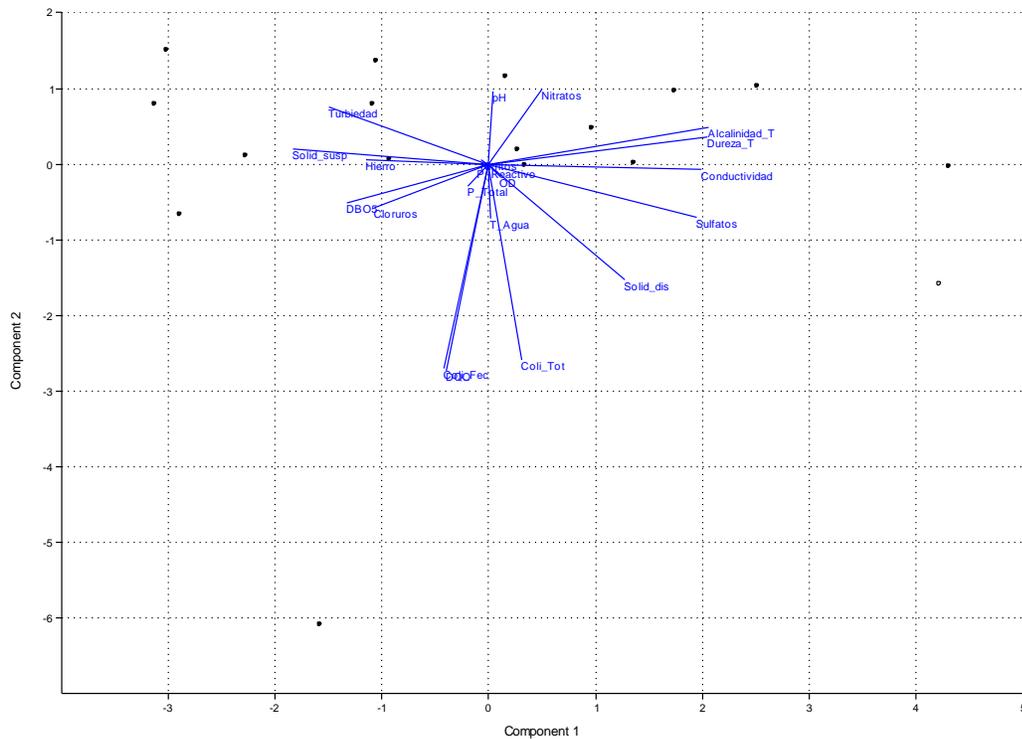


Tabla 3.60. Valores de coeficientes y aportes de las variables (loadings)

	Importancia (loadings)				Coeficientes			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Temp. del agua	0,002798	-0,1352	0,4789	-0,2121	0,02603	-0,9468	2,718	-1,132
Conductividad	0,3737	-0,01184	0,1629	-0,05946	3,476	-0,08292	0,9226	-0,317
pH	0,008628	0,1818	-0,03951	-0,1112	0,1853	2,939	-0,5160	-1,3116
Oxígeno Disuelto	0,01921	-0,03143	-0,5103	-0,453	0,1806	-0,222	-2,921	-2,444
Coliformes totales	0,05858	-0,4862	-0,05619	-0,05836	0,5449	-3,406	-0,318	-0,3116
Coliformes fecales	-0,07923	-0,5062	-0,1503	0,2129	-0,7396	-3,559	-0,8542	1,141
Alcalinidad Total	0,3877	0,09216	-0,04207	-0,09335	3,653	0,6539	-0,2414	-0,504
Cloruros	-0,2	-0,1066	0,2961	-0,2535	-2,087	-0,8376	1,881	-1,518
DBO ₅	-0,2502	-0,09497	-0,07473	-0,105	-2,352	-0,672	-0,427	-0,5666
DQO	-0,07483	-0,5118	-0,1587	0,204	-0,6964	-3,687	-0,8994	1,089
Dureza Total	0,3837	0,06672	0,008101	-0,005185	3,572	0,4677	0,04591	-0,0277
Fósforo Total	-0,03693	-0,05346	0,02793	0,02733	-2,403	-2,62	1,107	1,021
Fósforo Reactivo	-0,02009	-0,009071	0,06104	0,01457	-1,214	-0,4128	2,246	0,505
Nitritos	-0,01319	0,01117	0,005126	0,007016	-2,845	1,814	0,6732	0,868
Nitratos	0,09455	0,1869	0,06234	0,6474	0,8796	1,309	0,353	3,457
Sólido suspendidos	-0,3438	0,03883	0,2496	0,06493	-3,199	0,272	1,414	0,346
Sólidos disueltos	0,2393	-0,2874	0,3359	0,0844	2,23	-2,017	1,906	0,4514
Sulfatos	0,365	-0,1312	0,102	0,05255	3,411	-0,9233	0,5801	0,2819
Turbiedad_NTU	-0,2802	0,142	-0,08744	0,3063	-2,607	0,9947	-0,4953	1,636
Hierro	-0,2152	0,0112	0,3656	-0,1774	-2,012	0,07829	2,082	-0,9524

Se debe tener presente al interpretar los resultados del ACP, que los gráficos son una ayuda importante por cuanto facilitan visualizar aquellas variables que se localizan más hacia la periferia, las cuales permiten explicar mejor el componente, en tanto que aquellas que se ubican más hacia el centro tienen menor relación con el componente. Por ejemplo, al observar el arreglo de las variables en el sistema formado por los planos correspondientes a los componentes principales 1 y 2 (véase la Figura 3.38) se pueden identificar cuatro grupos de variables:

- Un primer grupo claramente mejor explicado sobre el eje CP1 incluye variables como conductividad, alcalinidad total, dureza, sulfatos y sólidos disueltos, todas ellas (excepto sólidos disueltos) señaladas en la literatura como variables asociadas a procesos de mineralización de la materia orgánica (Margalef, 1983; Ramirez & Viña, 1998).
- Un segundo grupo de variables compuesto por el pH y los nitratos, que puede estar correlacionado de manera positiva o negativa, y tiene que ver con el potencial de reducción y oxidación o con la actividad de los organismos (Margalef, 1983).
- En un tercer grupo se pueden incluir la turbiedad, los sólidos suspendidos, DBO₅, los cloruros y el hierro.
- Y un cuarto grupo formado por variables como DQO, coliformes fecales y coliformes totales

Figura 3.38. Arreglo de las variables en los componentes CP1 y CP2

En conjunto se puede decir que los primeros dos grupos recogen los procesos naturales de degradación de compuestos orgánicos que no están asociados necesariamente con eventos de perturbación antrópica, como pueden ser el aporte de elementos contaminantes o la carga excesiva de residuos orgánicos provenientes de aguas servidas, y que se relacionan evidentemente con los otros dos grupos de variables donde están la turbiedad, los coliformes y las demandas de oxígeno (Ramírez & Viña, 1998).

Además del análisis por grupos de las variables, existe otro aspecto revelador en el ACP, relacionado con aquellas variables que se organizan muy próximas en el plano cartesiano, lo cual significa que existe una correlación estrecha entre ellas y que su comportamiento, en términos de valores absolutos, variará de manera acompasada en tanto deben estar respondiendo al mismo conjunto de factores naturales (Ramírez & Viña, 1998). En este sentido, el arreglo de las variables para el conjunto de estaciones de la zona de estudio sugiere que la dureza del agua está regida por los sulfatos y otros aniones ácidos minerales, correspondiendo entonces a la denominada “dureza permanente” (Wetzel, 1981).

En este punto es necesario anotar que los valores absolutos de SO_4 observados en algunas estaciones (Q. Tacui y Q. Barbuda) son inusualmente altos, y aún superiores a los reportados para corrientes muy contaminadas por vertimientos industriales como el Río Bogotá (véase la Tabla 3.61), así mismo las quebradas Peque y Pena, con alrededor de 40 ppm, se consideran también muy elevados para las actividades productivas típicas de la zona.



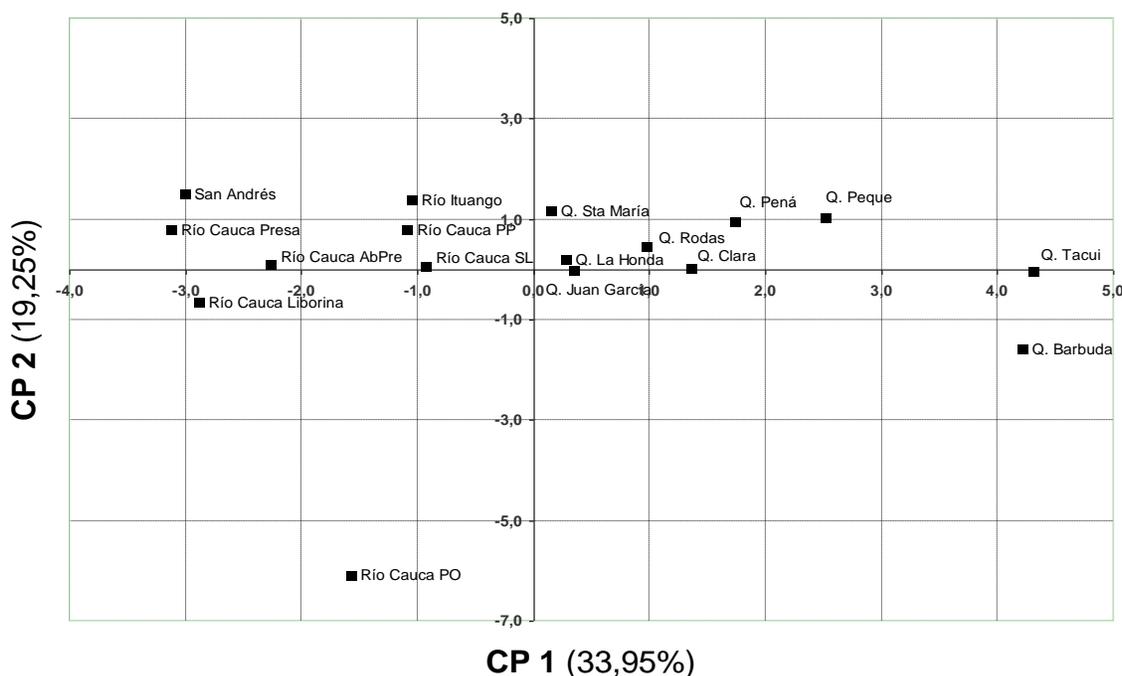
Tabla 3.61. Valores de referencia de algunas variables fisicoquímicas en ecosistemas comparables al del proyecto

	Alcalinidad(ppm)	CaCO ₃ (ppm) ¹	pH	NH ₄ (ppm) ²	NO ₃ (ppm) ³	PO ₄ (ppm) ⁴	SO ₄ (ppm) ⁵	Cloruro (ppm)	Hierro (ppm)
Aguas tropicales	< 100	--	--	--	--	--	--	--	--
Ríos y quebradas andinas	--	10 – 60	6,5 – 7,5	--	--	--	--	--	--
Embalses	--	7 – 40	6,5 – 7,5	0,1 – 0,7	0,07-0,2	0,01	8,0-12,0	6,0-10,0	0,3-0,7
Río Cauca	--	--	--	1,03	0,1	0,07	--	12,0	5,0
Río Magdalena	--	--	--	0,8	0,2	0,55	25,0	15,0	6,0
Ríos de Alta montaña	--	--	--	0,001	0,1	0,001	4,0	2,0	0,05
Río Bogotá	--	--	--	1,25	2,7	--	60,0	90,0	--

¹: Carbonatos; ²: Nitrógeno amoniacal; ³: Nitratos; ⁴: Fosfatos; ⁵: Sulfatos (Fuente: EPM, 2002)

Al igual que en la representación gráfica de los puntos-variable (variables), entre más alejado se encuentre un punto-individuo (estación) del centro del sistema cartesiano formado por CP1-CP2, mayor será su relación con el componente en que ocurre dicho alejamiento (véase la Figura 3.39).

Figura 3.39. Arreglo de las estaciones según sus coordenadas en CP1 y CP2



Para el caso de la zona del embalse, el resultado del ACP, al considerar los componentes 1 y 2, no es evidente un patrón de agrupación de las estaciones (puntos-individuo) posiblemente porque en conjunto apenas explican un 53% de la varianza. Sin embargo,

sí puede percibirse una segregación de las estaciones pertenecientes a las quebradas: especialmente la quebrada Barbuda y la quebrada Tacui, en el eje 1 y de la estación río Cauca Puente Occidente, en el eje 2.

Al examinar los valores de las variables explicadas en estos dos componentes, se encuentra igualmente que es en este conjunto de estaciones de las quebradas donde se observaron los valores más elevados de conductividad, alcalinidad total, dureza y sulfatos, aunque no es evidente una gradación geográfica en su comportamiento que pueda asociarse a particularidades geológicas de sus cuencas.

Al considerar los componentes CP2 y CP3, los cuales explican apenas un 31,8% de la varianza total, se observa que tienen un muy bajo poder de discriminación de las variables y que no se obtienen nuevas relaciones entre estas (véanse Figura 3.40 y Figura 3.41). Por esta misma razón no se presentan análisis adicionales con los otros pares de componentes.

Figura 3.40. Arreglo de las variables en los componentes CP2 y CP3

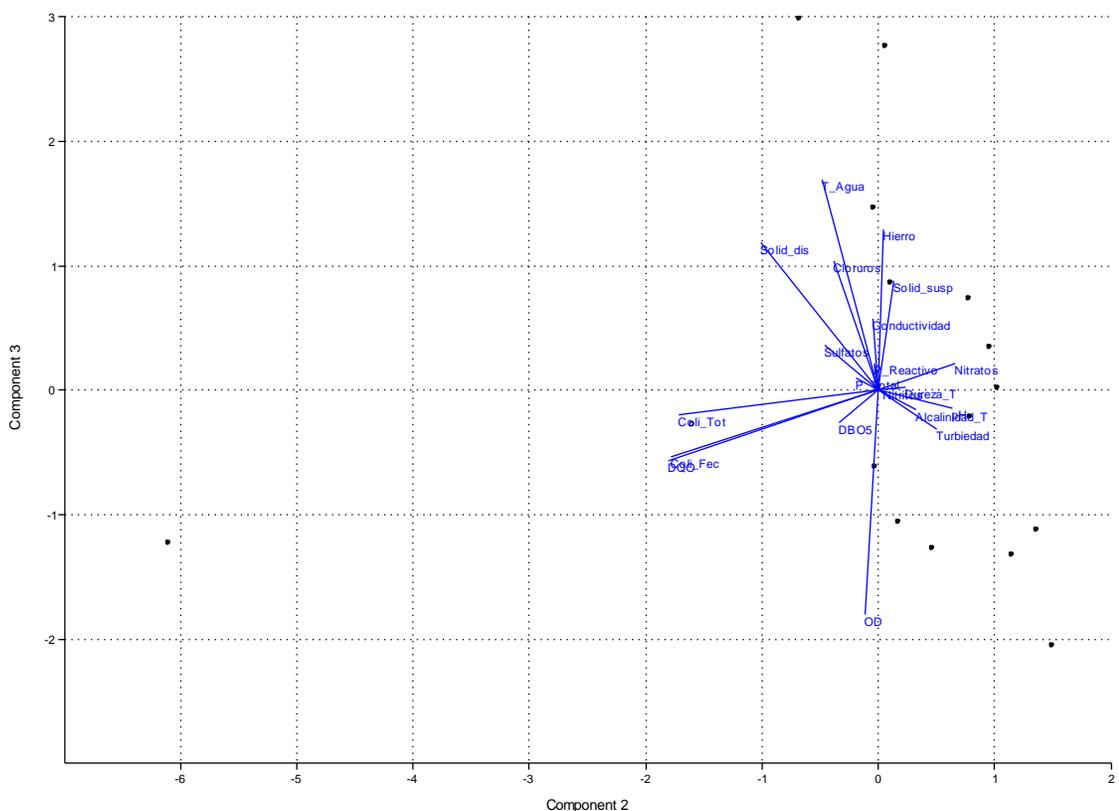
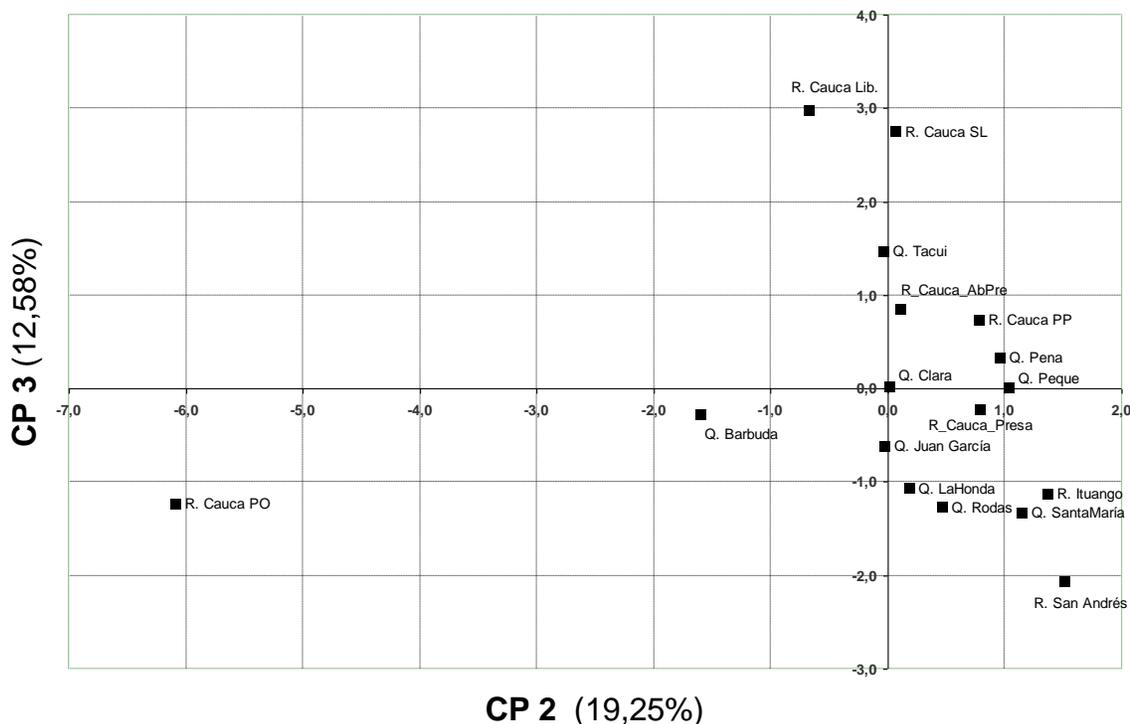


Figura 3.41. Arreglo de las estaciones según sus coordenadas en CP2 y CP3



Además de lo observado con el SO_4 , es importante citar que otras variables como los Nitratos (NO_3) y el Hierro (Fe) presentan valores completamente atípicos y difíciles de explicar para el contexto regional y la época de muestreo, aún teniendo en cuenta que la composición de las aguas epicontinentales es variable y depende no sólo de equilibrios internos, sino también de equilibrios químicos y ciclos ecológicos (geobioquímicos) (Margalef, 1983)

Por ejemplo, el nitrógeno de las aguas dulces se presenta bajo diversas formas: N_2 disuelto, gran número de compuestos orgánicos, desde aminoácidos y aminas hasta proteínas y compuestos húmicos resistentes con poco nitrógeno, Amonio, nitrito y nitrato. El nitrógeno puede provenir de a) precipitación atmosférica, b) fijación de nitrógeno tanto en el agua como en los sedimentos, y c) aportes debidos al drenaje superficial y subterráneo. Siendo predominante los aportes de origen terrestre (Wetzel, 1981).

En el caso específico del Nitrato, cuyos contenidos en las aguas dulces no contaminadas pueden variar desde cero hasta casi 10 ppm, presenta en ocho de las quince corrientes analizadas concentraciones de más de 16 y hasta 28 ppm.

En relación con el fósforo, se presenta en varias formas: P soluble reactivo, P soluble no reactivo, P particulado reactivo siendo un elemento relativamente escaso en la hidrosfera y generalmente un factor limitante en la productividad de las aguas dulces superficiales, aunque su presencia y concentración en las corrientes de agua se ha visto incrementada



en los últimos años debido al uso creciente de fósforo en los abonos agrícolas o en detergentes y otros productos de uso doméstico (Wetzel, 1981).

Los niveles de fosfatos hallados guardan unas mejores proporciones de semejanza con los valores reportados para otros ecosistemas hídricos colombianos aunque son superiores los valores típicos para aguas superficiales no contaminadas (entre 0,010 - 0,050 mg/l). Los niveles de fósforo son generalmente menores en regiones montañosas de geomorfología cristalina y mayores en aguas de tierras bajas, que derivan de depósitos de rocas sedimentarias (Wetzel, 1981).

Es posible que todas estas particularidades de los valores encontrados hayan afectado el comportamiento de las correlaciones entre variables y las distribuciones de las varianzas generando patrones de arreglos de las variables donde las relaciones son menos evidentes.

3.10.1.5 Comparación de los diferentes períodos de muestreo

Existe información de calidad de aguas para algunos cuerpos de agua superficial en algunos estudios realizados anteriormente para fases previas del proyecto, a saber: Estudio ecológico y de Impacto Ambiental (Integral, 1981) y Estudio de Factibilidad-Evaluación Ambiental Preliminar (Integral-AgraMonenco, 1999). Sin embargo, no es recomendable realizar análisis comparativos sobre la evaluación de los parámetros muestreados debido a las siguientes consideraciones:

- Los sitios de muestreo de los estudios anteriores carecen de georreferenciación. Teniendo en cuenta que las características fisicoquímicas y microbiológicas pueden variar a lo largo de un río, tanto espacial como temporalmente, no tendríamos la certidumbre de estar comparando realmente los datos del mismo sitio. Adicionalmente, algunas estaciones no están localizadas en el mismo sitio; por ejemplo, el sitio de muestreo en el río Cauca, a la altura de Santa Fe de Antioquia, se describe como localizado en Puente Real, en los muestreos de 1981 y 1999, mientras que en el muestreo de 2006 se lo ubica en Puente de Occidente.
- Por limitantes propias de las jornadas de monitoreo de los anteriores estudios, especialmente en el tiempo de conservación de las muestras, no se evaluó la DBO₅ y por lo tanto, al calcular el índice NFS-WQI se redistribuyeron los pesos específicos de las variables, razón por la cual no serán valores comparables.
- Los muestreos se realizaron en épocas del año que corresponden a períodos climáticos diferentes que inciden necesariamente en las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua.



3.10.2 Caracterización hidrobiológica

3.10.2.1 Perifiton

3.10.2.1 Introducción

Las comunidades perifíticas pueden utilizarse como bioindicadores de la calidad del agua, debido a que responden rápidamente a los cambios en las condiciones ambientales de los ecosistemas donde habitan. El perifiton ocupa sustratos duros inmersos en el lecho de las corrientes y su composición y estructura se relacionan con la estabilidad física y química del ecosistema. Dentro de las comunidades perifíticas, las algas son uno de los grupos más importantes por su potencial como bioindicadores de los sistemas lóticos, pues algunos de sus integrantes sólo prosperan bajo ciertas condiciones fisicoquímicas.

En medio de la dinámica a la que están sujetos los ambientes lóticos, algunos factores controlan el desarrollo de las comunidades perifíticas; numerosas algas parecen comportarse como oportunistas, es decir, sus poblaciones se desarrollan mejor cuando las condiciones ambientales como luz, temperatura, pH, nutrientes y tipo de sustrato son favorables; de la misma manera, cuando alguno de estos factores o la interacción entre ellos no favorece a las comunidades perifíticas, las comunidades pueden presentar baja diversidad o pueden presentar bajas densidades y ésta puede ser una respuesta ambiental que no necesariamente está relacionada con efectos contaminantes, por lo cual es importante la descripción detallada de los sitios donde fue colectada la muestra (Bold & Wynne, 1985).

3.10.2.2 Metodología

- **Metodología en campo**

Para colectar las muestras, se realizó una remoción por medio de cepillos plásticos del material adherido a sustratos sumergidos (piedras, troncos, hojarasca). Cada muestra se obtuvo utilizando un cuadrante de 8 cm², el cual se aplicó 30 veces al azar, a lo largo de un transecto de aproximadamente 20 m, para un total de 240 cm² por estación. Adicionalmente, se obtuvo una muestra cualitativa procedente de sustratos que estuvieran densamente colonizados por masas perifíticas.

Las muestras colectadas se fijaron con una solución de lugol al 10% (0.5 ml por cada 100 ml de muestra) y se transportó en envases plásticos opacos, debidamente rotulados, para su posterior análisis al microscopio.

- **Análisis de laboratorio**

Para la observación de las muestras de algas perifíticas se utilizó un microscopio invertido Leica DMIN, provisto de una reglilla ocular. Para el montaje de la muestra se utilizó la cámara de conteo Sedgwick-Rafter de 1 ml de capacidad (Wetzel & Likens, 1990). Para efectuar comparaciones válidas entre los análisis cuantitativos, todas las muestras se llevaron a un volumen de 100 ml; este volumen se agitó en un recipiente plástico de arriba



abajo 40 veces, e inmediatamente con una pipeta plástica se tomó el mililitro de muestra que se dispuso en la cámara de conteo.

Para efectuar el conteo, se seleccionaron 30 campos de observación, siguiendo un sistema de muestreo al azar y el dato obtenido fue la densidad de algas por unidad de volumen (ind/ml), el cual fue también relacionado con el área de muestreo contemplada (240 cm²) (Uehlinger, 1964). El conteo se realizó con una magnificación total de 400X.

La determinación taxonómica se basó en los trabajos de BURRELLY (1966, 1968, 1985); PRESCOTT et al. (1982); STREBEL Y KRAUTER (1988); Das Phytoplankton des Süßwasser (Hrsg. HUBER-PESTALOZZI, 1938): Band XVI Teil 1 Blaualgen (1938), Band XVI Teil 2, 1. Hälfte Chrysophyceae (1976), Band XVI Teil 4 Euglenophyceae (1955), Band XVI Teil 5 Chlorophyceae (1961), Band XVI Teil 7, 1. Hälfte Chlorophyceae (1983); Süßwasserflora von Mitteleuropa (ETTL et al. Hrsg. 1983, 1985a, 1985b, 1984, 1988, 1990, 1991a, 1991b, 1997a, 1997b), (Ramírez, JJ. 2000).

- **Determinación del Biovolumen o volumen celular**

Con el fin de calibrar las densidades obtenidas por unidad de volumen, se estimó el biovolumen o dimensión simétrica media de los organismos algales según su forma geométrica; para ello se implementó el método del volumen celular medio, obtenido a partir de las dimensiones de por lo menos 20 células seleccionadas aleatoriamente en el microscopio y la correspondencia de la forma celular a un sólido geométrico, según Hillebrand *et al.*, (1999). La densidad absoluta de un taxón (en org/ml), así como el promedio del número de células de algas que forman colonias, se multiplicó por su volumen celular medio para obtener un estimativo de la biomasa o biovolumen de cada taxón.

Este procedimiento es importante debido a que con el biovolumen se obtiene una medida de biomasa algal más exacta que puede usarse posteriormente en análisis de oferta trófica para macroinvertebrados o peces.

- **Procesamiento de la información y análisis de los datos**

- **Procedimientos previos al análisis de la muestra**

Las muestras de agua que contuvieran las algas perifíticas se procesaron debidamente en el laboratorio, y se definió como volumen de trabajo 100 ml, con el fin de hacer comparables las muestras, para lo cual se necesitó de una sedimentación previa.

Después del procesamiento inicial de las muestras, se realizó un sondeo general al microscopio con el fin de verificar su estado, especialmente si la cantidad de materia orgánica o material particulado presente en la muestra interfería con el análisis microscópico; en ese caso se realizó un procedimiento previo con peróxido, que removió el material orgánico y algunas partículas.

El siguiente paso fue establecer la curva de acumulación de especies, con el fin de definir el número de campos necesarios para el conteo definitivo de la muestra; estas curvas son

útiles para estimar el número de especies (riqueza) de una comunidad, y para verificar que el análisis de cuantificación y método de muestreo sean apropiados.

Conforme se va aumentando el esfuerzo de observación (en este caso el número de campos de conteo), la riqueza aumentará hasta que llegue un momento en el cual, por más que incremente la observación, no se hallarán nuevas especies y la curva Esfuerzo vs Número de especies se hará asintótica.

Como resultado parcial para el análisis de las muestras, se contaron 30 campos en la cámara de sedimentación; con este número de campos se obtuvo la estabilización de la asíntota, como se puede observar en la Figura 3.42 y la **Figura 3.43**, lo cual demuestra que el conteo y el método de muestreo fue efectivo para el análisis.

Figura 3.42. Curva de acumulación de especies definida a partir de los resultados de las quince estaciones de muestreo.

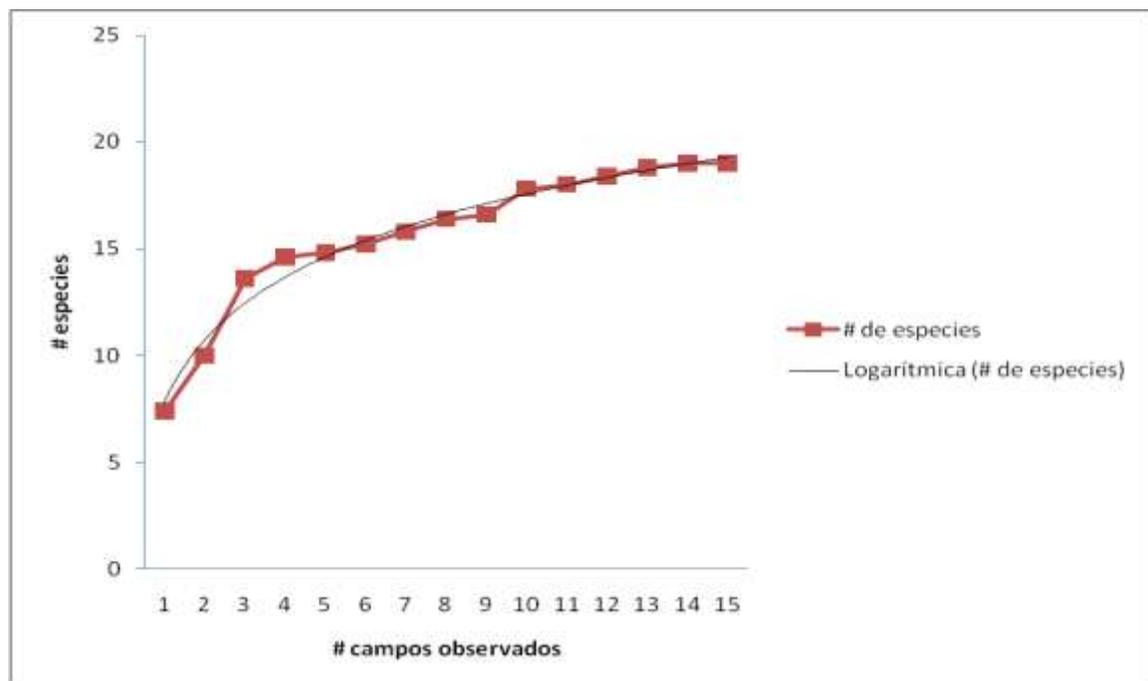
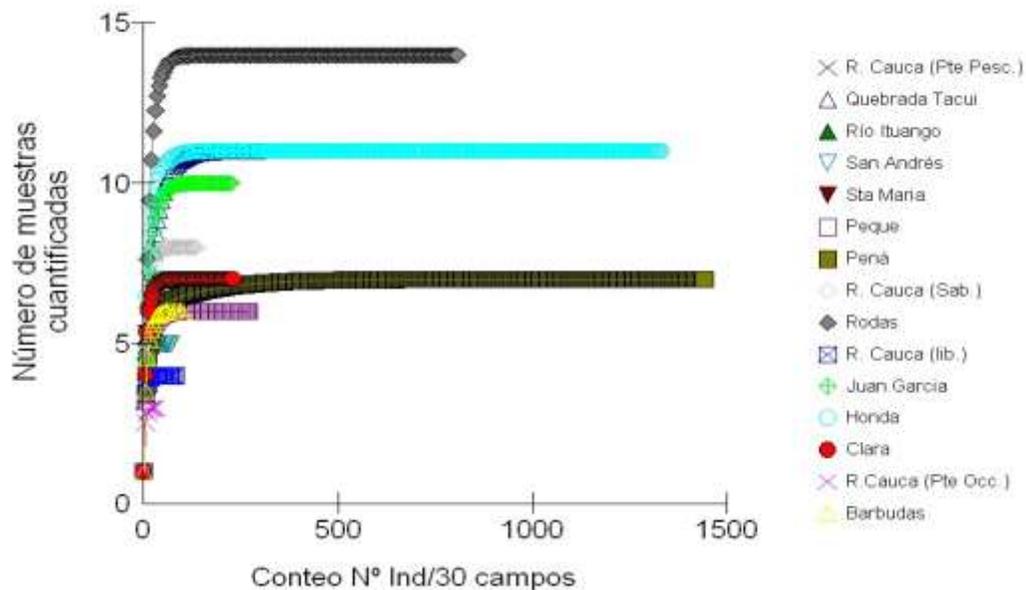


Figura 3.43. Curva de rarefacción de especies definida a partir del conteo de 30 campos al microscopio.



- Análisis de los datos

Se utilizaron para el análisis los índices de diversidad, dominancia, riqueza de especies y equidad (Shannon y Winner, 1949; Simpson, 1949; Pielou, 1975).

Los perfiles de abundancia y los índices de diversidad, riqueza y equidad se obtuvieron teniendo en cuenta los resultados derivados del análisis cuantitativo y de las unidades de biovolumen ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$), ya que esta medida, además de que incluye la densidad de organismos por mililitro, calibra la dimensión real de cada uno de los organismos según su forma geométrica.

Para contrastar la información de presencia y ausencia de taxones de algas perifíticas, así como también los de sus abundancias entre las quince estaciones, se presentan análisis de agrupamiento, para los cuales se aplicó el índice de similaridad de Bray-Curtis, utilizando los datos de abundancia registrados; los esquemas de agrupamiento se realizaron con base en un ligamiento completo de los datos. Para el cálculo del índice y el esquema de agrupamiento, se empleó el programa Biodiversity-Professional (Versión 2).

El índice de Similaridad Bray-Curtis proporciona un perfil acerca del grado de semejanza en la estructura de la comunidad perifítica, a partir de la distribución de los taxones encontrados. Adicionalmente, se realizaron comparaciones, teniendo en cuenta las 15 estaciones de muestreo, de los índices de diversidad, el número de organismos/cm², el biovolumen ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$) y la riqueza numérica de especies, para determinar si existían diferencias significativas espaciales entre estos parámetros, para lo cual se utilizó el estimador estadístico no paramétrico Kruskal-Wallis, el cual por medio de estadígrafo



denominado valor $p < 0.05$, indica diferencias estadísticamente significativas. Para ejecutar el cálculo se utilizó el programa Statgraphics.

Con respecto a los análisis aplicados y más específicamente a la utilización de los índices de diversidad, estos valores basados en la teoría de la información y la termodinámica integran significativamente la información derivada de la distribución de las especies y el número en que se encuentran, adicionalmente, dan una idea del grado de interrelaciones del ecosistema y su estabilidad.

Al describir una comunidad, luego de análisis y muestreos, comparamos estaciones y diferentes momentos de muestreo. Esto nos conllevará a demostrar la similitud o disimilitud entre las áreas muestreadas y por ende, la heterogeneidad ambiental en la cual se asienta la comunidad.

La diversidad es entonces resumida en un índice de algunos aspectos de la comunidad y en lo que respecta a la aplicación de índices como el de Shannon y Simpson se pueden combinar otros aspectos como la riqueza y la equidad en un sólo índice.

Es importante aclarar que el mayor potencial de este grupo de índices radica en la comparación que permite hacer entre regiones de análisis. Como índice resumen, es inevitable que enmascare información que puede llegar a ser importante pero, hasta el momento, no se cuenta con otro índice estimable para los objetos de análisis de la ecología de una comunidad.

A continuación se presenta la definición de cada índice aplicado con sus respectivas ecuaciones:

Índice de Shannon- Wiener (H'): El índice de Shannon es una forma de medir la entropía. (Pielou, 1977). Este índice asume que los individuos han sido muestreados aleatoriamente en una población indefinidamente grande, además de que todas las especies están representadas en la muestra. (Pielou, 1977). Se calcula como:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i * \ln P_i, \text{ donde}$$

- H' = Índice de Shannon-Wiener
- S = Número de especies
- P_i = Proporción de individuos hallados en la i-ésima especie

Índice de Simpson (D'): Es una medida no paramétrica de la densidad que sugiere que la diversidad está inversamente relacionada con la probabilidad de que dos individuos tomados al azar de una muestra pertenezcan a la misma especie. (Magurrán, 1988). Este índice es útil para señalar una especie indicadora dentro de la zona de estudio.

Para una población infinita este índice está dado por:



$$D' = 1 / \sum_{i=1}^S P_i^2, \text{ donde}$$

- D' = Índice de Simpson
- S = Número de especies
- P_i = proporción de individuos hallados en la i -ésima especie

Índice de equidad o uniformidad de Pielou (J): Este índice combina la información derivada del índice Shannon, es decir de la entropía o la cantidad de información derivada de la muestra con la riqueza de especies, es decir con el número de especies diferentes encontradas, esta combinación simplifica la idea acerca del grado de uniformidad de la muestra o distribución de las densidades con respecto al número de especies presente, se podría hacer la generalidad (aunque existen excepciones) que muestras con altos registros de equidad corresponden a altos registros de diversidad, ya que existen un número de individuos distribuidos entre varias especies y no se encuentran recargados hacia una sola especie, en ese caso la dominancia podría ser más alta.

$$J = H' / \ln S, \text{ donde}$$

- J = Índice Pielou
- H' = Índice de Shannon- Wiener
- S = Número de especies

3.10.2.3 Resultados y Discusión

- **Composición en términos del número de taxones encontrados**

En la Tabla 3.62 se presentan el listado general de las algas perifíticas encontradas con su respectiva clasificación taxonómica en tres divisiones generales, siete órdenes, nueve familias y 19 géneros, número que puede considerarse apreciable, si se tiene en cuenta que el muestreo fue puntual y sin réplicas temporales.

La mayoría de las algas encontradas pertenecen a la división Bacillariophyta, comúnmente conocidas como “diatomeas”, que son integrantes frecuentes del perifiton de las aguas corrientes. Estas algas pueden ser unicelulares, coloniales o filamentosas y son utilizadas regularmente en el estudio de la calidad del agua de corrientes ya que sus células están incluidas en una pared celular rodeada de silicio, lo que les confiere más peso y en consecuencia una adaptación para colonizar sustratos firmes inmersos en las corrientes expuestos a la velocidad. Por su elevada frecuencia, las diatomeas son un componente fundamental en la cadena trófica como grupo productor del sistema (Bold y Wynne, 1985).



Tabla 3.62. Clasificación general de las algas perifíticas

División	Orden	Familia	Género
CYANOPHYTA (Cianobacterias)	OSCILLATORIALES	OSCILLATORIACEAE	Oscillatoria sp.
			Lyngbya sp.
CHLOROPHYTA (Algas Verdes)	CLADOPHORALES	CLADOPHORACEAE	Cladophora sp.
	ZYGNEMATALES	DESMIDIACEAE	Cosmarium sp.
	ULOTHIRICALES	ULOTHIRACEAE	Ulothrix sp.
BACILLARIOPHYTA (Diatomeas)	DIATOMALES	FRAGILARIACEAE	Fragilaria sp 1
			Fragilaria sp 2
			Fragilaria sp 3
			Synedra sp.
	NAVICULALES	NAVICULACEAE	Aulacoseira sp.
			Naviculaceae (<i>Navicula</i> sp. cf)
			Gomphonema sp.cf
			Cymbella sp.
			Amphora sp.
			Pinnularia sp.
ACHNANTALES	ACHNANTHACEAE	Pleurosigma sp.	
		Amphipleura sp.	
		BACILLARIACEAE	Nitzschia sp.
			Cocconeis sp.

También se encontraron algas pertenecientes a la división Cyanophyta o algas verde-azules y a la división Chlorophyta o algas verdes; sin embargo, el número de taxones reportados en estas divisiones es menor en comparación con el número de taxones de diatomeas, lo cual es un hecho regular en las corrientes tropicales.

• **Estructura de Abundancias y Biovolumen celular**

En la Tabla 3.63 se presentan los registros de las abundancias totales después del conteo al microscopio, las cuales en principio son calculadas por unidad de volumen (individuos por mililitro), y luego transformadas a la dimensión geométrica o biovolumen de cada organismo utilizando las fórmulas volumétricas referidas en la Tabla 3.64.

Como puede observarse, los taxones más comunes entre las quince estaciones son: Naviculaceae (*Navicula* sp. cf.), *Gomphonema* sp., *Cymbella* sp., *Nitzschia* sp. y *Cocconeis* sp., que junto con *Fragilaria* sp. presentan los más altos registros, tanto en individuos por mililitro como en biovolumen celular (véase Tabla 3.65). La elevada abundancia de estos taxones hace que dominen en biovolumen celular por encima de otros taxones de mayor tamaño geométrico como *Cladophora* sp., *Ulothrix* sp., *Aulacoseira* sp. o *Pinnularia* sp., que resultaron ser menos numerosos.



Tabla 3.63. Abundancias totales de algas perifíticas (ind/ml)

TAXONES	Río Cauca Pescadero	Q. Tacuí	Río Ituango	Río San Andrés	Q. Santa María	Q. Peque	Q. Peña	Río Cauca Sabana larga	Q. Rodas	Río Cauca Liborina	Q. Juan García	Q. Honda	Q. Clara	Río Cauca Pre Occidente	Q. Barbudas
Oscillatoria sp.	2041		3061			2211		2041	14116			12415			
Lyngbya sp.		3061	3061	1020											
Cladophora sp.		1020	5102						16667		1190	6973			2721
Cosmarium sp.							1531								
Ulothrix sp.									11224						
Fragilaria sp 1		2041						1701	11565		3571	12415			2211
Fragilaria sp 2					2211		42857	5272	7313		6293	32823	9524	2721	1190
Fragilaria sp 3					2721	3571		3231	8673		2041	37925			
Synedra sp.		2041										11054			
Aulacoseira sp.		3061							12585		2551				
Naviculaceae	2041	22449	8163	5102	3912	19388	45918	3912	12075	2551	9524	43027	7313		
Gomphonema sp.		7143	4082	2041	5272	11395	13265	1361	5442	4082	2211	17517	5272		
Cymbella sp.	2041	5102	5102	1020	1190	6122	103061		8673				2551		3061
Amphora sp.		1020										7313			
Pinnularia sp.									6122		1531		2211	680	
Pleurosigma sp.										2041					
Amphipleura sp.									7143						
Nitzschia sp.	1020	2041	3061		4082		24490	2891	9014	5442	6633	27721	8163		7143
Cocconeis sp.		1020		3061	7313	3741	14286	2891	6463		2891	17517	4762	2041	850

Tabla 3.64. Fórmula de biovolumen elegida para cada taxón.

División algal	Género	Fórmula de biovolumen elegida según Hillebrand et al. (1999)	Biovolumen celular medio ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$)
Cianoprocarionta	<i>Oscillatoria</i> sp.	Cilindro	2113
	<i>Lyngbya</i> sp.	Cilindro	286
Chlorophyta	<i>Cladophora</i> sp.	Cilindro	3462
	<i>Cosmarium</i> sp.	Esfera Prolada	618
	<i>Ulothrix</i> sp.	Cilindro	3436
Bacillariophyta	<i>Fragilaria</i> sp 1	Base elíptica en prisma	869
	<i>Fragilaria</i> sp 2	Base elíptica en prisma	936
	<i>Fragilaria</i> sp 3	Base elíptica en prisma	427
	<i>Synedra</i> sp.	Caja Rectangular	557
	<i>Aulacoseira</i> sp.	Cilindro	5645
	Naviculaceae	Base elíptica en prisma	315
	<i>Gomphonema</i> sp.	Base elíptica en prisma	582
	<i>Cymbella</i> sp.	Mitad de prisma elíptica	564
	<i>Amphora</i> sp.	Mitad de prisma elíptica*2	814
	<i>Pinnularia</i> sp.	Rectangular box	2698
	<i>Pleurosigma</i> sp.	Base elíptica en prisma	426
	<i>Amphipleura</i> sp.	Base elíptica en prisma	723
	<i>Nitzschia</i> sp.	Base paralelograma en prisma	1802
	<i>Cocconeis</i> sp.	Esfera Prolada	602



Tabla 3.65. Abundancias totales del biovolumen celular medio ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$) por taxón.

ESTACIONES	Río Cauca Pescadero	Q. Tacuí	Río Ituango	Río San Andrés	Q. Santa María	Q. Peque	Q. Pená	Río Cauca Sabana larga	Q. Rodas	Río Cauca Liborina	Q. Juan García	Q. Honda	Q. Clara	Río Cauca Pte Occidente	Q. Barbudas
<i>Oscillatoria</i> sp.	4.312.245		6468.367			4.671.599		4.312.245	29.826.361			26.232.823			
<i>Lyngbya</i> sp.		875.510	875.510	291.837											
<i>Cladophora</i> sp.		3.532.653	17.663.265						57.700.000		4.121.429	24.139.796			9.420.408
<i>Cosmarium</i> sp.							945.918								
<i>Ulothrix</i> sp.									38.567.347						
<i>Fragilaria</i> sp 1		1.773.469						1.477.891	10.049.660		3.103.571	10.788.605			1.921.259
<i>Fragilaria</i> sp 2					2.069.388		40.114.286	4.934.694	6.844.898		5.889.796	30.722.449	8.914.286	2.546.939	1.114.286
<i>Fragilaria</i> sp 3					1.161.088	1.523.929		1.378.793	3.700.969		870.816	16.182.670			
<i>Synedra</i> sp.		1.136.316										6.155.045			
<i>Aulacoseira</i> sp.		17.280.563							71.042.315		14.400.469				
Naviculaceae	642.857	7.071.429	2.571.429	1.607.143	1.232.143	6.107.143	14.464.286	1.232.143	3.803.571	803.571	3.000.000	13.553.571	2.303.571		
<i>Gomphonema</i> sp.		4.157.143	2.375.510	1.187.755	3.068.367	6.631.633	7.720.408	791.837	3.167.347	2.375.510	1.286.735	10.194.898	3.068.367		
<i>Cymbella</i> sp.	1.151.020	2.877.551	2.877.551	575.510	671.429	3.453.061	58.126.531		4.891.837				1.438.776		1.726.531
<i>Amphora</i> sp.		830.408										5.951.259			
<i>Pinnularia</i> sp.									16.518.367		4.129.592		5.964.966	1.835.374	
<i>Pleurosigma</i> sp.										869.388					
<i>Amphipleura</i> sp.									5.164.286						
<i>Nitzschia</i> sp.	1.838.776	3.677.551	5.516.327		7.355.102		44.130.612	5.209.864	16.242.517	9.806.803	11.952.041	49.953.401	14.710.204		12.871.429
<i>Cocconeis</i> sp.		614.490		1.843.469	4.403.844	2.253.129	8.602.857	1.741.054	3.891.769		1.741.054	10.548.741	2.867.619	1.228.980	512.075



Algunas Naviculaceae pueden crecer en aguas turbias, por lo cual están adaptadas a corrientes que presenten altos caudales o con alta incidencia de arrastre de sedimentos o influenciados por importantes escorrentías. Están generalmente constituidos por ciertas sustancias de alto valor energético o fácilmente digeribles por lo cual constituyen una importante oferta para macroinvertebrados o peces que se alimentan de algas perifíticas (Ramírez, 2000). El tamaño de los representantes de Naviculaceae es pequeño con respecto a otras algas perifíticas, lo cual hace que su tasa de regeneración sea rápida si las condiciones ambientales son propicias, esto favorece una rápida repoblación de estos organismos después del arrastre provocado por perturbaciones naturales en el ambiente, como la fuerte temporada invernal.

Con respecto a *Gomphonema* sp., son características de aguas limpias (Branco, 1986), En tanto que *Cymbella* sp., puede vivir bien en aguas ricas en sales provenientes de desechos, utilizándolos como nutrientes para su desarrollo, o en aguas limpias. Muchas especies viven en aguas ricas en materia orgánica y su abundancia depende de la carga de material orgánico que exista (Branco, 1986).

Por su parte, algunas especies de *Nitzschia* sp. son características de aguas limpias mientras otras lo son de aguas contaminadas (Branco, 1986); sin embargo es importante aclarar que en la zona de estudio puede encontrarse incidencia de aguas residuales pero no de altas descargas de residuos industriales, por ello se podría considerar que son especies probablemente procedentes de aguas limpias. Con respecto a *Cocconeis* sp., suele ser abundante en las capas más internas del perifiton, y, por lo tanto, está menos expuesto a la herbivoría; puede reportarse en ambientes libres de altas cargas de residuos industriales (Wetzel, 1990).

El género *Fragilaria* sp., a pesar de no registrarse en la mayoría de las estaciones, es importante por los aportes de biovolumen en las estaciones Río Cauca (Sabanalarga), Quebrada Rodas, Quebrada Juan García y Quebrada Honda; este taxón lo conforman células unidas de lado a lado y forma colonias permanentes o fluctuantes, produce olor a geranio cuando se encuentra en pequeñas cantidades, y a tierra cuando forma grandes colonias. Su presencia es común en las comunidades perifíticas de corrientes de montaña desde las partes altas de la cuenca hasta planicies de inundación y muchas de sus especies son indicadoras de agua con buenos estados de oxidación y activa descomposición de materia orgánica, por lo cual son sistemas saludables en términos de la calidad del agua (Branco, 1986).

Otros taxones como *Cosmarium* sp., *Ulothrix* sp., *Synedra* sp., *Amphora* sp. *Pleurosigma* sp. y *Amphipleura* sp., además de que fueron registrados de manera fortuita en alguna de las estaciones, presentan bajas densidades, por lo cual su presencia no es un buen indicador para caracterizar los sitios de muestreo; sin embargo, a pesar de que el registro de estos taxones no es claro, son comúnmente encontrados en ambientes lóticos de aguas con buena calidad fisicoquímica y sanitaria.

En síntesis, según la abundancia de los taxones de algas perifíticas encontrados en la mayoría de las estaciones estudiadas, el ambiente fisicoquímico de los sitios corresponde probablemente a un sistema de buena calidad, que permite la presencia y buenos aportes de biomasa en los ecotonos analizados.



En la Figura 3.44 se presenta el perfil de abundancias relativas de los taxones encontrados en cada estación; en términos generales puede decirse que su conformación es achatada, es decir que en pocas estaciones las barras indican una predominancia por parte de un solo taxón, o que en la mayoría de las estaciones la distribución de las abundancias presenta tendencias uniformes.

Sólo en las estaciones sobre el río Cauca, Puente Pescadero y Liborina, el perfil de abundancias presentó alta predominancia por parte de un taxón, el cual en el caso de Puente Pescadero fue *Oscillatoria* sp. y en Liborina *Nitzschia* sp. este resultado puede estar relacionado con el indicio de alto estrés físico en el sitio, que limita el desarrollo de otras especies.

En la Figura 3.45 se encuentran los análisis de agrupación de las estaciones según la presencia o ausencia de los diferentes taxones. A pesar de que el porcentaje de similitud general es bajo, existe una clara separación de dos grupos de estaciones, uno conformado por la quebrada Juan García, Rodas, Honda, Río Cauca en Sabanalarga, Quebrada Barbudas y Tacui y el segundo constituido por Quebrada Clara, Pená, Santa María, Peque, San Andrés, Río Cauca en Liborina, Río Ituango y Río Cauca puente pescadero.

Figura 3.44. Perfil de abundancia relativa: pi (basado en el biovolumen celular medio) registrado por los taxones.

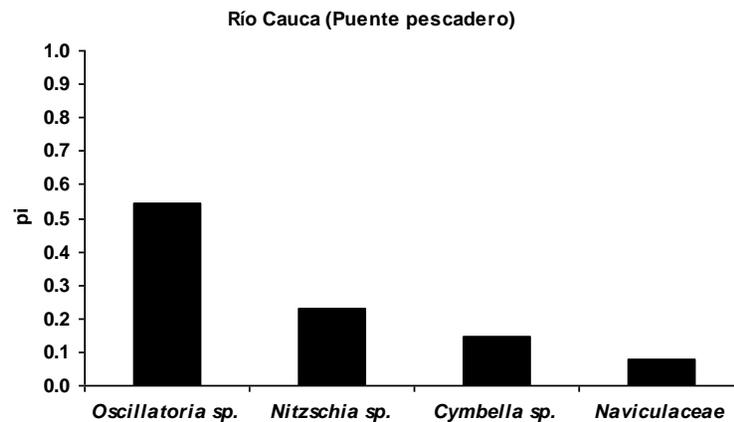


Figura 3.44. Perfil de abundancia relativa: pi (basado en el biovolumen celular medio) registrado por los taxones. (Continuación)

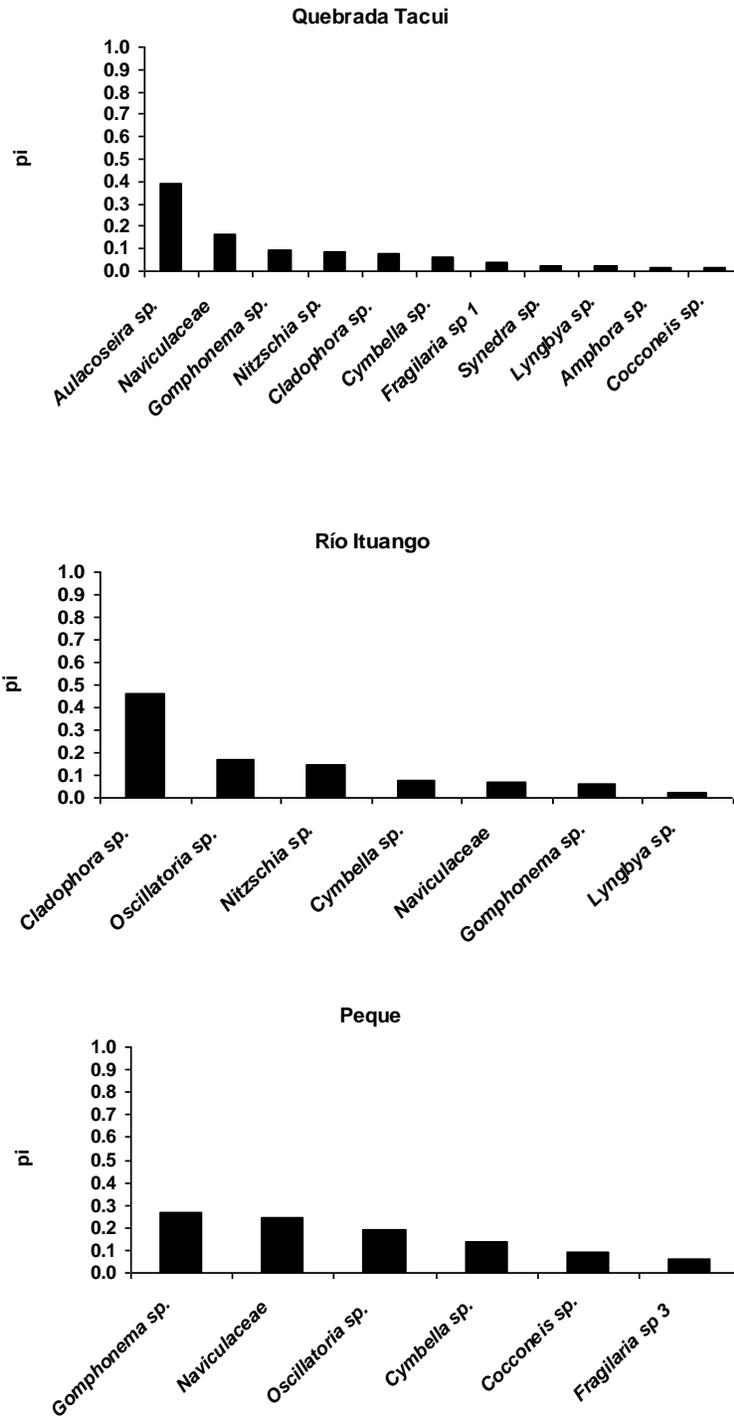




Figura 3.44. Perfil de abundancia relativa: pi (basado en el biovolumen celular medio) registrado por los taxones. (Continuación)

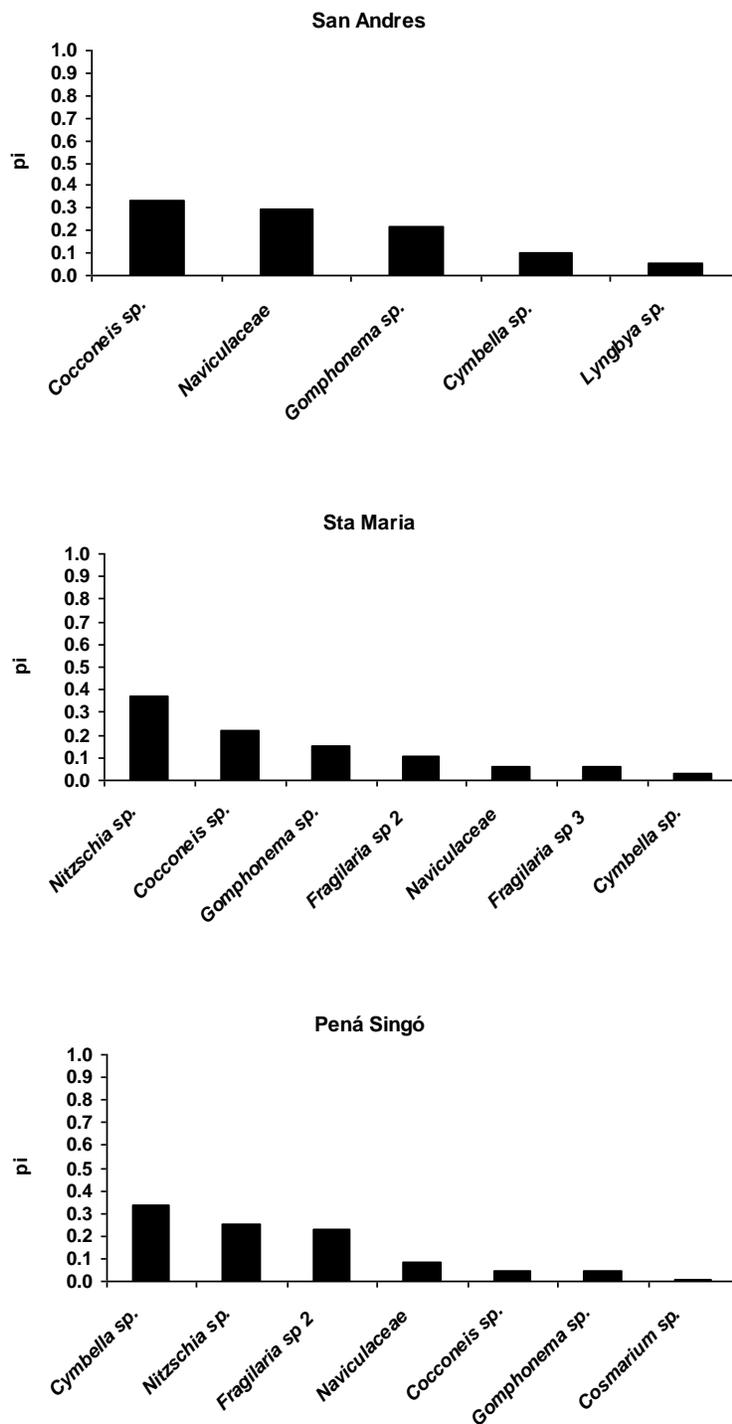




Figura 3.44. Perfil de abundancia relativa: pi (basado en el biovolumen celular medio) registrado por los taxones. (Continuación)

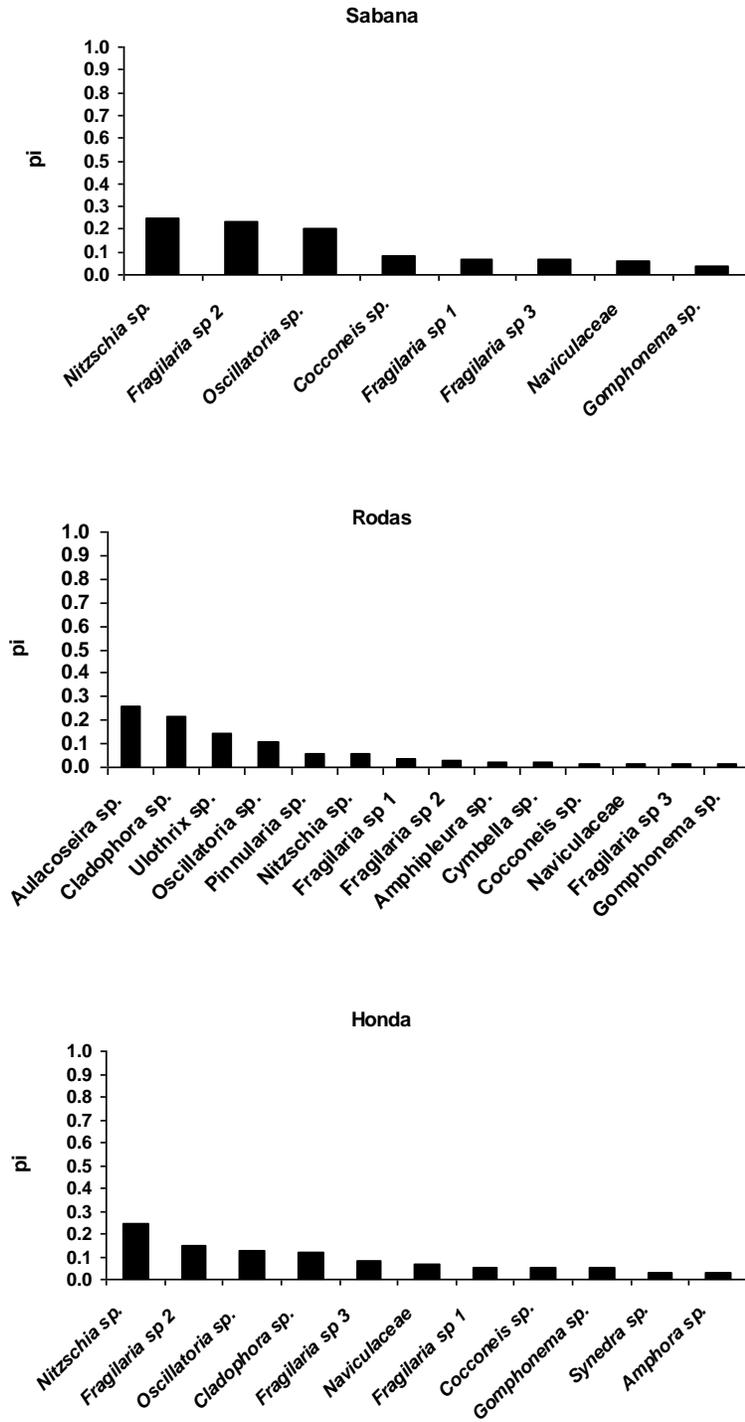


Figura 3.44. Perfil de abundancia relativa: π_i (basado en el biovolumen celular medio) registrado por los taxones. (Continuación)

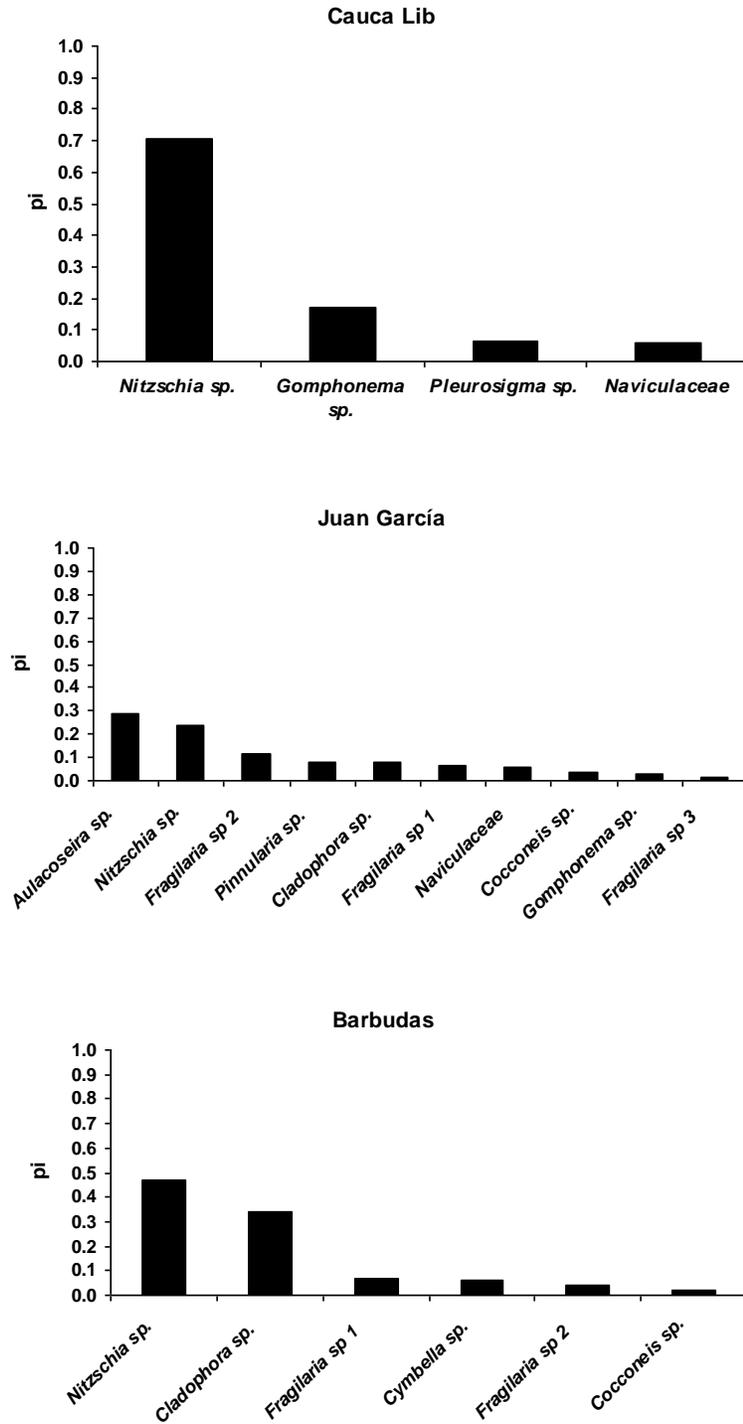


Figura 3.44. Perfil de abundancia relativa: π_i (basado en el biovolumen celular medio) registrado por los taxones. (Continuación)

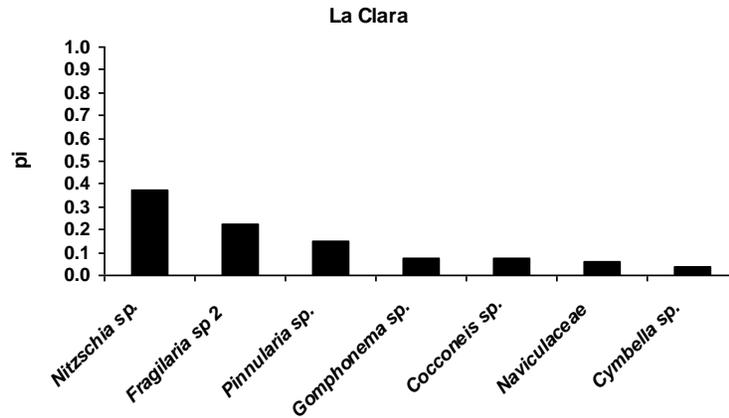
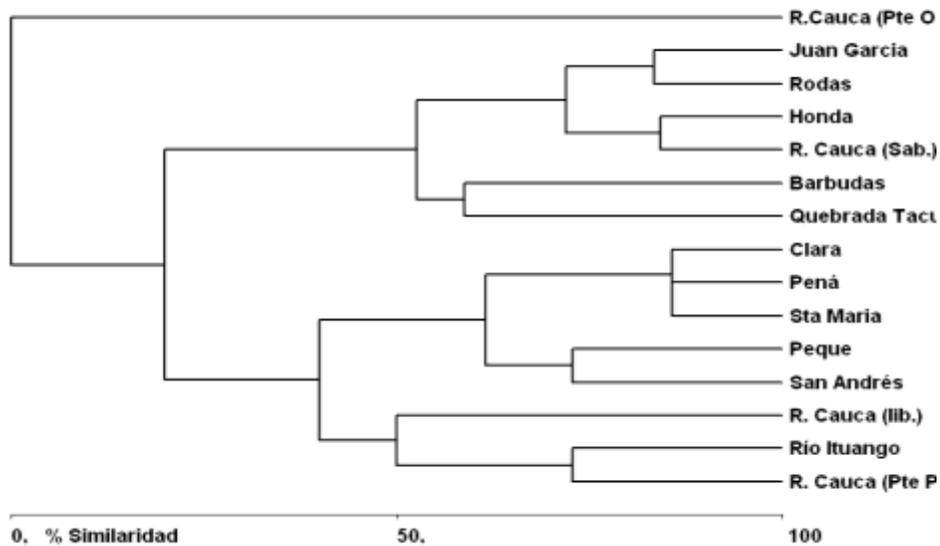


Figura 3.45. Análisis de agrupamiento espacio-temporal - Índice de similitud de Bray-Curtis.



Por grupos se presentan entonces importantes similitudes (superiores al 40%), lo cual sugiere que la mayoría de los taxones encontrados entre los dos grupos, son de presencia común en los sitios comprendidos, lo cual es importante ya que esto evidencia una asociación importante de especies en el área o en los cuerpos de agua, lo cual podría representar cierta estabilidad biótica en términos de composición de especies y esto se encuentra relacionado con el buen estado ecológico del sistema en general y de calidad del agua entre los cuerpos de agua estudiados.



Así mismo se hizo evidente que la estación río Cauca- Puente de Occidente, es el sitio más disímil, lo cual sugiere que en este lugar se encontraron taxones que no fueron de presencia común en los demás puntos, adicionalmente, es importante anotar que es el sitio con menor diversidad de taxones, así como también con bajas abundancias, lo cual, visto a través del análisis de las algas perifíticas, es el sitio con menos condiciones ecológicas favorables para el desarrollo de estos organismos. Esta situación, así como su posible explicación se presenta más adelante en el apartado de cuantificación de la densidad de organismos.

• Densidades

En la Tabla 3.66 se encuentran los registros de las densidades de las algas perifíticas, en diferentes unidades de escala, pasando por la cuantificación preliminar en 30 campos, la medida de biovolumen celular y la cantidad de organismos por unidad de área; si bien a pesar de que son unidades diferentes para representar la densidad, existe una correspondencia entre los resultados.

Tabla 3.66. Densidades totales por estación.

ESTACIÓN	# individuos / 30 campos	Individuos/ml	Biovolumen $\mu\text{m}^3/\text{ml}$	Individuos/cm ²
Río Cauca (Pte Pescadero)	42	7.143	7.944.898	2.976
Quebrada Tacui	294	50.000	43.827.083	20.833
Río Ituango	186	31.633	38.347.959	13.180
Río San Andrés	72	12.245	5.505.714	5.102
Quebrada Santa María	157	26.701	19.961.361	11.125
Quebrada Peque	273	46.429	24.640.493	19.345
Quebrada Pená	1.443	245.408	174.104.898	102.253
Río Cauca (Sabanalarga)	137	23.299	21.078.520	9.708
Quebrada Rodas	806	137.075	271.411.244	57.115
Río Cauca (Liborina)	83	14.116	13.855.272	5.882
Quebrada Juan García	226	38.435	50.495.503	16.015
Quebrada Honda	1.333	226.701	204.423.259	94.459
Quebrada Clara	234	39.796	39.267.789	16.582
Río Cauca (Pte Occidente)	32	5.442	5.611.293	2.268
Quebrada Barbudas	101	17.177	27.565.986	7.157

Densidad preliminar de conteo en 30 campos, organismos cuantificados por unidad de volumen (Ind/ml), biovolumen cuantificado en relación a la dimensión del organismo ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$) y al número de (Ind/ml) y finalmente organismos cuantificados por unidad de área (Ind/cm²).

Como comentarios generales se podría mencionar que la mayoría de los registros se encuentran en un rango óptimo en términos de calidad, indicando que son aguas libres de polución o contaminación de algún tipo, sin embargo, las estaciones ubicadas en los sitios Rodas, Honda y Pená, parecen presentar, según la cantidad de organismos, escenarios ecológicos favorables para el desarrollo de algas (véase la Figura 3.46 y la Figura 3.47), lo cual también podría estar relacionado con presencia de polución en las fuentes ya que los valores se encuentran muy por encima de los valores comunes de aguas naturales libres de contaminación.

Figura 3.46. Variación del biovolumen y del número de organismos por unidad de volumen en cada estación.

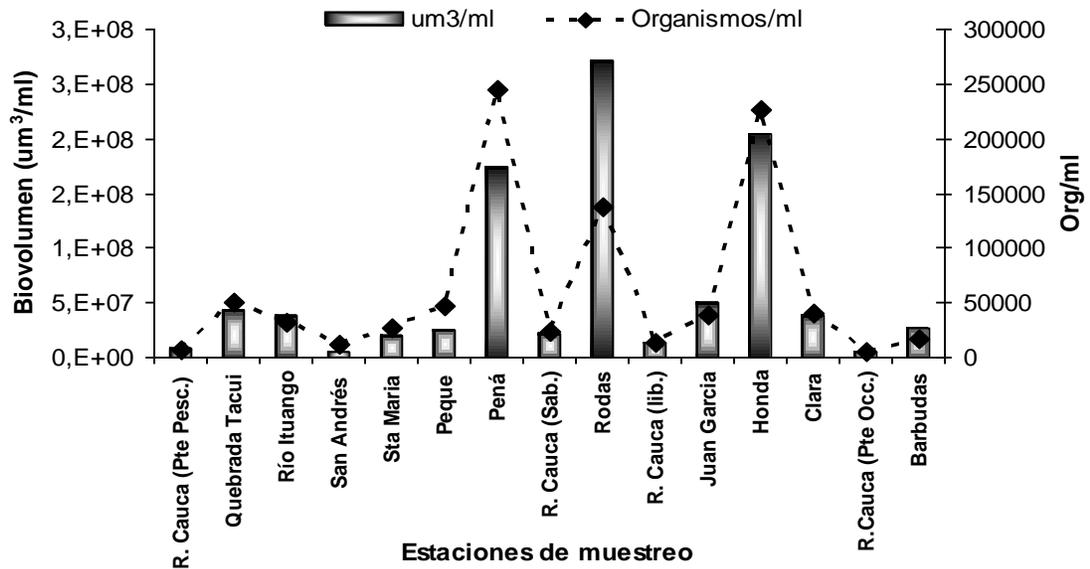
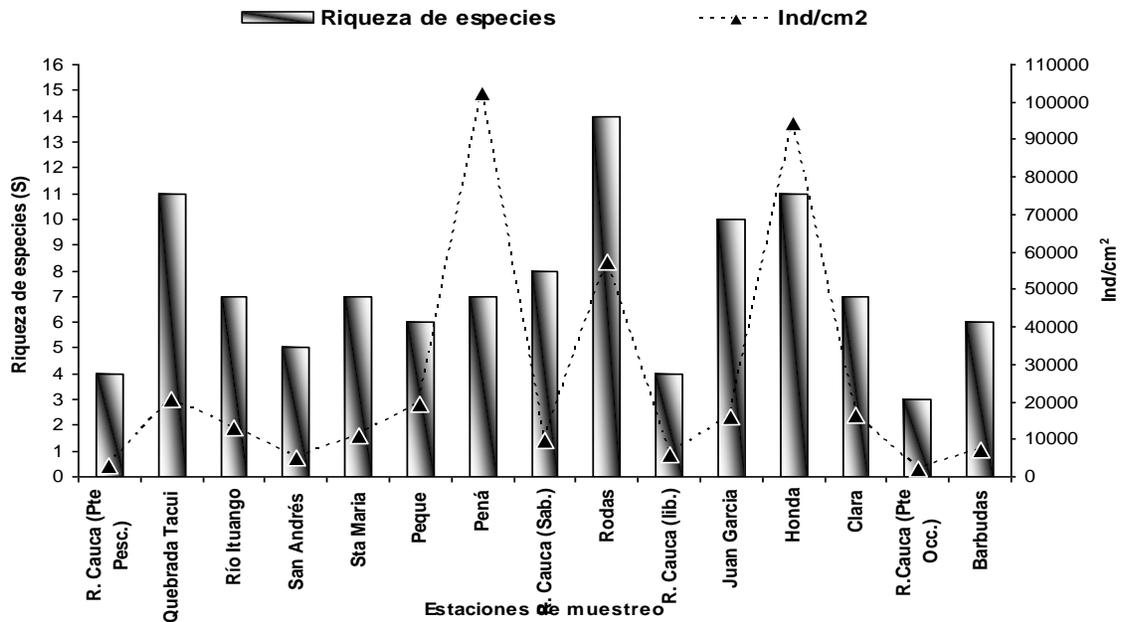


Figura 3.47. Variación del número de taxones y del número de organismos por unidad de área en cada estación.





Estas estaciones de muestreo se caracterizan por presentar un sustrato heterogéneo compuesto de grava, rocas de tamaño grande y mediano, disposición de sustrato variable y estable, inmerso en la corriente para la colonización de las algas; adicionalmente fue reportada penetración de luz alta, y caudal y velocidad de la corriente moderado a alto. Este escenario ecológico, el cual puede presentar variaciones temporales, reúne condiciones fisicoquímicas de calidad del agua que favorecen el desarrollo de altas densidades de algas.

Las bajas cantidades registradas, especialmente en las estaciones San Andrés y en el Río Cauca, tanto en Puente Pescadero, Liborina y Puente Occidente, reflejan las condiciones físicas del escenario ecológico de estos sitios de muestreo, ya que implican características que no favorecen un alto desarrollo de las algas producido por el estrés físico o por la falta de sustratos disponibles y estables que se encuentren inmersos en el lecho de la corriente y que promuevan la colonización de las algas.

Las estaciones de las quebradas Rodas, Honda y Pená, que presentan los mayores registros, se caracterizaron por presentar un sustrato heterogéneo, con presencia de rocas de diferente tamaño, lo cual asegura cierta estabilidad y diversidad del biotopo para la colonización de algas, aspectos más vulnerables en ambientes dominados por sustratos de tipo sedimento y grava los cuales son más fácilmente arrastrados por la corriente.

Como se mencionó anteriormente los altos registros en Rodas, Honda y Pená pueden también estar relacionados con eventos por enriquecimiento de nutrientes y como consecuencia altas densidades de organismos que responden a este efecto, implicando posible presencia de polución en estos cuerpos de agua. Adicionalmente, con respecto a las densidades cuantificadas también se podría decir que acorde a la clasificación del estado trófico de un cuerpo de agua, basada en la densidad algal según Margalef (1983), las cantidades de algas registradas en Rodas, Honda y Pená están muy por encima de las densidades indicadoras de estado eutrófico o “deficiente” en términos de calidad para un sistema acuático, ya que se encuentran muy por encima de los 50.000 ind/ml.

Con respecto a la cuantificación del biovolumen, es notable que los resultados de organismos por unidad de volumen (org/ml), corresponden con los picos más altos de cuantificación por volumen celular o biovolumen, de esta manera se puede concluir que en realidad las estaciones ubicadas en Pená, Rodas y Honda brindan una mayor oferta alimenticia a otros componentes como macroinvertebrados y peces ya que la cantidad de organismos algales, tanto en número como en dimensión celular o biomasa, es mucho más significativa con respecto a otras estaciones.

- **Índices de Diversidad**

En la Tabla 3.67 se encuentran los resultados relacionados con los índices de diversidad, que resumen la información obtenida en términos de abundancia y cantidad de taxones encontrados en cada estación.



Tabla 3.67. Registros de los índices de diversidad, equidad, dominancia.

Estación	Riqueza de especies (S)	Diversidad de Shannon H'	Equidad Pielou (J')	Dominancia de Simpson (D)
Río Cauca (Pte Pesc.)	4	1,15	0,83	0,38
Quebrada Tacui	11	1,91	0,80	0,21
Río Ituango	7	1,57	0,81	0,28
Río San Andrés	5	1,45	0,90	0,26
Quebrada Sta Maria	7	1,68	0,86	0,23
Quebrada Peque	6	1,68	0,94	0,20
Quebrada Pená	7	1,57	0,81	0,24
Río Cauca (Sabanalarga)	8	1,87	0,90	0,18
Quebrada Rodas	14	2,13	0,81	0,16
Río Cauca (Liborina)	4	0,89	0,64	0,54
Quebrada Juan Garcia	10	1,98	0,86	0,17
Quebrada Honda	11	2,19	0,91	0,13
Quebrada Clara	7	1,67	0,86	0,23
Río Cauca (Pte Occ.)	3	1,06	0,96	0,36
Quebrada Barbudas	6	1,29	0,72	0,35

En términos generales los valores de diversidad de Shannon en las quince estaciones pueden considerarse intermedios, excepto en Río Cauca-Liborina, en donde el valor es menor que uno, por lo cual se considera bajo. Las estaciones con mayor diversidad de Shannon fueron Quebrada Rodas, Quebrada Honda, Quebrada Juan García y Quebrada Tacui, en las cuales los valores son cercanos o superiores a dos.

Las estaciones con los mayores valores de dominancia fueron Río Cauca-Liborina y Río Cauca-Puente Pescadero, de las cuales ya se había mencionado anteriormente presentaron predominancia por parte de un taxón, lo cual induce mayores valores del índice de dominancia.

Con respecto a los resultados de estos índices se observa que la riqueza de especies entre las estaciones no supera los 14 taxones (Quebrada Rodas). Aunque este es un valor bajo, es importante tener en cuenta que estos resultados derivan de un único muestreo al azar, sin estudios previos disponibles. El número de especies cuantificado se podría considerar normal dentro de un sistema con buenas condiciones fisicoquímicas.

En términos de la calidad del agua con respecto a la cuantificación de los índices se podría decir que los valores de diversidad de Shannon (H') los cuales varían entre 0 y 5, se observó que en la mayoría de las estaciones, a excepción las ubicadas en el Río Cauca, los valores presentan una tendencia común, siendo extremos los datos de 1,06 (Río Cauca Puente Occidente) y 2.19 (Quebrada Honda); el grupo de valores puede ser considerado de rango intermedio, común y propio de aguas naturales.

Es importante recordar que este índice asume que los individuos son muestreados aleatoriamente en una población infinita y que todas las especies presentes están



representadas en la muestra, por lo tanto considerando que estos resultados provienen de una sola campaña de muestreo al azar los valores obtenidos fueron importantes y podrían estar relacionados con aguas de buena calidad.

Con respecto a los resultados derivados del índice de equidad (J') los valores son superiores a 0,64 (río Cauca Liborina), lo cual puede estar indicando, en términos de la calidad del agua, condiciones favorables para el desarrollo equitativo de varias especies.

Observando la distribución de los índices en la mayoría de las estaciones consideradas se deduce que la estación menos diversa es Río Cauca (Liborina), la cual además de registrar el más bajo valor de diversidad de Shannon, presenta la menor equidad y la mayor dominancia, indicando la presencia de factores que propician el desarrollo de algunas especies en particular.

3.10.2.4 Conclusiones

- Las algas perifíticas encontradas pertenecen a las divisiones Cyanophyta (Algas verde azules), Chlorophyta (Algas verdes) y Bacillariophyta (Diatomeas); entre estos tres grupos fueron encontrados 19 géneros, número apreciable, entendiendo que el listado obtenido proviene de un muestreo puntual, en un sitio determinado en el cuerpo de agua y sin réplicas temporales. Dentro de este listado, el mayor número de taxones pertenece a la división Bacillariophyta, lo cual es un rasgo común de corrientes naturales ya que este grupo posee adaptaciones ecológicas para adherirse fuertemente a los sustratos inmersos en lechos turbulentos.
- Con respecto a la distribución de las diferentes especies entre las estaciones, se encontró como rasgo común la presencia de los taxones y más específicamente de las diatomeas Naviculaceae (*Navicula* sp. cf.), *Gomphonema* sp., *Cymbella* sp., *Nitzschia* sp. y *Cocconeis* sp. y *Fragilaria* sp. Estos taxones están conformados por esqueletos de sílice lo cual les confiere adaptación en forma de mayor peso para no ser arrastrados ante las diferentes velocidades de la corriente. Adicionalmente, la mayoría de las especies pertenecientes a estos géneros son indicadores de aguas limpias o al menos libres de altas concentraciones de contaminantes residuales o industriales.
- En relación con las densidades cuantificadas la mayoría de los registros se correspondieron a un rango óptimo en términos de calidad, indicando que son aguas libres de poluciones o contaminación de algún tipo, sin embargo, las estaciones ubicadas en los sitios Rodas, Honda y Pená parecen presentar según la cantidad de organismos escenarios ecológicos favorables para el desarrollo masivo de algas, lo cual también podría estar relacionado con presencia de polución en las fuentes ya que los valores se encuentran muy por encima de los valores comunes de aguas naturales libres de contaminación.
- De acuerdo a los registros de densidad en cada una de las estaciones se observaron algunas tendencias en los resultados en torno al tipo de sustrato presente y a la estructura física del escenario ecológico de cada estación (Biotopo), fue así como en las estaciones con sustrato heterogéneo compuesto de grava, rocas de tamaño grande y mediano inmersas en la corriente existió la tendencia a encontrar mayores



densidades ya que las condiciones favorecían la colonización de las algas, lo cual también es facilitado por supuesto por la penetración de luz en las corrientes.

- Las menores densidades fueron registradas en las estaciones San Andrés y en el Río Cauca, tanto en Puente Pescadero, Liborina y Puente Occidente; este grupo de estaciones reflejan en sus resultados, condiciones físicas desfavorables del biotopo para la colonización de algas, ya que implican características que no les favorecen como el alto estrés físico en la corriente o la falta de sustratos disponibles, favorables y estables que se encuentren inmersos en el lecho del caudal; este es el caso de este conjunto de estaciones, las cuales presentaron como sustrato predominante material fino como limos, arcillas o material de arrastre, el cual no beneficia la colonización de algas perifíticas.
- En relación a los índices, se observó que la diversidad de Shannon registró valores considerados de rango intermedio, común y propio de aguas naturales; este registro es importante, considerando una sola campaña de muestreo al azar, por lo cual los valores obtenidos (al menos durante la campaña realizada) podrían estar relacionados con aguas de buena calidad.
- Con respecto a los índices de equidad y dominancia, se encontró que existen condiciones favorables para el equitativo desarrollo de varias especies; los valores de dominancia son bajos, e indican que no existen tendencias específicas en las condiciones del biotopo que solo favorezcan unas pocas especies; siendo así, es posible que el escenario ecológico sea lo suficientemente saludable para favorecer a varias formas de vida con diferente ecología en la mayoría de las estaciones. Solo la estación Río Cauca (Liborina), registró el más bajo valor de diversidad de Shannon, la menor equidad y la mayor dominancia, siendo el cuerpo de agua con los más probables indicios de situaciones desfavorables en la calidad de sus aguas.

3.10.2.5 Bentos

• Metodología

Para el muestreo de Bentos se tomaron muestras cuantitativas por medio de la red Surber, la cual consta de un aro metálico de 900 cm² de área, provisto de una malla que retiene los organismos removidos de los sustratos demarcados por el cuadrante de la red. Los muestreos se realizaron en áreas de un sustrato apropiado para el establecimiento de comunidades bióticas, buscando en lo posible rocas de tamaño medio.

El material recolectado en campo se empacó en tarros plásticos y se fijó en alcohol al 70%, para su posterior identificación en el laboratorio a través de un estereomicroscopio y utilizando las claves taxonómicas de McCafferty (1981) y Pennak (1978). También se consultaron, puesto que presentan información taxonómica y ecológica de organismos encontrados en Colombia, Roldán (1988), Muñoz y Ospina (1999), Posada y Roldán (2003) y Álvarez (sin publicar). Adicionalmente, se revisó la información secundaria disponible acerca de las características generales del área de estudio y los reportes previos de especies encontradas en las corrientes consideradas en el estudio actual.



La identificación de los organismos se realizó en lo posible hasta el nivel de género. Sin embargo, la aplicación del índice de calidad BMWP, se realizó con base en el cuadro de familias, lo cual no solamente permite obviar la dificultad de identificación de algunos géneros sino también adoptar la idea de que la familia es una “comunidad indicadora que actualmente está siendo utilizado en diferentes países, puesto que al tener en cuenta a toda una comunidad se minimizan los errores y se multiplica la capacidad de detección de alteraciones” (Alba-Tercedor, 1996).

- **Tratamiento de la información**

Para el análisis se cuantificaron los macroinvertebrados en términos de densidad (número de individuos/m²). Para comparar la estructura y composición de las comunidades de bentos en las diferentes quebradas, se determinó, para cada una, la riqueza y abundancia de individuos por familia (abundancia relativa) y se construyeron histogramas de distribución eliminando en éstos las familias representadas por cinco o menos individuos con el fin de facilitar el análisis de cada situación, con aquellas que sean realmente representativas en cada uno de los sitios de muestreo.

Se estimaron los índices de diversidad biológica de la serie de Hill (1973), que constituyen índices no paramétricos de las medidas de dominancia, los cuales permiten medir el número efectivo de especies en la muestra, donde la importancia de cada especie está dada por su abundancia y se expresa como:

$$N_0 = S,$$

Donde S es el número total de taxones

N₁ indica el número de especies abundantes, dado por la expresión:

$$N_1 = e^{H'},$$

Donde
$$H' = \sum p_i \ln p_i = \sum \frac{n_i}{n} \ln \frac{n_i}{n}$$
 (índice de Shannon-Wiener)

- **n_i = número de individuos de la especie i**

N₂ indica número de especies muy abundantes

$$N_2 = \frac{1}{\lambda},$$

Donde $\lambda = \sum P_i^2$ (índice de Simpson)

Para estimar la equidad se utilizó el radio modificado de Hill conocido como E₅ y representado como:

$$E_5 = N_2 - 1/N_1 - 1$$

En la medida que E_5 se acerca a cero, significa que una de las especies domina sobre las demás de la comunidad y se acerca a uno cuando todas las especies comparten dominancias similares. La ventaja de este índice es que se afecta muy poco por la riqueza de especies (Ludwig y Reynolds, citado por Ríos Gafardo, 2004).

Adicionalmente, se calculó la riqueza de Margalef expresada como:

$$R_1 = \frac{S - 1}{\ln(n)}$$

Donde n = número total de individuos en la muestra

Y el índice de Berger Parker, el cual considera la diversidad a partir de la abundancia del taxón más abundante y se expresa como:

$$\text{Berger Parker} = d = n_i \text{max}/n,$$

Donde $n_i \text{max}$ = número de individuos de la especie más abundante

Se trazaron curvas de distribución log normal para representar la abundancia de las familias, independientemente de la familia que sea, visualizando de esta forma aquellas que predominan dentro de la comunidad, es decir aquellas que presentan un número bastante representativo de organismos.

También se determinó la calidad del agua aplicando el índice BMWP (Roldán, 1992; 1999; Roldán y Ruíz, 2001; Roldán, 2003) el cual propone que existe una comunidad de macroinvertebrados que actúa como sensor ambiental y requiere una identificación hasta el nivel de familia. A cada familia le corresponde un puntaje (véase la Tabla 3.68), que debe ser sumado con el de las otras familias halladas en el sitio, para obtener el valor del índice BMWP o el significado ambiental que representan los valores de este índice (véase la Tabla 3.69).

Tabla 3.68. Índice biótico BMWP para Colombia (tomado de Roldán, 2003)

Familias	Puntaje
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Helicopsychidae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hydridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae.	10
Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeroidea, Euthyplocidae, Gyrinidae, Hydraenidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philipotamidae, Polycentropodidae, Polymitarcyidae, Xiphocentronidae.	9
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelpusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae.	8
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydroptilidae, Leptohyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae.	7
Aeshnidae, Ancyliidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.	6
Belostomatidae, Gelastocoridae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae.	5
Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolycopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydrometridae, Noteridae.	4
Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae.	3
Chironomidae, Culicidae, Muscidae, Sciomyzidae, Syrphidae.	2
Tubificidae	1



Tabla 3.69. Clases de calidad, valor y significado ambiental del índice BMWP/Colombia (Roldán, 2003)

Clase	Calidad	Valor	Significado
I	“Buena”	Mayor de 150	Aguas muy limpias
II	“Aceptable”	61-150	Aguas ligeramente contaminadas
III	“Dudosa”	36-60	Aguas moderadamente contaminadas
IV	“Crítica”	16-35	Aguas muy contaminadas
V	“Muy crítica”	Menor de 15	Aguas fuertemente contaminadas

• **Resultados**

Los macroinvertebrados son utilizados como indicadores de la calidad biológica de los sistemas acuáticos, debido principalmente a su amplia distribución y diversidad de grupos, y a que no presentan una gran movilidad que les permita adaptarse a las fluctuaciones en las condiciones de calidad del agua, reflejando no sólo los cambios transitorios, sino también los que ocurren en largos periodos de tiempo.

Además son importantes dentro de las cadenas tróficas, puesto que hacen parte de la alimentación de una gran variedad de organismos, que a su vez controlan el crecimiento de las poblaciones de algunos insectos vectores.

En la Tabla 3.70 se presentan los registros del Diagnóstico Ambiental de Alternativas para la carretera Santa Fe de Antioquia – Puerto Valdivia, realizado por Integral en 1996, el cual a su vez incluye los datos de los estudios realizados por Roldán y Cia Ltda (1981) y por Integral (1993) sin discriminar los resultados correspondientes a cada uno.

Tabla 3.70. Muestreo de macroinvertebrados en área de estudio

	Río Ituango	Río San Andrés	Q. Tacui	Q. Santa María	Q. Peña	Río Peque	Q. da Honda	Q. Clara	Q. Rodas	Q. Juan García	Q. Barbuda	Río Cauca P. Pescadero	Río Cauca Sabanalarga	Río Cauca P. Occidente
Phylum Platyhelminthes:														
Clase Turbellaria														
ORDEN TRICLADIDA														
Planariidae														
Dugesia			6				R2	1	1	3		2		
							R2							
Phylum Nematomorpha:														
Clase Nematomorpha														
Phylum Annelida:														
Clase Oligochaeta														
ORDEN HAPLOTAXIDA														
Tubificidae												8		2
Phylum Arthropoda:														
Clase Insecta														
ORDEN EPHEMEROPTERA														
Leptohyphidae														1
Leptohyphes		R1								R2				
Thricorythodes	2	3	5	5	19	16	37	24	51	10	7			
		R1,R							R2	R2		R1		
		2												



Tabla 3.70. Muestreo de macroinvertebrados en área de estudio (Continuación)

	Río Ituango	Río San Andrés	Q. Tacui	Q. Santa María	Q. Pená	Río Peque	Q.da Honda	Q. Clara	Q. Rodas	Q. Juan García	Q Barbuda	Río Cauca P. Pescadero	Río Cauca Sabanalarga	Río Cauca P. Occidente
Leptophlebiidae														
Thraulodes	1	19 R1	3		7	12	10	11	8 R2	11 R2	3 R2	R1	3	
Trepides							R2							
Baetidae	20	2 R1	6	1	7	6	5		19		46	4 R1		2
Moribaetis							R2		R2		R2			
Camellobaetidius	68			2	4	4	28	2	60	5	17			
Baetodes	7	47 R1,R2	21	22	29	11		61	93 R2	132 R2	72 R2			
Oligoneuriidae														
Lachlania		R1								R2				
ORDEN ODONATA														
Libellulidae		R1	2				1	1	1		2			
Brechmoroga							1				1			
Orthemis					1									
Gomphidae		R1								R2				
Coenagrionidae		R1								R2				
Argia					1	1								
Calopterygidae														
Hetaerina			6								1			
ORDEN PLECOPTERA														
Perlidae														
Anacroneuria		R1	3	2	3	10		1	1 R2	1 R2	R2			
ORDEN MEGALOPTERA														
Corydalidae														
Corydalus		1 R1,R2	1	2			1	3			R2			
ORDEN HEMIPTERA														
Belostomatidae														
Belostoma		R1								R2				
Naucoridae														
Limnocoris			4								1			
Cryphocricos		R1								R2		R1		
Veliidae														
Microvelia					1	2								
Rhagovelia		R1	1							R2				
Stridulivelia			1											
Gerridae		R1								R2				
Notonectidae														
Notonecta			1											
ORDEN COLEOPTERA														
Familia Elmidae			1							R2				
Elsianus			6		1									
Heterelmis		R1	6	5	7	58	12	7	12 R2	1 R2	2	3		
Cylloepus		R1					R2		R2	R2	R2			
Microcylloepus			1				1							
Stenelmis			3	1		1								
Psephenidae														
Psephenops		R1			1					R2				
Ptilodactylidae														
Anchytarsus		1												



Tabla 3.70. Muestreo de macroinvertebrados en área de estudio (Continuación)

	Río Ituango	Río San Andrés	Q. Tacuí	Q. Santa María	Q. Pená	Río Peque	Q.da Honda	Q. Clara	Q. Rodas	Q. Juan García	Q Barbuda	Río Cauca P. Pescadero	Río Cauca Sabanalarga	Río Cauca P. Occidente
ORDEN TRICHOPTERA														
Calamoceratidae														
Phylloicus			2											
Hydropsychidae														
Leptonema	2	32 R1,R 2	3	5	3	1	11 R2	7	21 R2	21 R2	23 R2	2 R1	4	
Smicridea		R1								R2		R1		
Hydroptilidae														
Ocrothrichia	2		3		5		3	3				1		
Leucotrichia					1			6		1		2		
Leptoceridae														
Nectopsyche	2	1		1	1		1		2	1			2	
Grumichella	2	2			2	11	6		8 R2			R2		
Hydrobiosidae														
Atopsyche		1 R2		1		1		3		1				
Glossosomatidae														
	4	2 R1					1						1 R1	
Helicopsychidae														
Helicopsyche	1	R1									R2			
Philopotamidae														
Chamarra							3							
Wormaldia		R1							R2	R2				
Polycentropodidae														
		R1								R2				
ORDEN LEPIDOPTERA														
Pyrilidae														
		R1	1											
ORDEN DIPTERA														
Chironomidae														
	16	37 R2	11	31	160	40	146 R2	116	192 R2	27 R2	69	4	8	4
Ceratopogonidae														
Alluaudomyia					1	2			5	1	4			
Stilobezzia					4									
Atrichopogon		R2												
Tipulidae														
Tipula		R1												
Molophilus			3		1									
Psychodidae														
Maruina	3	2		4	4	50	25	20	5	4	12			
Psychoda						1								
Clognia					4									
Dolichopodidae														
Aphrosylus					1									
Culicidae														
Simuliidae														
Simulium		11 R1,R 2	3	28	16	16	21 R2	31	61 R2	12 R2	2 R2		4	
Dixidae														
Dixella			3					1						
Empididae														
Hemerodromia				1					1					
Blepharoceridae														
Limonicola										R2				



Tabla 3.70. Muestreo de macroinvertebrados en área de estudio (Continuación)

	Río Ituango	Río San Andrés	Q. Tacui	Q. Santa María	Q. Pená	Río Peque	Q.da Honda	Q. Clara	Q. Rodas	Q. Juan García	Q Barbuda	Río Cauca P. Pescadero	Río Cauca Sabanalarga	Río Cauca P. Occidente
Phylum Mollusca:														
Clase Gastropoda														
ORDEN MESOGASTROPODA														
<i>Pleuroceridae</i>			6											
ORDEN BASOMMATOPHORA														
<i>Lymnaeidae</i>														
Lymnaea										R2				
<i>Physidae</i>														
Physa										R2				
No organismos / estación	131	219	109	114	284	244	388	299	540	231	267	24	19	9
Nº familias / estación	11	12	20	13	18	15	14	16	13	14	14	7	4	4

Nota:: R1: Reportados por Roldán y Cia Ltda, 1981 y por Integral, 1993; R2: Reportados por Integral, 1996.

En ellos se llevaron a cabo muestreos en el Río Cauca y en algunos afluentes, de los cuales coinciden con el estudio actual las estaciones: Pescadero, sobre el Río Cauca; Río San Andrés y Quebradas Honda, Juan García, Barbuda y Rodas. El Río San Andrés se muestreo en los tres estudios, mientras que Río Cauca -Pescadero tiene reportes en los estudios de 1982 y 1993; las otras quebradas sólo fueron muestreadas en el estudio de 1996.

En los estudios mencionados se observa que en el Río San Andrés y en la Quebrada Juan García se registra un número muy significativo de géneros entre 1882 y 1993 (el doble de los registrados en el estudio actual), el cual a su vez supera el número de géneros reportados en 1996, que corresponde a diez géneros en el Río San Andrés y a sólo cuatro géneros en la Quebrada Juan García. En el Río Cauca, en la estación de Pescadero, se registran siete géneros en los estudios de 1982-1993 igualando el número de géneros encontrados en el actual, en tanto que en las quebradas mencionadas, el muestreo actual muestra mejores registros que los obtenidos en 1996.

A pesar de que las condiciones en cada uno de los muestreos pueden ser diferentes y que estos inciden fuertemente sobre los resultados (sitios de muestreo, períodos climáticos), de manera general el estudio de 1996 muestra que la mayoría de los géneros encontrados son indicadores de aguas ligeramente contaminadas y muchos de ellos son abundantes dentro del ecosistema, coincidiendo con las observaciones actuales.

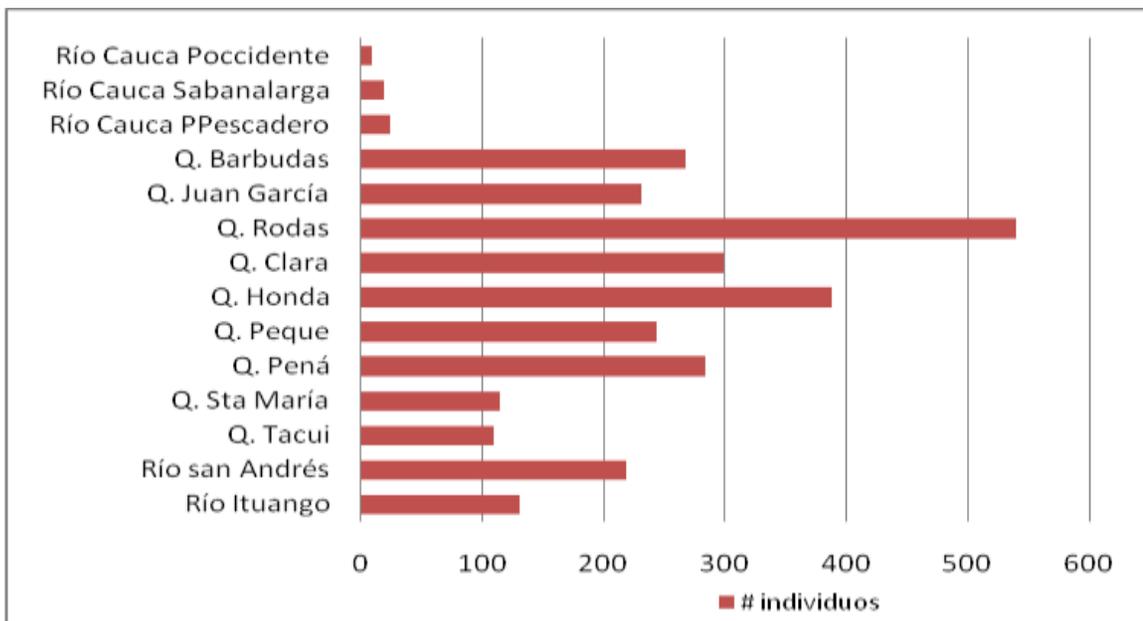
En la Tabla 3.70 se presenta además el listado de los macroinvertebrados encontrados en el estudio actual. En él se registran 44 géneros y 36 familias, las cuales pertenecen a doce órdenes y cuatro Phylum diferentes. Se observa un comportamiento muy semejante en las corrientes en cuanto al número de familias por estación, aunque sobresalen las Quebradas Tacui y Pená, donde se registran 21 y 18 familias respectivamente, contrastando con los otros puntos de muestreo donde se encontraron entre doce y quince.

También puede observarse que el Orden Díptera es el mejor representado, con nueve familias, seguido del Trichoptera con ocho. En el grupo de los Dípteros se registran 1.229 individuos, correspondientes al 43% del total de organismos encontrados, mientras que el

grupo de los Tricópteros está representado por un bajo número de ejemplares, que corresponden al 7,8 % del total de organismos; y aunque los Ephemeroptera agrupan apenas a tres familias, en estos se registran 1.204. Por lo tanto, como se puede observar en la Tabla 3.70, el 42.85% de los individuos registrados pertenece a sólo dos órdenes.

En cuanto a la abundancia de organismos, las estaciones con mayor número de individuos fueron la Quebrada Rodas (540), seguido por las quebradas Honda y Clara, con 388 y 299, respectivamente. A excepción de las estaciones establecidas sobre el Río Cauca, las quebradas con menor abundancia son Tacui y Santa María, como se puede observar en la Figura 3.48.

Figura 3.48. Número total de individuos encontrados en cada estación



Es importante resaltar la baja abundancia de organismos en todas las estaciones del Río Cauca, donde no se superaron los 24 individuos (Puente Pescadero); siendo el caso más claro el de la Estación Liborina, donde el muestreo arrojó un resultado de cero individuos. Este caso especial podría deberse a las condiciones de alta velocidad de la corriente que hacen bastante inestable el sustrato, formado en su mayoría por material de arrastre, lo cual limita de manera importante el establecimiento de los organismos bentónicos.

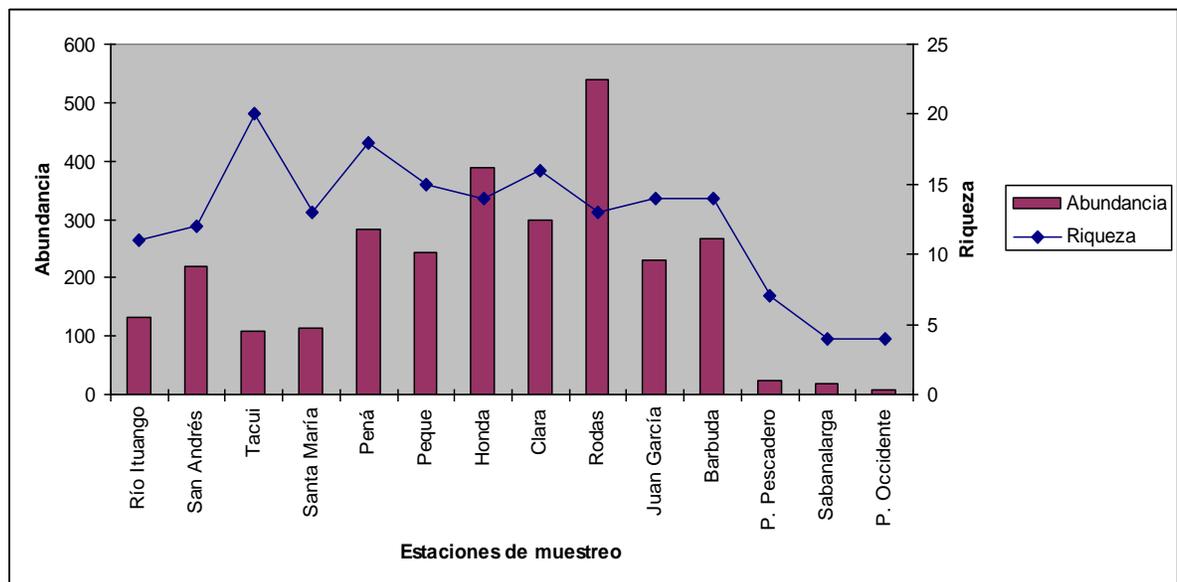
Por otra parte, en aquellos sitios donde el fondo es rocoso no se puede utilizar la draga Ekman y la funcionalidad de la red Surber es bastante limitada, debiéndose muestrear otros sitios donde se registraron pocos organismos. Además, el sustrato se cubre de sedimento fino, que afecta las estructuras respiratorias de una amplia variedad de organismos lo cual se ve confirmado porque la mayor parte de las especies registradas en las estaciones sobre el Río Cauca, corresponden a organismos que se encuentran en

aguas turbias o en lodo y toleran cierto grado de contaminación como las familias *Chironomidae*, *Planariidae*, *Tubificidae*, *Baetidae* e *Hydropsychidae*.

Adicionalmente, las condiciones fisicoquímicas en la estación Río Cauca-Liborina se caracterizan por valores altos de turbiedad y conductividad, bajas concentraciones de oxígeno disuelto y pH por encima del rango establecido en las estaciones de Sabanalarga y Pescadero. No se tiene una razón clara acerca del por qué en la estación Río Cauca-Liborina no se encontró ningún organismo, puesto que las condiciones observadas en este sitio, son básicamente las mismas que en las estaciones de Sabanalarga y en el Puente de Occidente, aunque en ella se encontró una altísima concentración de Hierro (97,29 mg/l), siendo un rango entre 5,0 y 6.0 mg/l indicador de cierto grado de contaminación.

La gran diferencia de riqueza y la abundancia observada entre las estaciones (véase la Figura 3.49), puede estar relacionada con las características de las corrientes, puesto que en algunas se presenta mayor diversidad en el sustrato y un caudal y una corriente moderada, que a su vez posibilitan mayor estabilidad y espacio para el establecimiento de los diferentes organismos.

Figura 3.49. Riqueza y abundancia en el Río Cauca y otras corrientes de la zona de estudio



Las estaciones sobre el Río Cauca, no sólo presentan los valores más bajos de riqueza, sino que también registran la menor densidad poblacional, la menor de todas en el Puente de Occidente, con 33 individuos/m². Esto refleja la existencia de factores de estrés para los organismos como caudales torrenciales y alta concentración de sólidos suspendidos.



No obstante, en las estaciones donde se registra la mayor riqueza, no son aquellas donde hay una mayor abundancia y viceversa, como se observa en la Figura 3.49.

En los histogramas de distribución de abundancia (véase la Figura 3.50) donde se registran únicamente las familias representadas por más de cinco individuos, se aprecia con claridad que en casi todas las estaciones de muestreo el mayor número de organismos pertenece a las familias Baetidae (típicos de aguas de ligera a medianamente contaminadas) y Chironomidae (característicos de aguas con abundante materia orgánica en descomposición).

Figura 3.50. Histogramas de distribución de abundancia en el río Cauca y otras corrientes de la zona de estudio

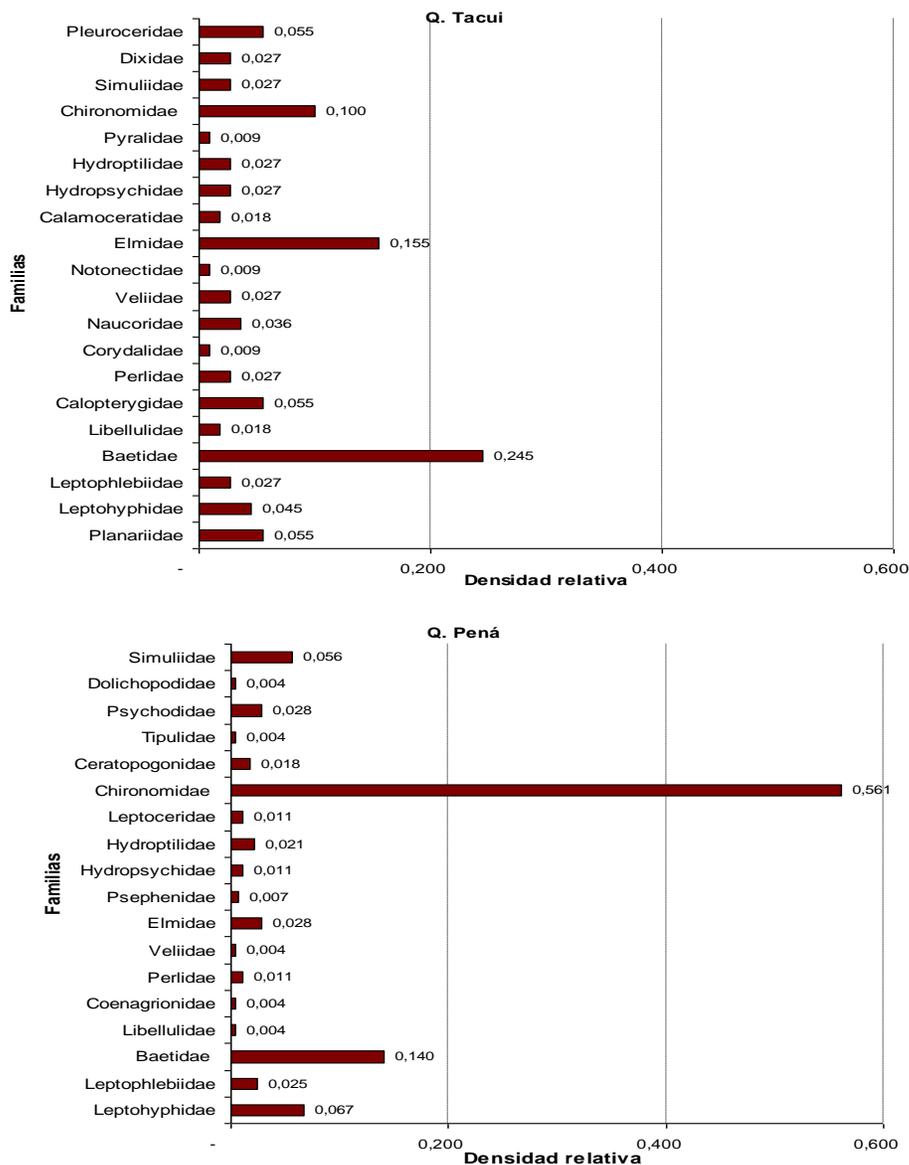


Figura 3.50. Histogramas de distribución de abundancia en el río Cauca y otras corrientes de la zona de estudio (Continuación)

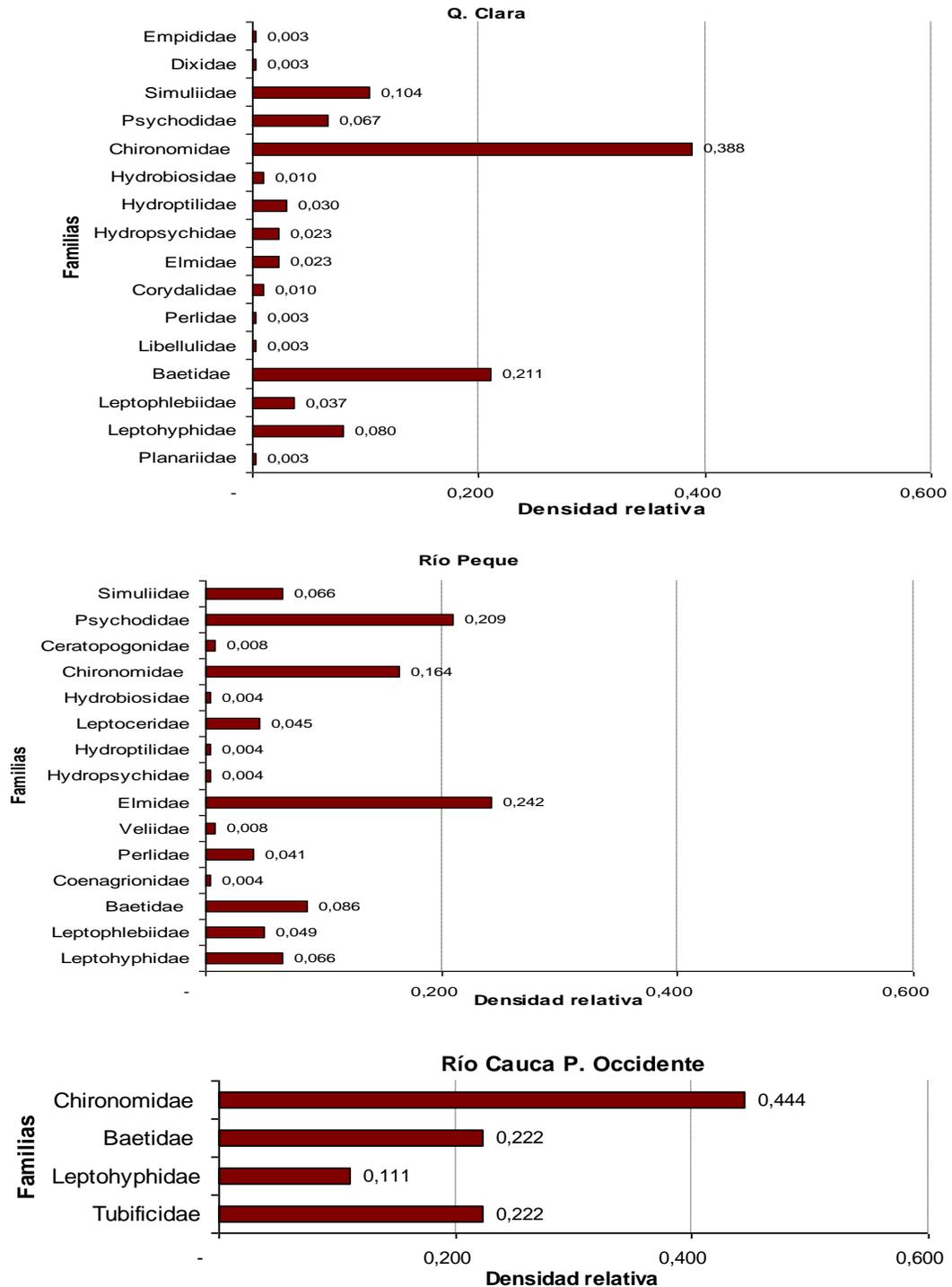




Figura 3.50. Histogramas de distribución de abundancia en el río Cauca y otras corrientes de la zona de estudio (Continuación)

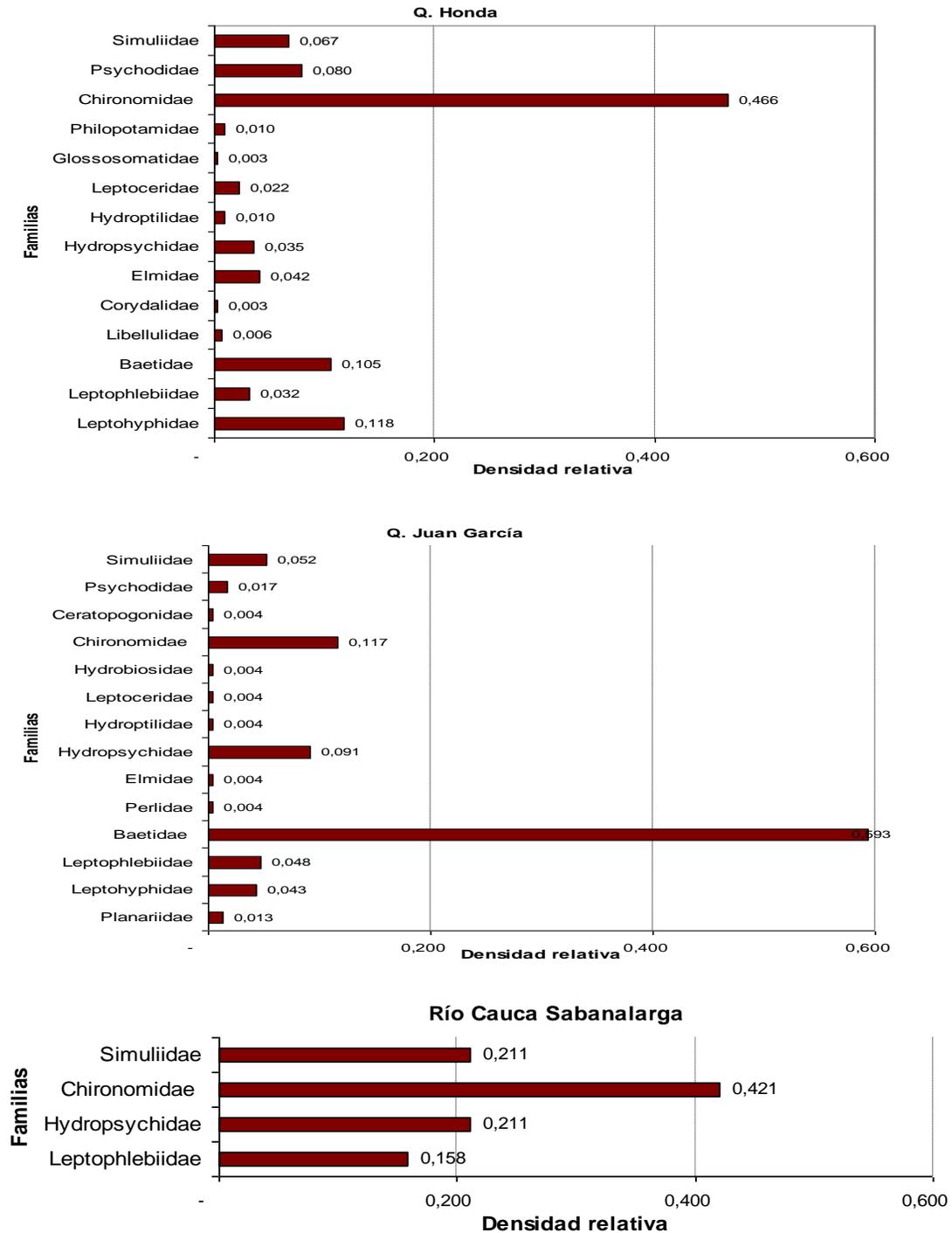




Figura 3.50. Histogramas de distribución de abundancia en el río Cauca y otras corrientes de la zona de estudio (Continuación)

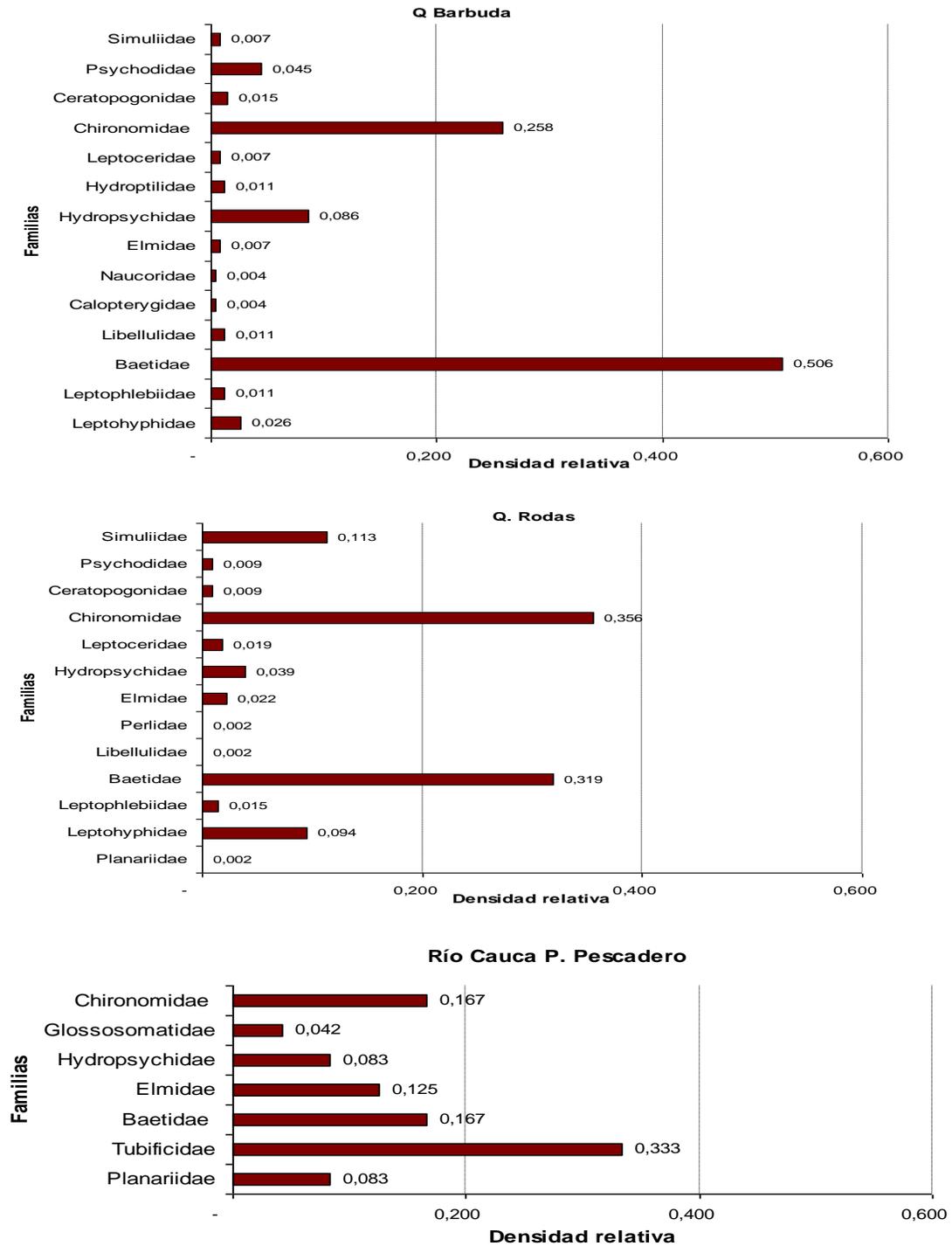
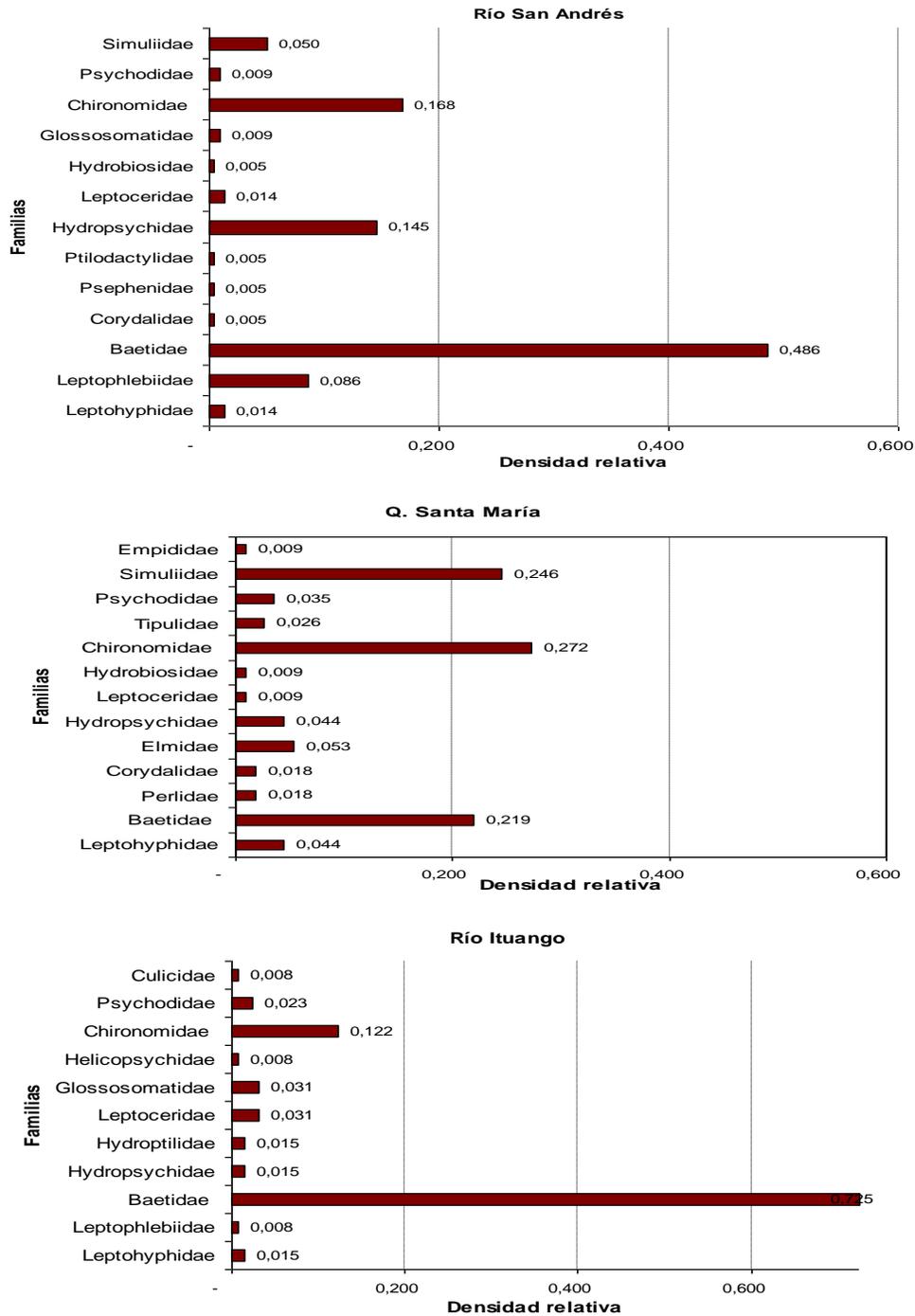




Figura 3.50. Histogramas de distribución de abundancia en el río Cauca y otras corrientes de la zona de estudio (Continuación)





En estos histogramas también se observa que en las estaciones río Cauca-Puente Pescadero y Río Cauca-Sabanalarga, sólo una familia está representada por más de cinco individuos, y en Río Cauca-Puente de Occidente, ninguna familia supera esta cifra. Las familias representadas por un bajo número de organismos no son significativas en la caracterización de un sitio determinado, a pesar de que muchas de ellas son indicadoras de aguas oligomesotróficas o ligeramente contaminadas.

De manera general puede decirse, a partir del índice de diversidad de Shannon y del índice de calidad BMWP, que las corrientes de la zona de estudio presentan aguas limpias a medianamente contaminadas, a excepción de las estaciones de Río Cauca-Sabanalarga y Río Cauca-Puente de Occidente, las cuales presentan aguas muy contaminadas, como se puede observar en la Tabla 3.71 y en la Tabla 3.72.

Tabla 3.71. Índice de calidad BMWP para el Río Cauca y otras corrientes

Estación	Valor de BMWP	Calidad	Significado
Río Ituango	71	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas
Río San Andrés	87	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas
Quebrada Tacui	133	Buena	Aguas muy limpias
Quebrada Santa María	81	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas
Quebrada Peña	119	Buena	Aguas muy limpias
Río Peque	105	Buena	Aguas muy limpias
Quebrada Honda	108	Buena	Aguas muy limpias
Quebrada Clara	103	Buena	Aguas muy limpias
Quebrada Rodas	87	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas

Estación	Valor de BMWP	Calidad	Significado
Quebrada Juan García	97	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas
Quebrada Barbuda	91	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas
Río Cauca en Puente Pescadero	45	Dudosa	Aguas moderadamente contaminadas
Río Cauca en Sabanalarga	26	Crítica	Aguas muy contaminadas
Río Cauca en Puente de Occidente	17	Crítica	Aguas muy contaminadas

La mejor calidad de agua en el área de estudio se encuentra en la Quebrada Tacui, donde se registra la mayor riqueza, y consecuentemente el más alto índice de diversidad, seguida por el Río Peque. En contraste, y como era de esperar, la equidad presenta valores más altos en estaciones con baja diversidad.

Por su parte, los índices de dominancia de Simpson y de Berger Parker alcanzan valores altos para el Río Ituango y la Quebrada Juan García, donde la familia Baetidae domina sobre las otras, con 73% en el caso del primero y 59% en el segundo (véase Tabla 3.72). Esta misma familia, propia de aguas de ligera a medianamente contaminadas, predomina en el Río San Andrés y la Quebrada Barbuda, con 49% y 51%, respectivamente. Debido a esta característica de composición poblacional observada, en estas corrientes la equidad es cercana a cero, con índices de diversidad y riqueza menores que las Quebradas Tacui y Peque.

Tabla 3.72. Atributos de la comunidad de macroinvertebrados

Estación	Densidad (# ind/m ²)	Riqueza (S)	Riqueza de Margalef	Índice de Shannon-Wiener	Índice de Simpson (Ds)	Berguer Parker (d)	Índice de Pielou (J')	Equidad E5	Números de Hill	
									N ₁	N ₂
Río Ituango	485	11	2,05	1,09	0,54	0,73	2,62	0,423	2,98	1,84
Río San Andrés	811	12	2,04	1,55	0,30	0,49	3,84	0,635	4,69	3,34
Quebrada Tacui	404	20	4,05	2,39	0,11	0,25	7,16	0,783	10,92	8,77
Quebrada Santa María	422	13	2,53	1,94	0,19	0,27	4,98	0,705	6,97	5,21
Quebrada Pená	1.052	18	3,01	1,65	0,35	0,56	4,77	0,445	5,21	2,87
Río Peque	904	15	2,55	2,12	0,15	0,24	5,75	0,764	8,36	6,62
Quebrada Honda	1.437	14	2,18	1,80	0,24	0,38	4,74	0,636	6,03	4,20
Quebrada Clara	1.107	16	2,63	1,90	0,22	0,39	5,28	0,621	6,71	4,55
Quebrada Rodas	2.000	13	1,91	1,67	0,25	0,36	4,28	0,688	5,31	3,97
Quebrada Juan García	855	14	2,39	1,48	0,38	0,59	3,91	0,478	4,40	2,62
Quebrada Barbuda	989	14	2,33	1,51	0,33	0,51	3,98	0,570	4,51	3,00
Río Cauca P. Pescadero	89	7	1,89	1,77	0,20	0,33	3,44	0,832	5,87	5,05
Río Cauca Sabanalarga	70	4	1,02	1,31	0,29	0,42	1,82	0,898	3,71	3,44
Río Cauca P. Occidente	33	4	1,37	1,27	0,31	0,44	1,76	0,870	3,57	3,24



Observando las características locales del lecho en los sitios de muestreo así como los resultados de los análisis fisicoquímicos puede pensarse que en estos ecosistemas existen factores que favorecen el establecimiento de algunos organismos y su proliferación, y la desaparición de otros más vulnerables a los cambios ambientales, tales como la mayor velocidad de la corriente, o cambios en las características fisicoquímicas del medio constituidas por factores como la turbiedad, temperatura, gases como oxígeno y dióxido de carbono; alcalinidad, pH, conductividad, sólidos disueltos, la dureza (definida por la cantidad de iones de calcio y magnesio y en general iones como carbonatos), sulfatos, aniones (como los cloruros) y cationes (como sodio y potasio), el hierro, el fósforo y el nitrógeno que son los dos elementos más importantes para la productividad primaria en los ecosistemas acuáticos, entre otros.

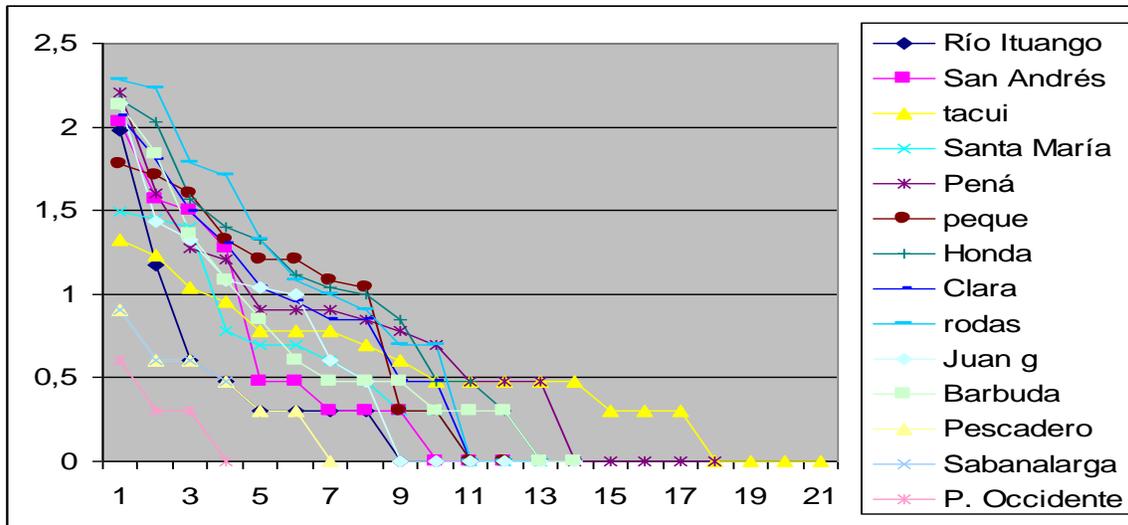
De otro lado, en la Quebrada Pená también se observan valores significativos en los índices de Simpson y de Berger Parker, con dominancia de la familia Chironomidae (56%), aunque se presenta una buena riqueza de especies, puesto que la equidad (E5) se ve afectada levemente por la riqueza de las especies.

En las estaciones del Río Cauca se observan valores más significativos en el índice de diversidad, así como menores valores de dominancia de Simpson y en el índice de Berger Parker, debido a que el bajo número de familias registradas presentan una distribución más equitativa dentro de la comunidad (véanse valores de equidad cercanos a uno). Sin embargo, y el número de organismos encontrados durante los muestreos en estas estaciones no son suficientemente representativos como para definir el estado de esta corriente a través de ellos.

Los números de Hill, N_1 y N_2 , representan las familias abundantes y muy abundantes de cada comunidad; a través de ellos se resaltan nuevamente la Quebrada Tacui y el Río Peque, como las corrientes donde se registra el mayor número de estas familias. Por lo tanto, son estas corrientes las que presentan una distribución más equitativa de familias, por ejemplo, en la Quebrada Tacui el 44% de las familias son muy abundantes y el 55% son abundantes y en el Río Peque el 44% de las familias son muy abundantes y el 56% son abundantes. Por lo tanto, se corrobora con estos resultados que estos sitios son los más diversos. En contraste, los valores bajos de N_1 y N_2 se registran en el Río Ituango y en las estaciones de Sabanalarga y el Puente de Occidente sobre el Río Cauca, indicando la dominancia de pocas familias.

En la **Figura 3.51** se representa, a través del logaritmo de las abundancias, la distribución de las diferentes corrientes; en ella se observa una distribución más equitativa de los organismos encontrados en la Quebrada Tacui y el Río Peque, mientras que en el Río Ituango y en el Río San Andrés se observan familias que predominan y otras corrientes como la Quebrada Pená y la Quebrada Juan García, donde las familias están representadas por un número muy bajo de organismos. También se destacan las estaciones Río Cauca-Sabanalarga y Río Cauca-Puente Pescadero, por la baja abundancia de los organismos y por la distribución similar.

Figura 3.51 Logaritmo de la abundancia de las familias de macroinvertebrados en las estaciones de muestreo



Considerando los resultados obtenidos, es importante resaltar que la Quebrada Tacui presenta características que la hacen diferente a las otras corrientes muestreadas, como: menor caudal, flujo suave, cuenca de reducida extensión y que no recibe vertimientos, aunque se ve afectada por la deforestación; mientras que las otras corrientes consideradas en este estudio reciben vertimientos de poblaciones o viviendas aledañas y todos están afectados por la deforestación de sus riberas en los sitios de muestreo.

• **Conclusiones**

A pesar de que las condiciones de muestreos, los sitios determinados para las estaciones y los períodos climáticos en que se tomaron las muestras pueden ser diferentes, los resultados obtenidos en estudios anteriores son muy semejantes a los actuales.

Las corrientes estudiadas presentan un comportamiento muy semejante en cuanto al número de familias registradas por estación, aunque sobresalen en número las quebradas Tacui y Pená.

El Orden Díptera fue el más representativo en las muestras analizadas, presentando el mayor número de familias y de individuos y aunque los Efemerópteros registraron un bajo número de familias, también estuvieron representados por un número bastante representativo de individuos.

Las estaciones donde se encontró el mayor número de individuos fueron la quebrada Rodas, Honda y Clara en su orden respectivo.

Las quebradas con menor abundancia son Tacui y Santa María, a excepción de las estaciones establecidas sobre el Río Cauca donde la abundancia es demasiado baja.



La baja abundancia de organismos registrados en las estaciones establecidas sobre el Río Cauca; así como bajos valores de riqueza y densidad poblacional pueden estar relacionados con la presencia de factores de estrés para los organismos como caudales torrenciales y alta concentración de sólidos suspendidos.

En la estación de Liborina sobre el Río Cauca no se encontró ningún organismo debido probablemente a la altísima concentración de hierro registrada en esta estación, la cual puede estar indicando una alta contaminación en este lugar.

En casi todas las estaciones de muestreo la mayoría de los organismos pertenecen a las familias Baetidae y Chironomidae, los primeros propios de aguas de ligera a medianamente contaminadas y los otros habitan aguas con abundante materia orgánica en descomposición.

A través del índice de diversidad de Shannon y del índice de calidad BMWP, puede decirse que las corrientes de la zona de estudio presentan aguas de limpias a medianamente contaminadas, a excepción de las estaciones de Sabanalarga y el Puente de Occidente sobre el Río Cauca, las cuales presentan aguas muy contaminadas.

La mejor calidad de agua en el área de estudio se encuentra en la quebrada Tacui y el río Peque, puesto que presentan la mayor riqueza, y consecuentemente el más alto índice de diversidad. Además, el valor de la equidad refleja que las familias registradas en estas corrientes comparten abundancias similares o cercanas a uno.

En el Río Ituango y en la quebrada Juan García se registran los mayores valores en el índice de dominancia de Simpson y de Berger Parker, puesto que en ellos es clara la dominancia de la familia Baetidae habitante de aguas de ligera a medianamente contaminadas. Además, esta dominancia puede significar la existencia de factores que favorecen el establecimiento de algunos organismos y su proliferación, y la desaparición de otros más vulnerables a los cambios ambientales.

Los bajos índices de dominancia y en el índice de Berger Parker encontrados en las estaciones sobre el Río Cauca se deben a que las familias registradas presentan una distribución equitativa dentro de la comunidad. Sin embargo, los organismos recolectados en estas estaciones no son suficientemente representativos como para definir el estado de esta corriente.

A través de los números de Hill se corroboran la quebrada Tacui y el río Peque como los más diversos, puesto que en ellas un número importante de especies son abundantes o muy abundantes y no hay dominancia de solo una de ellas.

3.11 USOS DEL AGUA

En la Tabla 3.73 se detallan las concesiones de agua otorgadas por la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia –Corantioquia- en el área de estudio del proyecto hidroeléctrico Ituango.



Tabla 3.73. Concesiones existentes en los municipios del área de estudio

Municipio	Número expediente	Ubicación	Usuario	Uso	Fuente	Q (L/s)
Ituango	TH-1-03-4	Vereda Los Galgos	Municipio	doméstico	Sin nombre	0,055
	TH-1-03-7	Vereda Cortaderal	Municipio	doméstico	Sin nombre	0,048
	TH-1-03-123	Vereda Cortaderal	William de Jesús Sucerquia Arango	doméstico y pecuario	dos nacimientos de la microcuenca	0,793
	TH-1-03-25	Vereda La Honda	Municipio	doméstico	Qda Arenales	0,2
Buriticá	HX1-02199	Corregimiento La Angelina, Vereda la cabecera del llano, El Palmar	Juan de Dios Lezcano Miranda	aguas para uso doméstico, agrícola y pecuario	Qda Guaba	0,987
Sabanalarga	HX1-03-139	Vereda Remartín	J.A.C Vereda Remartín	aguas para uso doméstico, agrícola y pecuario	Qda El Chochito	2,103
	HX1-03-138	Vereda Nohavá	J.A.C Vereda Nohavá	aguas para uso doméstico y agrícola	Qda Marín	1,003
	HX1-03-166	Vereda Membrillal	J.A.C Vereda Membrillal	aguas para uso doméstico	Sin dato	Sin dato
	1-96172	Vereda El Junco	ASOJUNCO / asociación de usuarios distrito adecuación de tierras el junco INAT	aguas para uso agrícola y riego	Qda El Junco y La Pena	65
Liborina	HX1-05-120	La Granja El retorno, Corregimiento La Honda, Vereda Rodas	John Henry Roldán Sepúlveda	aguas para uso domestico	Qda El retorno y Qda Rodas	0,066 El retorno 2,473 Rodas
	HX1-05-205	Vereda La Honda	JAC Corregimiento La Honda	aguas para uso domestico	Qda San Miguel	3,214
	I-4129	Vereda La Honda	J.A.C. Vereda La Honda	aguas para uso domestico	Sin dato	Sin dato



Tabla 3.73. Concesiones existentes en los municipios del área de estudio (Continuación)

Municipio	Número expediente	Ubicación		Usuario	Uso	Fuente	Q (L/s)
Olaya	HX1-995	Vereda Pencil	El	J.A.C. Vereda El Pencil	doméstico	Qda. El Chorrillo Qda. La Cejita Qda. La Viejita	8,678
	HX1-04-45	Corregimiento Sucre		Miguel Ángel Restrepo Múnera	aguas para uso doméstico, pecuario y agrícola	Qda. Calera o Guaba	3,581
	I-5082	Corregimiento Sucre		Luis Carlos Jiménez y Carlos Alberto Restrepo	aguas para uso pecuario y agrícola	Qda. Tahami	1,4
	1-9687	Corregimiento Sucre		Asociación de usuarios del distrito de adecuación de tierras en pequeña escala – Asotahami	Distrito de Riego para uso agrícola	Qda Tahami	11
	1-96143	Corregimiento Sucre		J.A.C. Corregimiento Sucre	Distrito de Riego para uso agrícola	Qda Tahami	1,767
	I-5307	Vereda Guayabo	El	J.A.C. Vereda El Guayabo	aguas para uso doméstico y agrícola	Qda La Barbuda	2,5
	HX1-02153	Vereda Quebrada Seca-Aguas Lindas		Maria Luisa Franco de Saldarriaga	aguas para uso doméstico, pecuario y agrícola	Qda. seca	0,988
	HX1-02166	Vereda Quebrada Seca- Los Mamoncillos		José María Gómez C	aguas para uso agrícola y pecuario	Qda. seca	0,392
	I-3488	Vereda Quebrada Seca- Sucre		J.A.C. Vereda Quebrada Seca	aguas para uso doméstico	Qda. seca	2,3

Los registros fueron suministrados por las oficinas territoriales Tahamíes para los municipios de Ituango, Briceño, Toledo y San Andrés de Cuerquia y Hevéxicos para los municipios de Buriticá, Sabanalarga, Liborina y Olaya. Resalta el hecho que en los municipios de Briceño, Toledo y San Andrés de Cuerquia no existe ninguna concesión legalizada.

En la Tabla 3.74 se identifican las fuentes y los usos de agua que se da en las localidades de la zona de estudio; esta información hace parte de la caracterización de la dimensión social de este estudio, y está registrada en las fichas veredales levantadas en la zona de influencia local directa.



Tabla 3.74 Usos del agua en la zona de influencia

Municipio	Localidad Vereda/ Corregimiento	Fuente	Uso	
Ituango	Pascüital	La cañada de los Chorros	acueducto veredal	
		Nacimiento de la vereda	animales y riego	
	La Honda	Cortadera, El Palmar, La Pená	bebederos de ganado	
		Río Cauca	pesca, bebederos, barequeo	
Briceño	Los Galgos	Nacimiento Honda	riego de cultivos	
		Quebrada de Singo	bebedero de ganados	
	Los Naranjos	Río Ituango	consumo humano	
		Río Cauca	pesca y minería	
	Alto del Chiri	La Batea	ninguno	
		Quebrada del Chiri	consumo humano	
	Berlín – Pueblo Nuevo	Río Cauca	Careperro	consumo humano
			Nacimiento el Oso	toma de acueducto
		Quebrada San Pedro	Cañada La Cuelga	consumo humano
			Cañada La Cuelga	toma de acueducto
La Calera	Quebrada del Convento	consumo finca El Convento		
	Quebrada El Pescado	consumo humano		
La Mina	Quebrada La Guinea	Quebrada La Guinea	toma de acueducto	
		Quebrada El Juez	ninguno	
	Quebrada La Mina	Quebrada La Mina	acueducto, consumo humano	
		Quebrada de Quica	consumo humano	
Moravia	Quebrada Socabones	Quebrada Socabones	ninguno	
		Quebrada Espíritu Santo	consumo humano	
	Otras cañadas	Otras cañadas	consumo, animales, moliendas	
		Quebrada Orejón	Quebrada Orejón	Cuando se llama Orejón se han juntado varias cañadas y de cada una se toma las aguas para cada casa
Toledo	Pescado	Quebrada Chiri	consumo humano	
		Quebrada El Juez	consumo humano	
	Barrancas	Quebradas Tomas de Agua	consumo humano	
		Quebrada La Alcantarilla	consumo humano	
	Brugo	Quebrada La Majula	consumo humano	
		Cañada Roque	acueducto	
		Quebrada La Uriaga	consumo humano	
		Quebrada La Santamaría	animales	
	Cascarela	Río Cauca	Río Cauca	pesca, barequeo, bebederos
			Quebrada La Honda	consumo, riego y animales
Quebrada El Bique		Quebrada El Bique	animales y consumo	
		Río Cauca	consumo humano	
El Valle	Nacimientos en toda la vereda	Nacimientos en toda la vereda	consumo humano	
		Quebrada la Uriaga	consumo, riego y animales	
		La Máfolá	consumo humano	
	Miraflores	Río San Andrés	consumo humano	
		Río Cauca	consumo humano	
		Quebrada La Majula	ninguno	
Miraflores	Quebrada Taque	Quebrada Taque	ninguno	
		Nacimiento de agua la Rendija	acueducto veredal	



Tabla 3.74 Usos del agua en la zona de influencia (Continuación)

Municipio	Localidad Vereda/ Corregimiento	Fuente	Uso
San Andrés de Cuerquia	Alto Seco	Quebrada del Indio, Quebrada Loma Grande,	consumo humano
		Quebrada el Guadual, Quebrada la Chorrera, quebrada la Honda,	consumo humano
	Cañaduzales	Quebrada El Pílon	toma de acueducto
		Quebrada La Redonda	trapiche
		Río San Andrés	bebederos
		Quebrada Cañada Honda	agua para dos casas de la parte alta
	El Bujío	Quebrada Cañaduzales	acueducto veredal
		Otras cañadas, aguas muy buenas	consumo humano y animales
		Quebrada La Honda	ninguno
	El Cántaro	Río San Andrés	bebederos, pesca, baño
		Cañada	beneficia dos casas
	El Roble – El Barro	Nacimientos de aguas propias	acueducto de 13 viviendas
		Quebrada Taque	consumo humano
	Loma Grande	Quebrada la Chorrera	ninguno
		Quebrada Cañaduzales	ninguno
	Santa Gertrudis	Quebrada el Peñol (límite veredal)	ninguno
		Quebrada La Cabaña	consumo humano
Quebrada El Chorrón		acueducto de la vereda	
Buriticá	Angelina	Quebrada El Chachafruto	actividades agropecuarias
		Quebrada El Potrero	consumo humano
		Cañada del Salto	consumo humano
		Cañada Membrillal	consumo humano
		Cañada Palmar	acueducto
Sabanalarga	Membrillal	Cañada La Peña del Loro	consumo humano
		Río Cauca	minería de aluvi3n, pesca
		Quebrada Niquía	materiales, arena, piedra. riego
	El Junco	Quebrada La FE	materiales, toma de agua, consumo la Barranca, surte a Membrillal
		Quebrada Chontaduro	consumo humano
		Quebrada el Orito, La cueva	consumo, nacimiento el Jague
		Quebrada el Junco	consumo, riego y animales
Vereda Nohavá	Quebrada Pená	riego y animales	
	El Chocho	consumo vereda Remartín	
Vereda de Remartín	El Marín	consumo, riego y animales	
	Quebrada Nohavá, quebrada Remartín	consumo humano	
	Quebrada El Palmar	ganado	
Sabanalarga (cont)	Vereda San Crist3bal - Pená	Quebrado El Hur3n	ganado
		Río Cauca	minería, ganado, pesca
		Quebrada La Linda	agua municipal y veredal, riego, pesca y la minería
		Río Cauca	pesca y Minería
		Quebrada San Pedro	consumo humano
	Nacimiento	consumo en la vereda y La Ermita	



Tabla 3.74 Usos del agua en la zona de influencia (Continuación)

Municipio	Localidad Vereda/ Corregimiento	Fuente	Uso
Liborina	La Honda	Quebrada la Pedrona	consumo Barrio Nuevo, riego y animales
		Quebrada Pená	Consumo, riego y animales
	Vereda Rodas	Quebrada Rodas	consumo humano
		Quebrada Guasimal	consumo humano
Olaya	Sucre	Quebrada El Balsal	consumo humano
		Quebrada Tahamí	consumo humano y riego
		Río Cauca	pesca, materiales de playa
	El Guayabo	La Cascada (Quebrada Tahamí)	turístico
		Quebrada La Bocatoma	consumo humano
		Quebrada la Barbua	riego y animales
		El Pozo	consumo humano
	La Florida y Quebrada Seca. Corregimiento de Sucre	Quebrada Tahamí	acueducto de Sucre
		Nacimiento de Llanadas	acueducto veredal
		Río Cauca	riego y energía
		Quebrada Tahamí	consumo de viviendas

En la Tabla 3.75 se retoman los cuerpos de agua caracterizados y se identifican los principales usos de cada fuente.

Tabla 3.75. Principales usos de las fuentes de agua en la zona

Cuerpo de agua	Aguas Residuales Domésticas	Agropecuario	Minería y extracción de materiales de playa
Río Cauca - Puente Pescadero	X		X
Quebrada Tacui		X	
Río Ituango	X	X	
Río San Andrés	X	X	
Quebrada Santamaría	X	X	
Quebrada Peque	X	X	
Quebrada La Pená	X	X	
Río Cauca - Sabanalarga	X	X	
Quebrada Rodas		X	X
Río Cauca Liborina			X
Quebrada Juan García	X	X	
Quebrada La Honda	X	X	
Quebrada Clara		X	
Quebrada La Barbuda	X		X
Río Cauca Puente de Occidente	X		



3.12 ATMÓSFERA

3.12.1 Clima

El clima constituye el conjunto de condiciones de la atmósfera, que caracterizan el estado o situación del tiempo atmosférico y su evolución en un lugar dado. El clima se determina por el análisis espacio tiempo de los elementos que lo definen y los factores que lo afectan.

Entre los elementos del clima se tienen precipitación, temperatura, humedad, brillo solar, vientos, entre otros; los dos primeros son los más importantes, porque permiten definir, clasificar y zonificar el clima de una región dada; en tanto que los otros se presentan como atributos caracterizadores de las unidades ya definidas. Los factores como: pendiente, altitud, formas del relieve, generan cambios climáticos a escala regional o local, mientras que la cobertura vegetal es causa y efecto del clima tanto como su indicador.

Las condiciones fisiográficas del paisaje o el relieve son un factor determinante de las condiciones climáticas, pues a medida que se gana altura sobre el nivel del mar, varía la precipitación y disminuye gradualmente la temperatura, por variaciones en el efecto de la radiación solar y la pérdida de humedad de las masas de aire ante el obstáculo de las montañas, principalmente. La caracterización climática del área de influencia, se hará por medio de información secundaria, debido, principalmente a la falta de estaciones climatológicas en la zona.

En general, el clima de la región del proyecto responde a las condiciones de su localización dentro de la Zona Tórrida, con amplia dependencia en el curso seguido por el Frente Intertropical de Convergencia (FIC), que se manifiesta en dos estaciones lluviosas y dos estaciones secas- desde diciembre a marzo y desde mediados de junio hasta agosto.

En el área de estudio, el río Cauca corre con rumbo norte, desde aguas arriba de Santa Fe de Antioquia hasta el sitio de las obras del proyecto, donde toma rumbo Noreste, prácticamente hasta su desembocadura en el Río Magdalena. La cuenca del Río Cauca aguas abajo del sitio de presa, es la zona del departamento de Antioquia que registra las mayores precipitaciones, con valores que puedan alcanzar los 5000 mm/año, y que superan, casi en un 100%, las precipitaciones anuales de la cuenca el Río Cauca en otras zonas del país²⁴.

De acuerdo con la información secundaria recopilada, la descripción climática de la zona de influencia del proyecto se puede dividir en dos zonas así:

²⁴ INTEGRAL, AGRA Monenco Inc. Proyecto Hidroeléctrico Pescadero-Ituango Estudios para la actualización de la factibilidad. Informe Final. Volumen 1, mayo 1999.



- **Zona 1**

Corresponde a los municipios de Buriticá, Peque, Olaya, Sabanalarga, y Liborina, localizados sobre el cañón del Río Cauca que se caracteriza por sus elevadas temperaturas, superiores a 25° C, y por su escasa precipitación, especialmente en la zona central, como consecuencia de la barrera formada por la Cordillera Occidental que impide que los vientos cargados de humedad provenientes del Pacífico, influyeran en la región. Al ascender desde el cañón del Cauca, a alturas entre 1.000 y 1.800 msnm el clima va cambiando gradualmente hacia formaciones más húmedas, las precipitaciones promedio están entre 1.000 y 2.000 mm anuales; la temperatura tiene como límite superior 24° C.

Buriticá, conjuntamente con Caicedo, entre todos los de la región del occidente antioqueño, son los municipios con mayores zonas de páramo sobre la Cordillera Occidental, debido principalmente a la presencia de bosque muy húmedo montano (bmh-M) a alturas sobre los 2.900-2.800 msnm y con precipitaciones entre 1.700 y 2.000 mm²⁵.

- **Viento**

En general en la parte lindante con el cañón del Río Cauca se presentan difíciles condiciones de acceso y circulación de los vientos debido al estrechamiento del cañón y su baja altura sobre el nivel del mar.

Los vientos de mayor intensidad se presentan en el Municipio de Buriticá en los meses de febrero, junio, septiembre y noviembre.

- **Brillo solar**

En general la distribución espacial del brillo solar se rige principalmente por las características del relieve, es decir, disminuye con la altura (su gradiente vertical es negativo).

Dos isohelias, de 1800 horas de brillo solar anual, cruzan el Municipio de Buriticá en dirección aproximada S-N. Una de ellas atraviesa la cuenca de la Quebrada Juan García, y la otra encierra un sector al NE del territorio municipal, observándose que la magnitud del brillo solar disminuye hacia el NE, pero aumenta, hasta unas 2.000 horas /año, hacia el SE.²⁶

- **Precipitación**

En términos generales, los meses más secos del año son enero, febrero, marzo, diciembre, siendo enero el más seco y diciembre el menos seco. Como meses más

²⁵ CORANTIOQUIA, Plan de Gestión Ambiental Regional, 1998-2006-, Pág. 120

²⁶ Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Buriticá. Secretaría de Planeación municipal.

lluviosos se ubican mayo-octubre y noviembre, excepto abril en el piso térmico cálido, en la parte norte.

Para el análisis del clima se tuvieron en cuenta los datos de las estaciones Sabanalarga y El Oro, tales como: Precipitación y precipitación máxima 24 horas. Con base en éstos se elaboraron las gráficas considerando la variación mensual promedio (multianual), y el valor anual (promedio, máximo o total); desde 1975 hasta 1998, para Sabanalarga, y desde 1975 hasta 1993, para El Oro²⁷.

- **Precipitación (Estación Sabanalarga)**

La precipitación no es constante, presentando altibajos tanto en los promedios anuales como en los mensuales, y sin evidencia alguna de recurrencia (véase la Tabla 3.76).

El año con mayor precipitación es 1981, con 2.084 mm, en tanto que el año con menor precipitación es 1990, con 989,5 mm. De los 24 años considerados, dos tienen una precipitación menor de 1.000 mm, 21 están entre los 1.001 y 2.000 mm, y tan sólo uno está por encima de los 2.000.

De la precipitación mensual promedio, se puede decir que el mes con mayor precipitación es mayo, con 179,1 mm; el mes con menor precipitación es enero, con 24,3 mm y que, de los valores registrados mensualmente, sólo tres están por debajo de 100 mm.

- **Precipitación Máxima 24 Horas (Estación Sabanalarga)**

La precipitación máxima anual (máximo valor) (véase la Tabla 3.77), presenta variaciones muy amplias y aleatorias, sin recurrencia en el comportamiento de máximos ni de mínimos. Se observa que el año 1995 tiene la mayor precipitación máxima, con 90 mm, en tanto que el año con menor precipitación máxima es 1983, con 35,2 mm.

- **Precipitación (Estación El Oro)**

El valor anual presenta magnitudes muy diferentes, sin guardar una relación entre sí (rata de crecimiento o decrecimiento) (véase la Tabla 3.78). Los datos normalmente se encuentran concentrados, aunque hay algunos muy distantes como ocurre con los de 1982 (942), y 1992 (588). El año de máxima precipitación es 1975, con 2220 mm; el año de mínima precipitación es 1992, con 588 mm.

De la precipitación promedio mensual, se tiene que el mes de máxima precipitación es Octubre, con 283,4 mm, mientras que el mes de mínima precipitación es enero, con 21,5 mm.

²⁷ Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Sabanalarga. 1999. Secretaría de Planeación municipal.

Tabla 3.76. Valores totales mensuales de precipitación Estación Sabanalarga

28 I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - S. I. N.A
 VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACION (mms)
 FECHA DE PROCESO : 981211 ESTACION : 2623020 SABANALARGA
 LATITUD 0651 N TIPO EST PG DEPTO. ANTIOQUIA FECHA-INSTALACION 1975-MAR
 LONGITUD 7549 W ENTIDAD 01 IDEAM MUNICIPIO SABANALARGA FECHA-SUSPENSION
 ELEVACION 1000 m.s.n.m REGIONAL 01 ANTIOQUIA CORRIENTE CAUCA

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR.ANUAL
1975	0	0	0	147	197	160	260	305	178	228	205	137	1817
1976	48	6	38	158	188	122	84	142	50	207	127	37	1207
1977	0	72	65	89	141	266	136	121	110	182	176	12	1370
1978	23	41	200	167	167	187	133	127	232	117	62	104	1560
1979	22	57	52	179	144	99	129	164	76	166	118	35	1241
1980	19	0	31	122	213	209	116	129	209	137	110	88	1383
1981	0	23	105	263	268	277	213	261	173	205	183	113	2084
1982	72	59	73	306	192	188	113	85.2	210.5	265.3	47.6	17	1628.6
1983	9.1	29.2	81.6	176.5	187.9	131.8	118.8	126.9	165.4	91.7	81.5	76.1	1276.5
1984	19.5	67.7	26.5	125.3	155.5	150.3	191.9	173.9	209.7	202.4	157	21	1500.7
1985	1	19	56.2	62	158.2	146.9	96.7	196.9	159.2	83.2	97.4	20.6	1097.3
1986	15.4	31.4	26.4	86	190.7	220.9	54.7	98.9	102.7	256.7	39.7	25.7	1149.2
1987	35.7	71.7	66.4	103	166.5	109.3	202.3	96	156.8	308.4	60.6	22.7	1399.4
1988	14.6	17.2	3.4	104.1	154.9	150.8	127.3	156.9	0	154.3	142.1	112.7	1138.3
1989	0	29.1	44	137	189	244	57	222	141	144	164	25	1396.1
1990	44	34	59	111	163	97	147	35	118	0	91	40.5	939.5
1991	21.8	1.3	66.9	82	187.7	85.5	132.5	33	74.3	149.6	144.3	7.1	986
1992	7.3	15	48	92	154	114	79	113	218	146.2	127.6	49	1163.1
1993	40.5	9.8	123	128.7	105	123	127.4	67	182	147	210	61	1324.4
1994	35	46	99	221	107	132	58	209	105	239	176	36	1463
1995	38	0	40	160	194	153	242	136	123	191	68	85	1430
1996	15	52	127	102	205	188	156	142	221	144	142	84	1578
1997	20	97	43	80	113	205	14	9	197	180	147	3	1108
1998	33	57	108	170	243	158	226	209	272	175	0	0	1651
MEDIOS	24.3	36.3	68.8	140.5	174.4	163.2	133.9	139.9	160.2	179.1	125.1	52.7	1398.4
MAXIMOS	72	97	200	306	268	277	260	305	272	308.4	210	137	308.4
MINIMOS	0	0	3.4	62	105	85.5	14	9	50	83.2	39.7	3	0

²⁸ Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Sabanalarga. 1999. Secretaría de Planeación municipal.

Tabla 3.77. Valores máximos mensuales de precipitación Estación Sabanalarga

29 IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES- S.I.N.A
 VALORES MAXIMOS MENSUALES DE PRECIPITACION (mms) EN 24 HORAS
 FECHA DE PROCESO : 981211 ESTACION : 2623020 SABANALARGA
 LATITUD 0651 N TIPO EST PG DEPTO. ANTIOQUIA FECHA-INSTALACION 1975-MAR
 LONGITUD 7549 W ENTIDAD 01 IDEAM MUNICIPIO SABANALARGA FECHA-SUSPENSION
 ELEVACION 1000 m.s.n.m REGIONAL 01 ANTIOQUIA CORRIENTE CAUCA

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR.ANUAL
1975	0	0	0	50	52	39	43	35	40	50	29	38	52
1976	16	4	12	35	23	31	29	40	15	51	24	13	51
1977	0	20	26	23	37	50	32	19	35	34	50	10	50
1978	13	23	55	38	35	34	30	57	40	22	28	34	57
1979	13	16	21	57	33	30	40	59	18	46	56	15	59
1980	6	0	19	46	75	77	38	23	72	25	27	29	77
1981	0	16	34	57	28	25	36	56	21	22	23	33	57
1982	34	12	17	30	17	45	34	23	65	39	15.1	4.6	65
1983	5.7	15.4	30	30	34	23.3	15.8	35.2	32.3	17.4	11.6	17.8	35.2
1984	6	12	7.7	26	21	20	28.2	31	48.6	26	50	10	50
1985	1	11	20	14	41	27	12	35	27	14.1	34.8	11.7	41
1986	7.7	10.8	8	32.1	39	33	20.6	26	44.8	37.5	7.6	8.5	44.8
1987	12.9	13	16.5	20	23	33	41	22	22.1	62.6	15.5	11	62.6
1988	4.7	7.9	2	22.3	23.4	27.2	17	17.3	0	40.4	31	35.3	40.4
1989	0	9	16	17	57	34	16	34	32	23	47	13	57
1990	9	30	14	36	34	16	20	11	18	0	20	17	36
1991	19.2	0.8	24	22	47	13.7	41.8	8.6	20	21	30	2	47
1992	5.1	7	23	23	29	25	14	21	40	18	74	14	74
1993	12	6	52	18	31	30	35	18	19	25	43	29	52
1994	15	27	24	61	17	44	14	31	19	31	40	25	61
1995	22	0	20	39	46	22	90	19	31	31	18	20	90
1996	10	14	45	15	30	30	28	23	50	58	42	30	58
1997	12	36	20	15	19	38	9	5	47	47	46	3	47
1998	20	18	30	38	63	39	27	59	35	30	0	0	63
MEDIOS	11.1	13.4	23.3	31.9	35.6	32.8	29.6	29.5	34.4	33.5	33.2	18.4	27.2
MAXIMOS	34	36	55	61	75	77	90	59	72	62.6	74	38	90
MINIMOS	0	0	2	14	17	13.7	9	5	15	14.1	7.6	2	0

²⁹ Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Sabanalarga. 1999. Secretaría de Planeación municipal.

Tabla 3.78. Valores totales mensuales de precipitación Estación El Oro

30 I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
 SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL
 VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACION (mms)
 FECHA DE PROCESO : 981211 ESTACION : 2623019 EL ORO
 LATITUD 0656 N TIPO EST PM DEPTO. ANTIOQUIA FECHA-INSTALACION 1975-ABR
 LONGITUD 7546 W ENTIDAD 01 IDEAM MUNICIPIO SABANALARGA FECHA-SUSPENSION 1992-OCT
 ELEVACION 2100 m.s.n.m REGIONAL 01 ANTIOQUIA CORRIENTE CAUCA

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR.ANUAL
1975	0	0	0	0	264	292	294	382	212	302	255	219	2220
1976	56	48	166	173	262	220	136	167	145	278	133	58	1842
1977	11	9	113	149	135	283	171	162	204	280	173	35	1725
1978	16	62	144	263	219	257	117	139	198	189	97	85	1786
1979	12	68	18	227	197	164	73	240	202	312	233	76	1822
1980	57	6	72	81	191	184	154	173	125	257	115	110	1525
1981	5	52	62	277	408	267	180	150	192	238	181	74	2086
1982	9	126	58	297	195	242	0	0	0	0	0	15	942
1983	0	33	144	257	225	99	251	188	199	226	136	233	1991
1984	32	130	62	175	310	195.4	271	177	256	246	212	44	2110.4
1985	3	10	114	121	185	181	166	251	193	244	122	104	1694
1986	40	95	32	180	208	289	58	194	110	715	95	18	2034
1987	24	51	31	180	288	91	208	134	187	286	142	61	1683
1988	5	37	11	126	212	222	140	278	234	0	0	0	1265
1989	0	0	0	0	205	299	175	152	280	247	0	0	1358
1990	0	0	0	0	00*.0	175	131	112.8	160	255	156	115	1104.8
1991	46	26	122	138	188	114	132	85	79	181	99	44	1254
1992	7	56	17	148	87	59	80	61	73	0	0	0	588
1993	0	0	0	0	263	153	168	148	419	279	345	0	1775
MEDIOS	21.5	53.9	77.7	186.1	224.6	199.3	161.4	177.4	192.7	283.4	166.3	86.1	1830.4
MAXIMOS	57	130	166	297	408	299	294	382	419	715	345	233	715
MINIMOS	0	6	11	81	87	59	58	61	73	181	95	15	0

³⁰ Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Sabanalarga. 1999. Secretaría de Planeación municipal.



- **Precipitación Máxima 24 Horas (Estación El Oro)**

La precipitación máxima contiene datos muy diversos, sin que sean constantes las variaciones. El año de mayor precipitación máxima es 1982, con 121 mm, y el año de menor precipitación máxima es 1992, con 26 mm.

De la precipitación promedio mensual no se tienen datos muy próximos entre sí, observándose que el mes de Mayo tiene la precipitación máxima con 47,3 mm y el mes de Enero la menor precipitación máxima, 9,5 mm. De los doce meses del año, se tiene que: uno está por debajo de 10 mm; uno entre 11 y 20 mm; dos, entre 21 y 30; seis, entre 31 y 40; y dos por encima de 40.

Aunque la información de los años 1975, 1982, 1983, 1988, 1989, 1990, 1992 y 1993 está incompleta los análisis indican que el año con menor precipitación máxima fue 1985, con 49 mm. En cuanto a los meses, solo se tienen datos completos para junio³¹.

- **Zona 2**

Corresponde a los municipios de Ituango, Toledo y Briceño. En este territorio sólo se encuentran dos estaciones meteorológicas, ambas en jurisdicción de Ituango:

- La Estación Santa Rita, localizada sobre los 07° 19' de Latitud Norte y 75° 37' de Longitud Oeste, a 1.950 msnm. Es una estación pluviográfica situada sobre el río Sinitavé, identificada con el número 2622011, que funciona desde septiembre de 1982
- Estación La Granja, localizada sobre los 07° 17' de Latitud Norte y 75° 45' de Longitud Oeste; a 1000 msnm. Es una estación pluviométrica, sobre la Quebrada San Isidro, identificada con el número 2622010, que funciona desde abril de 1975.

A continuación se presentan las mediciones de la precipitación y el conjunto de valores medios, dados en milímetros por mes (véanse Tabla 3.79 a Tabla 3.81).

De los datos presentados en las Tablas anteriores, se concluye que la zona presenta un régimen unimodal de lluvias, con la época más seca en los meses de diciembre a marzo, para el resto del año, de abril a noviembre, las lluvias promedian los 196 y 293 milímetros por mes (Estaciones La Granja y Santa Rita). El promedio de lluvias en el año para las dos estaciones es de 1724,8 y 2693,9 mm³², respectivamente

³¹ Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Sabanalarga. 1999. Secretaría de Planeación municipal.

³² Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Ituango. 1999. Secretaría de Planeación municipal.



Tabla 3.79. Valores promedio de precipitación (mm) para la Zona 2.

Mes	La Granja	Santa Rita
Enero	23.1	48.1
Febrero	33.4	79.8
Marzo	43.2	100.1
Abril	133.2	231.4
Mayo	212.5	282.7
Junio	189.9	299
Julio	195.3	320.9
Agosto	237.2	335.1
Septiembre	195.2	281.5
Octubre	252.4	341.2
Noviembre	157.4	258.3
Diciembre	52	115.8
Promedio Anual	1724.8	2693.9

Fuente: IDEAM, Equipo Técnico POT

Tabla 3.80. Valores mensuales de precipitación en la estación La Granja, Municipio de Ituango.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Julio	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
1985	15	16	55	39	132	212	190	231	308	165	54	32	1449
1986	17	23	51	103	159	273	104	206	98				1034
1987		31	3	186	116	110	274	222	185	225	107	104	1563
1988		22	2	135	236	276	290	473	223	296	202.	31	2186
1989	89	49	24	144	170	149	195	160	203	307			1490
1990					288	142	166	172	169	356	207	70	1570
1991	4	31	78	58	236	98	140	133	132	360	246	58	1574
1992	18	35	2	96	193	133	285	319	295	210	142	47	1775
1993	58		56	127	354	123	143	225	342	243	324	82	2077
1994	31	12	52	210	238	103	123	252	119	275	157	50	1622
1995	17	3	31	178	172	329	272	261	70	282	43	52	1710
1996	12	45	136	110	261	334	235	320	290	134	112	30	2019
1997	15	126	21	147	208	187	122	110	105	176	137	16	1370
1998	1	41	50	199									291
Prom	23.1	33.4	43.2	133.	212.	190.	195.	237.	195.	252.	157.	52	
Máx.	89	126	136	210	354	334	290	473	342	360	324	104	
Mín.	0	0	2	39	116	98	104	110	70	134	43	16	

Fuente: IDEAM, Equipo Técnico POT



Tabla 3.81: Valores mensuales de precipitación en la estación Santa Rita, Municipio de Ituango.

Año	Ene.	Febr.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Julio	Ago.	Sept.	Oct..	Nov.	Dic.	Total
1985	1	73.3	129.3	109.3	231.5	325.9	350.7	386.5	360.5	369.2	158.9	79.3	2575
1986	66.6	78.1	119.8	272.2	229.5	330	199.8	257.3	155.5	383.6	167.6	78.3	2338
1987	22	29.5	25	283.7	310.7	197.9	392.7	333.2	290	459.3	146.3	81	2571
1988	16	45.8	21.6	11.4	126.4	395.5	416	516	407	410	453	240	3058
1989	67	124	145	240	496	362	336	253	300	349	192	155	3019
1990					389.5	240.8	326.3	278.5	251	325	446	111	2368
1991	16	101	157	133	292		279.3	160	235	207	242	87	1909
1992	24	25	60	255	216	223	447	395	324	243	280	76	2568
1993	123	11	96	258	378.8	317	275.7	361.3	399	210.9	335.5	125.6	2891
1994	43.7	107.5	129.4	368.7	300.3	237.5	206.1	342	232	404	304	68	2743
1995	31	16	102	268	251	361	384	418	231	546	162	210	2980
1996	135	151	179	227	264	362	308	445	334	240	281	78	3004
1997	32	195	37	250	189	235.5	250.6	211.1	140.8	288.6	189.1		2018
Prom.	48.1	79.8	100.1	231.4	282.7	299	320.9	335.1	281.5	341.2	258.3	115.8	
Máx.	135	195	179	368.7	496	395.5	447	516	407	546	453	240	
Mín.	1	11	21.6	109.3	126.4	197.9	199.7	160	140.8	207	146.3	68	

Fuente: IDEAM, Equipo Técnico POT

La distribución espacial de la lluvia en el territorio de Ituango, presenta dos zonas claramente diferenciadas:

- Un área con menor pluviosidad, con promedios de 1.500 a 2.000 mm anuales, comprende el N, NE, NO, y centro del territorio municipal.
- Un área con mayor pluviosidad, con promedios de 2.000 a 2.500 mm anuales, comprende el S, SE y SO del territorio.

Para el municipio de Toledo se dispone de los datos de la estación pluviométrica La Matanza, ubicada en el paraje homónimo, en la confluencia de la Quebrada de Taque con el Río San Andrés, a una altitud de 500 msnm, la cual se encuentra en la intersección entre las dos zonas de pluviosidad que hay en el Municipio de Toledo. La estación ha medido un promedio anual de lluvias de 2.000 a 2.100 mm en los últimos 30 años (excluyendo el año 1994, los últimos 8 meses del año 1998 y los primeros 7 meses del año 1999, de los cuales no se poseen datos).

Los meses más lluviosos (con promedios mayores a 250 mm durante los últimos años) son: Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre y Octubre. Los meses de pluviosidad intermedia, o de transición, (con promedios de 150 mm) son Abril y Noviembre y los meses de baja pluviosidad (con promedios de 25 a 100 mm) son Diciembre, Enero, Febrero y Marzo.

El año de 1997, en el cual se presentó el Fenómeno del Pacífico, tuvo un comportamiento atípico, con una pluviosidad muy baja de apenas 922 mm durante el año, cerca de un

45% del promedio histórico. A excepción del citado año, los restantes de la última década han estado dentro del promedio histórico (entre 1.700 y 2.200 mm).

Los datos anuales registrados por las estaciones de El Oro (Municipio de Sabanalarga), La Abertura (Municipio de San Andrés de Cuerquia), San Andrés (Municipio de San Andrés de Cuerquia), y La Matanza (Municipio de Toledo), se describen en la Tabla 3.82.

Tabla 3.82. Promedio Anual de Lluvias

ESTACIÓN	AÑO									
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Matanzas, Toledo.	2.157 (1)	2.157 (1)	2.157 (1)	1.700	N.D.	1.688	1.896	922	267 (2)	N.D.
El Oro, Sabanalarga.	1.105 (3)	1.254	588 (4)	1.775 (3)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
La Abertura, San Andrés de Cuerquia	N.D.	N.D.	N.D.	504 (5)	2.376	2.577	2.532	1.520	3.369	961 (2)
Est. San Andrés, San Andrés de Cuerquia	1.120 (6)	1.659	1.394	1.884	1.760	1.683	2.174	896	1.933	548 (2)

(1): Promedio anual entre los años 1970 y 1993; (2): Primeros cuatro meses; (3): Últimos siete meses; (4): Primeros nueve meses; (5): Cinco meses; (6): Ocho meses. N.D.: no disponible.

Los promedios anuales de lluvias son los siguientes: 2.084 mm en la Estación Matanzas, Toledo (últimos 30 años); 1.792 mm en la Estación El Oro, Sabanalarga (años 1975 a 1993); 2.475 mm en la Estación La Abertura, San Andrés de Cuerquia (entre los años 1994 y 1999) y 1.673 mm en la Estación San Andrés, San Andrés de Cuerquia (entre los años 1991 y 1999).

3.12.2 Calidad del aire

3.12.2.1 Material particulado en suspensión

Para la caracterización del material particulado en suspensión en la zona de estudio se contrató a la Universidad Pontificia Bolivariana, cuyo informe se presenta en el Anexo 3.3, el cual se resume en este numeral.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA) y el Decreto 02 de 1982 establecen el método del Alto Volumen (gravimétrico) como válido para el análisis de material particulado suspendido en la atmósfera.

Para el monitoreo de Material Particulado suspendido en la atmósfera se emplearon equipos HI-VOL (Alto Volumen), Marca GRASEBY-GMW, equipos estandarizados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA).

3.12.2.2 Puntos de muestreo

Se realizaron un total de diez monitoreos, entre el 8 de Febrero y el 19 de Febrero de 2007 en tres sitios considerados como representativos de las condiciones actuales de



calidad del aire, en cuanto a material particulado, tanto en las cabeceras municipales de San Andrés de Cuerquia y de Toledo, como en el entorno rural, en el corregimiento de El Valle.

Todos los puntos están sometidos a la influencia permanente de aportes de material particulado ocasionado por el tráfico de vehículos, sin embargo dos de ellos (San Andrés y El Valle) reciben el aporte adicional de fuentes lineales porque las vías adyacentes se encuentran sin pavimentar.

Punto 1: El HI-VOL se instaló en la terraza de la tienda del Barrio El Recreo, ubicada a 20 metros frente al Hospital de San Andrés de Cuerquia, a 15 metros de la vía de entrada al Hospital y a 25 metros de la vía principal que comunica con el municipio de Ituango; todas estas vías están sin pavimentar. La vegetación de este punto es medianamente densa.

Punto 2: El HI-VOL se instaló en la terraza de la vivienda perteneciente al señor Luis Castro (Cra 8 con Calle 11), ubicada aproximadamente a 15 metros de la casa del gobierno (en construcción) y a 20 metros del Hospital Municipal de Toledo. En los alrededores del sitio se encuentran ubicados hoteles, restaurantes, discotecas, billares, almacenes, cafeterías, graneros, cantinas, farmacias, entidades de servicios telefónicos y de salud. Las vías cercanas se encuentran pavimentadas. La vegetación en este punto es escasa.

Punto 3: Cambiar por: El HI-VOL fue instalado en la terraza de la escuela del corregimiento de El Valle del municipio de Toledo, al occidente del parque (aproximadamente a 100 metros) y a 30 metros de la vía (sin pavimentar). La vegetación en este punto es medianamente densa.



Punto 1 : San Andres de Cuerquia



Punto 2: Toledo (Cra 8 con Calle 11)



Punto 3. Corregimiento El Valle, del municipio de Toledo

- **Datos y resultados**

En la Tabla 3.83, la Tabla 3.84 y la Tabla 3.86 se presentan los resultados de las concentraciones del monitoreo de material particulado y se describen las condiciones climáticas.



Tabla 3.83. Resultados del monitoreo de material particulado, condiciones climáticas y observaciones del punto 1

Fecha	Punto 1, San Andres de Cuerquia Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Condiciones Climáticas y Observaciones
08-09/02/2007	110	Cielo despejado. Viento moderado. Se observa un bajo transito vehicular.
09-10/02/2007	72	Cielo despejado, viento moderado.
10/02/2007	148	Se observa constante transito vehicular, debido a la llegada de los habitantes de las veredas al cosco urbano del municipio. Cielo despejado, viento moderado.
11/02/2007	142	Cielo despejado, intensidad del viento baja. Transito vehicular alto el cual genera alta concentración de material particulado.
12/02/2007	165	Cielo despejado, intensidad del viento alta, la cual genera en su contacto con el suelo seco una concentración importante de material particulado. Se observa un bajo transito vehicular.
13/02/2007	136	Cielo despejado, viento moderado. Bajo transito vehicular.
14/02/2007	150	Cielo despejado, viento moderado. Bajo transito vehicular.
15/02/2007	164	Cielo despejado, viento fuerte. Se observa un transito vehicular bajo.
16/02/2007	184	Cielo despejado, viento fuerte. Transito vehicular alto.
17/02/2007	139	Transito Vehicular alto. Cielo despejado, viento moderado.
Promedio Geométrico de las Muestras	137 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

Tabla 3.84. Resultados del monitoreo de material particulado, condiciones climáticas y observaciones del punto 2

Fecha	Punto 2, Toledo Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Condiciones Climáticas y Observaciones
08/02/2007	35	Cielo parcialmente cubierto. Viento fuerte, transito vehicular bajo.
09/02/2007	35	Cielo cubierto, lluvia moderada. Viento fuerte, transito vehicular bajo.
10/02/2007	28	Cielo despejado, Viento fuerte. Bajo transito vehicular.
11/02/2007	67	Cielo parcialmente cubierto. Transito Vehicular alto.
12/02/2007	45	Cielo despejado. Se observa viento fuerte en la dirección norte-sur. Transito vehicular bajo.
13/02/2007	51	Cielo despejado. Se observa viento fuerte en la dirección norte-sur. Transito vehicular bajo.
14/02/2007	34	Cielo parcialmente cubierto, Viento moderado. Se observa bajo trafico vehicular.
15/02/2007	58	Cielo parcialmente cubierto, Viento moderado. Se observa bajo trafico vehicular.
16/02/2007	41	Cielo despejado, viento fuerte en dirección norte-sur
17/02/2007	24	Cielo despejado, viento moderado. Transito vehicular bajo.
Promedio Geométrico de las muestras	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	



Tabla 3.85. Resultados del monitoreo de material particulado, condiciones climáticas y observaciones del punto 3

Fecha	Punto 3 Valle de Toledo Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Condiciones Climáticas y Observaciones
09/02/2007	70	Cielo despejado, viento moderado. Bajo transito vehicular.
10/02/2007	68	Cielo despejado, viento moderado. Transito vehicular bajo.
11/02/2007	61	Cielo despejado, viento moderado. Se observa un tráfico vehicular alto.
12/02/2007	93	Cielo despejado, Viento fuerte. Bajo transito vehicular.
13/02/2007	49	Cielo despejado, bajo transito vehicular. Se interrumpió el flujo eléctrico en la zona desde las 20:00 horas del día 12-02-07 hasta las 8:30 horas del día 13-02-07
14/02/2007	54	Cielo despejado, viento moderado. Se interrumpió el flujo eléctrico en la zona durante una hora..
15/02/2007	65	Cielo cubierto, lluvia leve. Se observa bajo transito vehicular.
16/02/2007	81	Cielo cubierto, lluvia leve. Se observa bajo transito vehicular.
17/02/2007	65	Cielo despejado, viento moderado. Bajo transito Vehicular.
18/02/2007	63	Cielo despejado, viento moderado. Bajo transito Vehicular
Promedio Geométrico de las muestras	66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

• Legislación

Las condiciones actuales de referencia para evaluar la calidad del aire con base en los niveles máximos permisibles para contaminantes críticos, están contenidas en la nueva Resolución 601 de 4 de Abril de 2006, capítulo II, artículo 4, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (véase Tabla 3.86).

Tabla 3.86. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio

Contaminante	Unidad	Límite máximo permisible	Tiempo de Exposición
PST	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	Anual
		300	24 horas
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	70	Anual
		150	24 horas
SO ₂	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,031 (80)	Anual
		0,096 (250)	24 horas
		0,287 (750)	3 horas
		0,053 (100)	Anual
NO ₂	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,08 (150)	24 horas
		0,106 (200)	1 hora
O ₃	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,041 (80)	8 horas
		0,061 (120)	1 hora
CO	ppm (mg/m^3)	8,8 (10)	8 horas
		35 (40)	1 hora

Nota: mg/m^3 ó $\mu\text{g}/\text{m}^3$: a las condiciones de 298,15 °K y 101,325 KPa . (25 ° C y 760 mm Hg)

En la misma Resolución, en el capítulo V, Artículo 10, se establece la concentración y el tiempo de exposición bajo los cuales se debe declarar, por parte de las autoridades

ambientales competentes, los estados excepcionales de Prevención, Alerta y Emergencia (véase la Tabla 3.87).

Tabla 3.87. Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia

Contaminante	Tiempo de Exposición	Unidades	Prevención	Alerta	Emergencia
PST	24 horas	µg/m ³	375 µg/m ³	625 µg/m ³	875 µg/m ³
PM10	24 horas	µg/m ³	300 µg/m ³	400 µg/m ³	500 µg/m ³
SO2	24 horas	ppm (µg/m ³)	0.191 (500)	0.382 (1000)	0.612 (1600)
NO2	1 hora	ppm (µg/m ³)	0.212 (400)	0.425 (800)	1.064 (2000)
O3	1 hora	ppm (µg/m ³)	0.178 (350)	0.356 (700)	0.509 (1000)
CO	8 horas	ppm (mg/m ³)	14.9 (17)	29.7 (34)	40,2 (46)

Nota: mg/m³ ó µg/m³: a las condiciones de 298,15 °K y 101,325 KPa . (25 °C y 760 mm Hg)

Para poder comparar estos datos con los encontrados en las mediciones hechas, los valores de la norma se deben ajustar a las condiciones locales, mediante la siguiente ecuación:

$$Norma\ local = N\ de\ Calidad\ a\ CdeR \left[\frac{pb\ local * 298^{\circ}K}{760 * (273 + T^{\circ}C)} \right]$$

N de Calidad a C de R: Norma de Calidad a condiciones de referencia (760 mm Hg y 25° C)

T : temperatura promedio ambiente local (° C).

pb local: presión barométrica local (mm Hg).

Para los casos específicos en estudio, las Normas a condiciones locales se presentan en la Tabla 3.88.

Tabla 3.88. Normas a condiciones locales

Municipio	Presión barométrica	Temperatura	Material particulado promedio anual	Material particulado en suspensión por 24 horas
San Andrés de Cuerquia	638 mm Hg	28.° C	83 µg/m ³	250 µg/m ³
Toledo	611 mm Hg	23 ° C	81 µg/m ³	243 µg/m ³
El Valle	620 mm Hg	30° C	94 µg/m ³	281 µg/m ³

• Índices de calidad del aire

Para clasificar la situación atmosférica local, se emplea el Índice de Calidad Ambiental para aire atmosférico establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA). Este Índice, denominado PSI (Pollution Standard Index), presenta una clasificación por categorías que permite definir la calidad del aire atmosférico. En la Tabla 3.89 se observa el PSI a condiciones estándar y en la Tabla 3.90 se muestran estas condiciones corregidas para condiciones locales.



Tabla 3.89. Categoría ambiental definida para el PSI material particulado en suspensión

Parámetro	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 h)	Rango PSI	Calidad del Ambiente	Efectos Sobre la Salud
Material	0 - 75	0-50	Buena	
	75 - 260	51 - 100	Aceptable	
	260 - 375	101 - 200	Inadecuada	Leve agravamiento de síntomas en personas susceptibles a irritaciones
Particulado	375 - 625	201 - 300	Mala	Significativos síntomas de agravamiento y disminución de tolerancia al ejercicio en personas con enfermedades del corazón o pulmones
	625-875	301 - 400	Pésima	Comienzo prematuro de ciertas enfermedades en adición con significativos síntomas de agravamiento y la disminución de la tolerancia al ejercicio en personas saludables
	875 -1000	401 - 500	Crítico	Muerte prematura para enfermos o personas de avanzada edad. Gente saludable experimentara síntomas adversos que afectarán su actividad Normal

Fuente : OTT, Wayne R. Environmental Indices-Theory and Practice. Ann Arbor Science. Michigan, 1978. 371 p y Redaire, Boletín informativo No 3, Julio de 1994. Medellín

Tabla 3.90. Categoría ambiental definida para el PSI material particulado en suspensión

Parámetro	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Rango PSI	Calidad del Ambiente	Efectos sobre la salud
	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 h)					
Material Particulado	0 – 62	0 – 61	0 –70	0-50	Buena	
	62 – 216	61 -210	70 -244	51 - 100	Aceptable	
	216 - 312	210 – 303	244 – 351	101 - 200	Inadecuada	Leve agravamiento de síntomas en personas susceptibles a irritaciones
	312 - 520	303 - 505	351 - 586	201 - 300	Mala	Significativos síntomas de agravamiento y disminución de tolerancia al ejercicio en personas con enfermedades del corazón o pulmones
	520 - 728	505 - 707	586 - 820	301 - 400	Pésima	Comienzo prematuro de ciertas enfermedades en adición con significativos síntomas de agravamiento y la disminución de la tolerancia al ejercicio en personas saludables
	728 - 832	707 - 809	820 -937	401 – 500	Crítico	Muerte prematura para enfermos o personas de avanzada edad. Gente saludable experimentara síntomas adversos que afectarán su actividad Normal

• Conclusiones

Comparando los resultados obtenidos con la Norma (véanse Tabla 3.83, Tabla 3.84, Tabla 3.85, Tabla 3.86, Tabla 3.87), los Puntos 2 y 3 están por debajo de la norma, sólo el



Punto 1 la sobrepasa, lo cual puede deberse al material particulado producido por el tránsito vehicular de las vías adyacentes, las cuales se encuentran sin pavimentar.

En el caso de la norma local diaria, ninguno de los muestreos estuvo por encima de dicho valor. Por lo tanto, aunque la situación no se puede comparar estrictamente con lo estipulado por la ley, sí es evidente que la tendencia de los muestreos presenta niveles bajos de concentración en los puntos estudiados, para esta época del año.

Para el Punto 1 los resultados de los índices de calidad estuvieron dentro del rango de porcentaje de: “Bueno” un 10 %; “Aceptable” un 80 y un 10 % “Inadecuado”, lo que visto en conjunto, indica una categoría atmosférica “Aceptable”.

Para el Punto 2, los índices de calidad estuvieron dentro rango de porcentaje de 100 % “Bueno”, lo que permite clasificarlo dentro de la categoría atmosférica “Buena”.

En el Punto 3, igualmente, el 100 % de los valores de los índices de calidad correspondieron al rango “Bueno”, lo que indica una categoría atmosférica “Buena”.

Para la zona del proyecto los índices de calidad del aire registraron un porcentaje de 70% “Bueno”, 27% “Aceptable” y un 7 % “Inadecuada”, lo que indica una categoría atmosférica general “Buena”, para los diez días de monitoreo.

3.12.3 Ruido

Para la caracterización del ruido en la zona de estudio se contrató la firma Gestión y Servicios Ambientales Ltda., cuyo informe se presenta en el Anexo 3.5, una síntesis del cual se presenta en este numeral.

Los monitoreos de ruido ambiental se realizaron los días 10 y 12 de febrero de 2007 (días ordinarios) y el 11 de febrero de 2007 (día domingo), los cuales se realizaron cumpliendo con las especificaciones técnicas establecidas en la Resolución 627 del 7 de abril de 2006, para ruido ambiental en los horarios diurno y nocturno.

Al seleccionar los puntos para la medición del ruido, se tuvo en cuenta aquellas zonas que podrán verse afectadas por la construcción del proyecto, bien sea directamente por la construcción de las obras, o por el paso de los vehículos. Con ese criterio se seleccionaron:

- **Punto 1.** Municipio San Andrés de Cuerquia, Hospital Gustavo González Ochoa: Este sitio, localizado en el Barrio El Recreo, es indicativo de las condiciones atmosféricas actuales (material particulado y ruido) sobre la vía principal de acceso a la cabecera municipal de San Andrés de Cuerquia. Aunque en la actualidad esta vía es paso obligado para dirigirse a la zona del proyecto, se tiene prevista la construcción de una variante para evitar el ingreso del tráfico al casco urbano del municipio. En todo caso es un punto de referencia necesario para comparar la situación actual con la que se origine durante la construcción del proyecto.



- **Punto 2.** Corregimiento El Valle, Centro Educativo Rural CER. El Valle: Este sitio es indicativo de las condiciones atmosféricas actuales (material particulado y ruido) sobre la vía principal de acceso al Corregimiento de El Valle. Esta vía es el único acceso al corregimiento y será paso obligado para dirigirse a la zona del proyecto, por lo tanto será un corredor que deberá soportar el tráfico desde y hacia el proyecto. Este sitio es un punto de referencia necesario para comparar la situación actual con la que se origine durante la construcción del proyecto.
- **Punto 3.** Municipio de Toledo, Parqueadero Mingo: El lugar es indicativo de las condiciones atmosféricas actuales (material particulado y ruido) en la cabecera del municipio de Toledo. Esta vía es el único acceso al corregimiento y será paso obligado para dirigirse a la zona del proyecto, por lo tanto este corredor soportará el tráfico desde y hacia el proyecto. Este sitio es un punto de referencia necesario para comparar la situación actual con la que se origine durante la construcción del proyecto.
- **Punto 4.** Sector El Mote, Escuela Rural El Mote – Ituango: Este sitio es indicativo de las condiciones atmosféricas rurales (material particulado y ruido) del área adyacente a la futura zona de obras del proyecto. Este paraje es un punto de referencia necesario para comparar la situación actual con la que se origine durante la construcción del proyecto.

Además de las condiciones descritas, ninguno de los sitios seleccionados para el muestreo, se encuentran sometidos a la influencia de fuentes de área o de otros generadores de ruido.

3.12.3.1 Objetivos

Cuantificar los niveles de presión sonora (L_{eq}) emitidos en su entorno para determinar la Línea Base de Ruido Ambiental, antes de iniciar el proyecto Hidroeléctrico Ituango.

Efectuar el diagnóstico de las emisiones por ruido ambiental generadas en cada punto a evaluar, a partir de la cuantificación del L_{Aeq} , 1h, antes de la ejecución del proyecto, bajo condiciones normales de funcionamiento.

Identificar y cuantificar las fuentes externas que emiten ruido y no tienen relación con las actividades propias del proyecto.

Establecer la magnitud del ruido ambiental y proceder a su comparación con lo establecido tanto para el horario diurno como para el nocturno por la legislación vigente de nuestro país (Resolución 0627 de 2006 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial).



3.12.3.2 Definición de conceptos generales

3.12.4 Sonido

Fenómeno mecánico de carácter ondulatorio que se origina al oscilar las partículas de un cuerpo físico, que se propaga en un medio elástico (agua, aire, sólidos) y que es capaz de producir una sensación auditiva.

3.12.5 Ruido ambiental

Son los generados por las máquinas o actividades del hombre dentro y fuera de su trabajo.

3.12.6 Decibel (A)

Nivel de presión sonora en decibelios medidos con escala de ponderación A, la cual se considera como la más parecida a la respuesta del oído humano.

3.12.7 LEQ / Leq

Nivel de presión sonora continuo equivalente, el cual tendría la misma energía sonora total que el ruido real fluctuante evaluado en el mismo período de tiempo.

3.12.8 Emisión de Ruido

Es la presión sonora que, generada en cualquier condición, trasciende al medio ambiente o al espacio público.

3.12.9 Norma de emisión de ruido

Es el valor máximo permisible de presión sonora, definido para una fuente, por la autoridad ambiental competente, con el objeto de cumplir la norma de ruido ambiental.

3.12.10 Norma de ruido ambiental

Es el valor establecido por la autoridad ambiental competente, para mantener un nivel permisible de presión sonora, según las condiciones y características de uso del sector, de manera tal que proteja la salud y el bienestar de la población expuesta, dentro de un margen de seguridad aceptable.

3.12.11 L90

Es el nivel sonoro en dBA que se sobrepasa durante el 90% del tiempo de observación.
L90=L50-1,28s (dBA)



3.12.12 Ruido de Fondo

Ruido total de todas las fuentes de interferencia en un sistema utilizado para producción, medida o registro de una señal, independiente de la presencia de la señal. Incluye ruido eléctrico de los equipos de medida.

3.12.13 Ruido específico

Es el ruido procedente de cualquier fuente sometida a investigación. Dicho ruido es un componente del ruido ambiental y puede ser identificado y asociado con el foco generador de molestias.

3.12.14 Ruido continuo

Es aquel que no tiene cambios rápidos y repentinos de Nivel de Presión Sonora (NPS) durante el período de observación (más o menos 2 dB).

3.12.15 Ruido residual

Ruido total cuando los ruidos específicos en consideración son suspendidos. El ruido residual es el ruido ambiental sin ruido específico. No debe confundirse con el ruido de fondo.

3.12.16 Sonómetro

Es un instrumento de medición de presión sonora, compuesto de micrófono, amplificador, filtros de ponderación e indicador de medida, destinado a la medida de niveles sonoros, siguiendo unas determinadas especificaciones.

3.12.16.1 Valor límite permisible (VLP)

Estos valores han sido especificados por el gobierno Colombiano, a través de la Resolución 0627 del 07 de abril de 2006, expedida por el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en el capítulo III, cuyos valores se presentan en la Tabla **3.91**.

La misma Resolución establece que en los sectores y/o subsectores en que los estándares máximos permisibles de ruido ambiental son superados a causa de fuentes de emisión naturales, sin que exista intervención del hombre, los estándares máximos permisibles de ruido ambiental son los niveles de ruidos naturales, como es el caso de cascadas, sonidos de animales en zonas de parques naturales.



Tabla 3.91 Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental, expresados en decibeles db(a)

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en dB(A)	
		Día	Noche
Sector A. Tranquilidad y Silencio	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos.	55	45
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes. Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación.	65	50
	Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre. Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.	75	70
Sector C. Ruido Intermedio Restringido	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.	70	55
	Zonas con usos permitidos de oficinas. Zonas con usos institucionales.	65	50
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre.	80	70
Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado	Residencial suburbana. Rural habitada destinada a explotación agropecuaria. Zonas de Recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales.	55	45

3.12.16.2 Información general de los puntos

En la Tabla 3.92 se presentan los puntos monitoreados y las condiciones ambientales predominantes en ellos.



Tabla 3.92. Caracterización de los puntos monitoreados

SITIOS	1	2		
Fecha	10 de febrero	11 de febrero	10 de febrero	11 de febrero
Día	Ordinario	Dominical	Ordinario	Dominical
Horario	Día / noche	Día / noche	Día / noche	Día / noche
Hora inicio	17:35	5:45	15:50	5:25
Hora final	22:03	8:17	22:14	8:05
Fuente(s) generadora(s) de ruido	Actividades del Hospital Gustavo Gonzáles Ochoa; vecinos, vehículos en tránsito hacia Ituango y ambulancia del hospital , animales domésticos (perros, gallos) y silvestres (aves, grillos y chicharras)		Actividades del Hospital Gustavo Gonzáles Ochoa; vecinos, vehículos en tránsito hacia Ituango y ambulancia del hospital , animales domésticos (perros, gallos) y silvestres (aves, grillos y anfibios)	
Naturaleza y estado del terreno entre el sonómetro y la fuente de ruido	Inclinado al N; en parte baja carretera a Ituango e institución educativa. Al O inclinado, en la parte alta zona urbana de San Andrés de Cuerquia. Al S plano, Hospital y fuente de agua. Al E inclinado, viviendas.		Inclinado al E; en parte baja carretera a Ituango y el Río San Andrés. Al N inclinado al caserío del Corregimiento del Valle. Al S, en la parte alta, el C.E.R. El Valle. Al O, en la parte alta de la montaña, viviendas.	
Altitud (msnm)	1.431		517	
Presión barométrica local (mm Hg)	643,8		715,01	
Temperat ambiente (°C)	10 de febrero	11 de febrero	10 de febrero	11 de febrero
Día	21,3 - 22,5	16,2 - 17,7	33,0 - 33,7	20,3 - 24,3
Noche	19,3 -19,6	15,7 - 16,0	24,9 - 27,4	20,5 - 22,8
Velocidad viento (m/s)				
Día	1,33 - 2,58	<0,5, calma	0,42 - 1,8	0,46 y 0,79
Noche	< 0,5	0,7- 1,42	0,62 - 1,10	0,60 - 1,26
Dirección del viento				
Día	NE-SO	N-S	variable, predomina S-N, SE-NO	O-E, S-N, SSE-NNO, NNE-SSO
Noche	predomina calma	E-O y S-N	O-E	O-E y SO- NE
Humedad relativa (%)				
Día	58 - 68	76 - 79	38 - 48	70 - 80
Noche	74 - 81	74 - 76	69 - 73	78 - 82

Tabla 3.92. Caracterización de los puntos monitoreados. (Continuación)

SITIOS	3	4		
Fecha	11 de febrero	12 de febrero	11 de febrero	12 de febrero
Día	Dominical	Ordinario	Dominical	Ordinario
Horario	Día / noche	Día / noche	Día / noche	Día / noche
Hora inicio	12:27	5:20	15:50	6:00
Hora final	22:05	8:05	22:03	8:07
Fuente(s) generadora(s) de ruido	Actividades comerciales, laborales y religiosas de los pobladores del Municipio de Toledo, Vehículos que transitan por la Cra 8 y Calle 11, de los animales domésticos (Gallitos, perros, caballos) y de la naturaleza (aves e insectos).		Vehículos que transitan por la carretera vía a Ituango, sonidos de la naturaleza (varias especies de aves, insectos, anfibios, entre otra fauna que habitan en esta zona de vida) y sonido quebrada la Mota.	
Naturaleza y estado del terreno entre el sonómetro y la fuente de ruido	Terreno plano con dirección O a la carrera 8 e inclinado al parque principal del Municipio de Toledo. Al S es plano con viviendas. Al N y E el terreno es de alta pendiente, potreros.		Terreno quebrado en todas direcciones. Al N Quebrada Mote y carretera al Valle. Al O y S carretera El Valle – Ituango. Al E Escuela Rural El Mote.	
Altitud (msnm)	1.810		789	
Presión barométrica local (mm Hg)	618,49		693,42	
Temperat ambiente (°C)	11 de febrero	12 de febrero	11 de febrero	12 de febrero
Día	24,5 - 28,8	15,5 - 21,8	27,1 - 28,2	21,2 - 23,3
Noche	15,8 - 17,7	14,7 - 16,0	23,0 - 26,8	19,0 - 19,2
Velocidad viento (m/s)				
Día	0,93 - 2,01	0,61 y 0,97	> 5,00, constante	<0,5,
Noche	0,83 - 2,29	<0,5 y 0,60	Ocasional 1,75	predomina calma
Dirección del viento				
Día	Constante E-O, NE-SO y NNE-SSO	NE-SO y N-S	S-N	predomina calma
Noche	S-N, SSO-NNE Y SO-NE	predomina S-N y calma	S-N y calma	predomina calma
Humedad relativa (%)				
Día	32 - 44	76- 86	47- 58	70 - 79
Noche	88 - 92	89- 92	68 - 79	80 - 84

NOTA 1. Es importante anotar que tanto la dirección como la velocidad del viento presentaron variabilidad en los diferentes puntos evaluados, lo que se debe a las condiciones específicas de cada punto de medición, influenciadas por las características topográficas de montaña de la zona de estudio.

NOTA 2. Variabilidad del ruido: En los puntos 2 y 4 el ruido continuo es el presentado por las fuentes de aguas superficiales Río San Andrés y Quebrada La Mota (Ruidos de la naturaleza). En todos los cuatro puntos el ruido es discontinuo generado por las actividades comerciales, instituciones educativas, religiosas, entre otras, de las actividades de los pobladores, de los generados por el flujo vehicular que es muy bajo (ruido del motor, pitos, frenos de aire, alarmas, etc), de los animales domésticos (caninos, aves de corral, bovinos y equinos) y de la naturaleza (Aves silvestres, insectos como grillos y chicharras anfibios).

NOTA 3. Connotación del ruido: En este estudio se evaluó como ruido ambiental el proveniente de las actividades antropicas del área de influencia de las zonas evaluadas correspondientes al flujo vehicular y de las provenientes de las actividades de los pobladores del sector, según su desarrollo urbanístico y social, pero es lógico que se encuentre aumentado por el ruido de las fuentes naturales.



3.12.16.3 Metodología

• Equipos

A continuación se describen los instrumentos utilizados para la evaluación ambiental de ruido así como su estado de calibración.

En la medición de ruido se utilizaron sonómetros marca QUEST TECHNOLOGIES, para medición de ruido ambiental, Modelos 2900, con certificado de calibración de la casa fabricante del 24 de enero de 2006 y 16 de junio de 2006; verificados con pistófono QC-10 calibrado el 16 de junio de 2006 cuyas principales características son:

- Capacidad de medición: rango inferior 20 dB rango superior 140Db
- Seis (6) techos de medición: 20 dB -140 dB.
- Micrófono QE 7052 1/2, serie 20163 y serial 12784 con pantalla contra viento.
- Cumple con normas internacionales: ANSI S1.4-1983 SLM TIPO 1, IEC 651-1979 SLM TIPO 1, IEC 804-1985 SLM TIPO 1, ANSI S1.11-1986 OBF y EN61260-1995.
- Frecuencia de análisis: ponderaciones A, C y lineal.
- Funciones: SPL, SPL max, SPL min, L eq, L90, entre otros.
- Ponderaciones de tiempo: rápido, lento, impulso y pico
- Filtro de octavas: adaptable.
- Verificador de calibración de los sonómetros (pistófono), marca QUEST, modelo QC-10, serie QID050022, con una intensidad sonora de 114 dB a una frecuencia de 1000 Hz, adicionalmente cumple con normas internacionales: ANSI S1.40-1984 CALIBRATORS y IEC 942-1988 CALIBRATORS.

Para la medición de la velocidad del viento, se utilizó Anemómetro digital marca EXTECH Instruments, modelo 451126, serial No G034374, y para verificar la dirección del viento se utiliza veleta libre en tela.

Para medición de la Temperatura y Humedad relativa se utilizó el Termo Higrómetro análogo digital, modelo DT-3 y serial NR: THG-050.

Para medir presión barométrica se utilizó reloj marca CASSIO con brújula incorporada, referencia PRO TREK, verificado con barómetro ubicado en el aeropuerto Olaya Herrera de la Ciudad de Medellín.

Para la Georreferenciación de cada uno de los puntos se utilizo un GPS marca GARMIN.

• Procedimientos de medición

Los cuatro puntos definidos para el estudio de ruido ambiental se evaluaron al exterior del hospital (Punto 1), de un parqueadero de vehículos (Punto3) y al exterior de instituciones educativas (Punto 2 y 4), en áreas abiertas y distantes a paramentos; adicionalmente se tuvo en cuenta lo establecido en la norma (Resolución 0627 de 2006) para cumplir con las mediciones en los horarios diurno y nocturno.

Se tuvo presente ubicar los equipos distantes de barreras horizontales y verticales, con el ánimo de evitar reverberancia y por consiguiente aumento del ruido objeto de estudio. La localización de los puntos se presenta en la Tabla 3.93.

Tabla 3.93. Localización de los puntos de monitoreo

Punto	Elevación (msnm)	Coordenadas		Precisión (m)
		X	Y	
Punto 1	1431	823956	1256878	10 m
Punto 2	517	0823932	1271506	6 m
Punto 3	1810	0822079	1267207	7 m
Punto 4	779	0819164	1277039	10 m

Se efectuaron mediciones de una hora por punto, tanto para el horario diurno como para el nocturno. Las mediciones se efectuaron en dos días en semana (sábado 10 y lunes 12 de febrero de 2007) y un día domingo (domingo 11 de febrero de 2007), para los horarios diurno y nocturno.

Otras actividades desarrolladas simultáneamente con la tarea de mediciones:

- Toma de datos de las condiciones meteorológicas durante el desarrollo de las mediciones (Temperatura, Humedad Relativa, Presión Barométrica, Velocidad y dirección del viento, entre otras observaciones climáticas).
- El aforo vehicular se efectuó en las vías existentes, perimetrales a los puntos de monitoreo (carretera destapada San Andrés de Cuerquia – El Valle – Ituango) y en la carrera 8 con calle 11, municipio Toledo.

• Procedimiento de medición para Ruido Ambiental

Los puntos definidos evaluados para el Proyecto Hidroeléctrico Ituango, se encuentran clasificados así: Punto 1 y Punto 3- Sector A Tranquilidad y Silencio; Punto 2 y Punto 4 - Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado. El procedimiento aplicado para la medición del ruido ambiental se realizó instalando el micrófono a una altura de cuatro (4) metros medidos a partir de la superficie del suelo.

Cada medición se efectuó durante una hora en cada punto, según se estipula en el Artículo 5 de la Resolución 627/2006. Se realizaron cinco (5) mediciones parciales distribuidas en tiempos iguales, variando la orientación del micrófono en cada medición,



así: Norte, Sur, Este, Oeste y Vertical (hacia arriba). El resultado de la medición se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$LA_{eq} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{5} \cdot (10^{LN/10} + 10^{LO/10} + 10^{LS/10} + 10^{LE/10} + 10^{LV/10}) \right)$$

Donde:

- LAeq = Nivel equivalente resultante de la medición.
- LN = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientada en sentido norte
- LO = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientada en sentido oeste
- LS = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientada en sentido sur
- LE = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientada en sentido este
- LV = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientada en sentido vertical

La altura y distancia horizontal de las mediciones se presentan en la Tabla 3.94, con el fin de permitir la repetibilidad de los mismos puntos en futuros estudios.

Tabla 3.94. Ubicación de los Puntos de Monitoreo

Nombre del Punto	Distancia y dirección del sonómetro hasta la primera barrera (m)			
	Norte	Este	Sur	Oeste
Punto 1: Municipio San Andres de Cuerquia, en el Hospital Gustavo Gonzalez Ochoa.	3,7	43,8	8,00	56,4
Punto 2: Corregimiento El Valle, en el Centro Educativo Rural C.E.R. El Valle	NB	NB	15,0	45,0
Punto 3: Municipio de Toledo, en el Parqueadero Mingo	NB	NB	NB	15,6
Punto 4: Sector El Mote, Escuela Rural El Mote - Ituango	6,20	7,20	6,8	1,00

NB: No existen barrera en esta dirección del sonómetro; NOTA: Las distancias verticales son de 4 metros en todos los puntos evaluados.

Para la medición del ruido ambiental y con el fin de prevenir posibles errores de medición, se adoptaron las siguientes medidas:

- Los micrófonos de los sonómetros, instalados sobre un trípode adecuado para su montaje, se protegieron con la pantalla antiviento.
- Se midió la velocidad del viento, la cual no superó los 3 m/s durante los monitoreos en los puntos 1, 2 y 3; el punto 4, el día 11 de febrero presentó velocidades superiores a los 5 m/s, lo que obligó a utilizar la pantalla contraviento requerida cuando se presentan estas velocidades. En términos generales el comportamiento de los vientos es variable, presentándose para el horario diurno vientos constantes de dirección y velocidad cambiantes, en tanto que para el horario nocturno predominó la ausencia de vientos y vientos ocasionales con velocidades menores a 3 m/s.



- Antes de efectuar las mediciones, se realizó la verificación de calibración de los respectivos sonómetros, de acuerdo con las instrucciones del fabricante utilizando el pistófono. Este procedimiento se realizó antes y después de efectuar las mediciones.
- Las mediciones de los niveles equivalentes de presión sonora ponderados A, -LAeq,T, se efectuaron en escala A, respuesta lenta, en tiempo seco, sin presencia de lluvia, o lloviznas. De igual forma, durante los monitoreos de ruido, se verificó que los pavimentos y vías estuvieran secos y siempre se integró el ruido con velocidades del viento por debajo de 3 m/s.

3.12.16.4 Resultados

Para efectos del estudio y cumplimiento de la norma, se realizaron dos mediciones: una en días entre semana (sábado 10 y lunes 12 de febrero de 2007); y la otra, un día domingo (11 de febrero de 2007).

• Descripción de la ubicación espacial de los puntos donde se evaluó el ruido:

- **Punto 1.** En el municipio de San Andrés de Cuerquia, en el Hospital Gustavo González Ochoa, zona urbana. El sonómetro se ubicó en la parte frontal de la vía de circulación, entre la malla y la fuente de agua artificial (pileta). En su perímetro predomina el sector residencial e instituciones educativas; en la parte baja pasa la vía a Ituango, que se encuentra destapada; las mediciones se efectuaron en el parqueadero del hospital.
- **Punto 2.** En el corregimiento de El Valle, Centro Educativo Rural C.E.R. El Valle; la ubicación del sonómetro fue en la parte intermedia entre la escuela y la carretera destapada San Andrés de Cuerquia – Ituango, terreno con una topografía pendiente; se presentan actividades agrícolas y habitacionales, en la parte baja pasa el Río San Andrés.
- **Punto 3.** En el municipio de Toledo, parqueadero Mingo, zona urbana. El sonómetro se ubicó en el interior del parqueadero, a dos cuadras del hospital Pedro Clavel Aguirre. Las actividades predominantes son la residencial y la educativa, con influencia mínima de la actividad comercial. El sitio está localizado en la carrera 8 con la calle 11, en dirección al parque principal, y ambas vías se encuentran pavimentadas.
- **Punto 4.** Escuela Rural de Mote, sector El Mote – Municipio de Ituango. El sonómetro se ubicó en el exterior de la escuela (patio de ingreso principal); este sector queda dentro del cañón del Río Cauca, a unos 8,2 kilómetros del puente de Pescadero, sobre la carretera que conduce al municipio de Ituango.

• Resultados encontrados

De la Tabla 3.95 a la Tabla 3.98 se presentan los resultados del monitoreo de ruido, diurno y nocturno en al cuatro puntos.



Tabla 3.95. Ponderación mediciones ruido ambiental horario diurno en semana

Punto	Valor Ponderado Nivel de Ruido Total LAeq dBA,1h	Valor Ponderado L90 dBA,1h	Valor Norma Sector A y D - Zonas de Tranquilidad, Ruido Moderado, Área Suburbana y Rural en dBA ART. 17 R, 627 07/Abril/2006 dB A
Punto 1	59,65	51,73	55
Punto 2	50,75	47,14	55
Punto 3	48,06	39,80	65
Punto 4	56,70	50,97	55

Tabla 3.96. Ponderación mediciones ruido ambiental horario diurno en domingo

Punto	Valor Ponderado Nivel de Ruido Total LAeq dBA,1h	Valor Ponderado L90 dBA,1h	Valor Norma Sector A y D - Zonas de Tranquilidad, Ruido Moderado, Área Suburbana y Rural en dBA ART. 17 R, 627 07/Abril/2006 dB A
Punto 1	50,41	48,68	55
Punto 2	52,14	50,12	55
Punto 3	44,74	38,50	65
Punto 4	60,15	45,59	55

Tabla 3.97. Ponderación mediciones ruido ambiental horario nocturno en semana

Punto	Valor Ponderado Nivel de Ruido Total LAeq dBA,1h	Valor Ponderado L90 dBA,1h	Valor Norma Sector A, B y D - Zonas de Tranquilidad y Silencio, Ruido Moderado, Sub-urbana y Rural en dBA ART. 17 R, 627 07/Abril/2006 dB A
Punto 1	50,06	48,43	45
Punto 2	51,67	50,52	45
Punto 3	52,06	38,16	50
Punto 4	57,23	46,25	45

Tabla 3.98. Ponderación mediciones ruido ambiental horario nocturno en domingo

Punto	Valor Ponderado Nivel de Ruido Total LAeq dBA,1h	Valor Ponderado L90 dBA,1h	Valor Norma Sector A y D - Zonas de Tranquilidad, Ruido Moderado, Área Suburbana y Rural en dBA ART. 17 R, 627 07/Abril/2006 dB A
Punto 1	52,61	48,90	45
Punto 2	53,58	49,61	45
Punto 3	60,67	44,50	50
Punto 4	50,27	48,49	45

- Punto 1 (horarios diurno y nocturno)

Con los resultados obtenidos se puede concluir que para el horario DIURNO, las mediciones efectuadas en semana (sábado 10 de febrero de 2007), cuyo valor fue de 59,65 dBA, sobrepasa el valor establecido por la norma de 55 dBA, en tanto que para el día domingo, 11 de febrero, el resultado encontrado (50,41 dBA), se encuentra por debajo del valor establecido en la norma, de 55 dBA.

Con respecto al horario NOCTURNO, la norma establece un valor de referencia de 45 dBA y todos los resultados sobrepasan lo estipulado por la Resolución 0627 de 2007.



- **Punto 2 (horario diurno y nocturno)**

Con los resultados para el “Centro Educativo Rural C.E.R. El Valle” se puede concluir que para el horario DIURNO, las mediciones efectuadas el sábado 10 y el domingo 11 de febrero de 2007, cuyos valores fueron de 50,75 y 52,14 dBA, respectivamente, están por debajo de lo establecido por la norma, de 55 dBA.

Con respecto al horario NOCTURNO, la norma establece un valor de referencia de 45 dBA observándose que tanto los resultados obtenidos el sábado 10 (51,67) como los del domingo 11 de febrero de 2007 (53,58 dBA), sobrepasan lo estipulado por la Resolución 0627 de 2007.

- **Punto 3 (horarios diurno y nocturno)**

En el “Parqueadero Mingo – Municipio de Toledo” se puede concluir que para el horario DIURNO, las mediciones efectuadas el lunes 12 y el domingo 11 de febrero de 2007, cuyos valores fueron de 48,06 y 44,74 dBA respectivamente, están por debajo de lo establecido por la norma de 55 dBA.

Con respecto al horario NOCTURNO, los resultados encontrados de 52,06 y 60,67 dBA los días lunes 12 y domingo 11 de febrero de 2007, sobrepasan lo estipulado por la Resolución 0627 de 2007 (50 dBA).

No se percibió una influencia marcada por ruido proveniente de fuentes móviles, dadas las características del escaso tráfico.

- **Punto 4 (horarios diurno y nocturno)**

Para la “Escuela Mote, sector el Mote del Municipio de Ituango” se puede concluir que en el horario DIURNO, las mediciones efectuadas el domingo 11 y el lunes 12 de febrero de 2007, cuyos valores fueron de 56,70 y 60,15 dBA respectivamente, están por encima de lo establecido por la norma (55 dBA).

Con respecto al horario NOCTURNO, la norma establece un valor de referencia de 45 dBA y tanto los resultados encontrados de 57,23 y 50,27 dBA los días lunes 12 y domingo 11 de febrero de 2007 respectivamente, sobrepasan lo estipulado por la Resolución 0627 de 2007 (45 dBA).

El flujo vehicular sobre la vía San Andrés de Cuerquia a Ituango (carretera sin pavimentar), carrera 8 y calle 11 del municipio de Toledo, fue reducido durante las mediciones de ruido ambiental, por lo tanto se puede afirmar que la incidencia de las fuentes móviles sobre los resultados obtenidos es mínima. Sin embargo, se observó un gran aporte proveniente de ruidos generados por las actividades comerciales, las actividades de los pobladores y de ruido generado por la naturaleza principalmente (grillos, chicharras, perros, movimiento del follaje por el viento, pájaros y algunas aves de corral).



3.	CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO ABIÓTICO DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO	3.1
3.1	Geología.....	3.1
3.1.1	Metodología.....	3.1
3.1.1.1	<i>Recopilación de información</i>	<i>3.1</i>
3.1.1.2	<i>Reconocimiento de campo.....</i>	<i>3.1</i>
3.1.1.3	<i>Investigaciones previas del subsuelo</i>	<i>3.1</i>
3.1.2	Generalidades	3.3
3.1.3	Geología regional	3.3
3.1.3.1	<i>Rocas Metamórficas del Paleozoico.....</i>	<i>3.4</i>
3.1.3.2	<i>Rocas Ultrabásicas del Cretáceo</i>	<i>3.5</i>
3.1.3.3	<i>Rocas Igneas del Cretáceo</i>	<i>3.5</i>
3.1.3.4	<i>Rocas Sedimentarias del Terciario (Ts)</i>	<i>3.6</i>
3.1.3.5	<i>Depósitos no consolidados del Cuaternario</i>	<i>3.6</i>
3.1.4	Marco Tectónico Regional.	3.7
3.1.4.1	<i>Falla Cauca W.</i>	<i>3.7</i>
3.1.4.2	<i>Falla Sucre.....</i>	<i>3.7</i>
3.1.4.3	<i>Alineamiento Quebrada Juan García.</i>	<i>3.7</i>
3.1.4.4	<i>Falla Sabanalarga.....</i>	<i>3.8</i>
3.1.4.5	<i>Falla Barbacoas.....</i>	<i>3.8</i>
3.1.4.6	<i>Falla El Guásimo:.....</i>	<i>3.8</i>
3.1.4.7	<i>Falla Orobajo</i>	<i>3.8</i>
3.1.4.8	<i>Falla Ituango.</i>	<i>3.8</i>



3.1.4.9	<i>Fallas Santa Rita</i>	3.8
3.1.4.10	<i>Falla La Volcanera</i>	3.8
3.1.4.11	<i>Falla Espiritu Santo</i>	3.9
3.2	Geomorfología.....	3.9
3.2.1	Marco Geomorfológico	3.10
3.2.2	Macrounidad Alta Incisión (AI).....	3.11
3.2.2.1	<i>Unidad Vertiente media de superficie irregular (AI-Vmsi)</i>	3.11
3.2.2.2	<i>Unidad Vertientes en la cuenca de la quebrada Pascuita (AI-VP)</i>	3.11
3.2.2.3	<i>Unidad Vertientes largas de superficie convexa (AI – Vlsc)</i>	3.11
3.2.2.4	<i>Unidad Vertientes de filos cortos (AI – Vfc)</i>	3.11
3.2.2.5	<i>Unidad Filo alargado en dirección NS (AI – Fa)</i>	3.12
3.2.2.6	<i>Unidad Vertientes de fuerte inclinación (AI – Vfi)</i>	3.12
3.2.2.7	<i>Unidad Vertiente con desarrollo de filos con flancos de longitud media (AI - Vffm)</i> 3.12	
3.2.2.8	<i>Unidad Vertiente con filos largos con flancos de longitud corta (AI – Vffc)</i> ...	3.13
3.2.2.9	<i>Unidad Vertiente con filos cortos margen este (AI – Vfce)</i>	3.13
3.2.2.10	<i>Unidad Vertiente en la cuenca de la quebrada Santa Maria (AI – Vsm)</i>	3.13
3.2.2.11	<i>Unidad Vertiente de longitud media (AI – Vm)</i>	3.13
3.2.2.12	<i>Unidad Vertiente con filos controlados estructuralmente (AI – Vfe)</i>	3.14
3.2.2.13	<i>Unidad Vertiente de inclinación moderada (AI – Vm)</i>	3.14
3.2.3	Macrounidad vertientes bajas margen Oeste (VBO).....	3.14
3.2.3.1	<i>Unidad Filo bajo en dirección NE (VBO – Fne)</i>	3.14
3.2.3.2	<i>Unidad Vertiente larga y moderada (VBO – Vlm)</i>	3.14
3.2.3.3	<i>Unidad Vertiente con desarrollo de filos de flancos medios (VBO – Vffm)</i>	3.15
3.2.3.4	<i>Unidad Filos de tope irregular y flancos de inclinación fuerte (VBO – Fti)</i>	3.15



3.2.3.5	<i>Unidad Vertiente de superficie convexa (VBO – Vsc)</i>	3.15
3.2.3.6	<i>Unidad Vertientes en la cuenca de la quebrada Las Cuatro (VBO – Vlc)</i>	3.16
3.2.3.7	<i>Unidad Vertientes de longitud media (VBO – Vlm)</i>	3.16
3.2.3.8	<i>Unidad Vertiente de superficie irregular (VBO – Vsi)</i>	3.16
3.2.3.9	<i>Unidad Vertiente de filos ramificados con flancos de fuerte inclinación (VBO – Vfr)</i>	3.16
3.2.3.10	<i>Unidad Filo continuo de flancos planos (VBO – Ffp)</i>	3.17
3.2.3.11	<i>Unidad Vertiente con filos planos y cortos (VBO – Vfpc)</i>	3.17
3.2.3.12	<i>Unidad Filos con flancos convexos de longitud corta (VBO – Ffc)</i>	3.17
3.2.4	Macrounidad vertientes bajas margen Este (VBE).....	3.18
3.2.4.1	<i>Unidad Vertiente con filos ramificados (VBE – Vfr)</i>	3.18
3.2.4.2	<i>Unidad Vertiente de inclinación baja (VBE – Vib)</i>	3.18
3.2.4.3	<i>Unidad Vertiente con desarrollo de filos redondeados (VBE – Vfr)</i>	3.18
3.2.4.4	<i>Unidad Vertiente con filos de flancos cortos (VBE – Vffc)</i>	3.18
3.2.4.5	<i>Unidad Vertiente ondulada de depósitos (VBE – Vod)</i>	3.19
3.2.4.6	<i>Unidad Vertiente con filos cortos y planos (VBE – Vfcp)</i>	3.19
3.2.5	Macrounidad vertiente media margen Este (VME).....	3.19
3.2.5.1	<i>Unidad Vertiente con filos largos (VME – Vfl)</i>	3.19
3.2.5.2	<i>Unidad Vertientes con filos largos en dirección EW (VME – Vflew)</i>	3.19
3.2.5.3	<i>Unidad Vertiente de fuerte inclinación (VME – Vfi)</i>	3.20
3.2.6	Macrounidad Fondo (F)	3.20
3.2.6.1	<i>Unidad Superficie modelada en depósitos (F – Sd)</i>	3.20
3.2.6.2	<i>Unidad Colinas medias (F – Cm)</i>	3.20
3.2.6.3	<i>Unidad Colinas bajas (F – Cb)</i>	3.20
3.2.6.4	<i>Unidad Colina media de flancos convexos (F – Cmfc)</i>	3.21



3.2.6.5	<i>Unidad Llanura aluvial del Río Cauca (F – Lla)</i>	3.21
3.2.6.6	<i>Unidad Terrazas aluviales (F – Ta)</i>	3.21
3.2.6.7	<i>Unidad Abanicos aluviales (F – Aa)</i>	3.21
3.2.6.8	<i>Unidad Escarpe al borde del Río Cauca (Ebr)</i>	3.22
3.2.7	Grandes movimientos en masa	3.22
3.2.7.1	<i>Deslizamiento del Guásimo</i>	3.22
3.2.7.2	<i>Deslizamiento El Llano</i>	3.23
3.2.7.3	<i>Deslizamiento de Playa Negra</i>	3.23
3.2.7.4	<i>Deslizamientos del río San Andrés parte baja</i>	3.23
3.2.7.5	<i>Deslizamientos cerca del sitio de presa Ituango</i>	3.23
3.2.7.6	<i>Otros deslizamientos identificados:</i>	3.24
3.2.8	Posibles expresiones Neotectónicas	3.24
3.3	sismología	3.25
3.3.1	Generalidades	3.25
3.3.2	Geología sísmica	3.26
3.3.2.1	<i>Generalidades</i>	3.26
3.3.2.2	<i>Marco Tectónico General</i>	3.26
3.3.3	Evaluación de la amenaza sísmica.....	3.28
3.3.3.1	<i>Sismicidad Histórica</i>	3.28
3.3.3.2	<i>Catálogo Sísmico</i>	3.29
3.3.3.3	<i>Zonas sismogénicas</i>	3.30
3.3.3.4	<i>Caracterización de sismofuentes</i>	3.34
3.3.4	Sismos de diseño	3.34
3.3.4.1	<i>Aceleración máxima</i>	3.34



3.3.4.2	<i>Duración</i>	3.35
3.3.4.3	<i>Espectros</i>	3.35
3.3.4.4	<i>Acelerogramas para diseño</i>	3.36
3.3.4.5	<i>Sismicidad inducida por el embalse</i>	3.37
3.4	GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DE LOS SITIOS DE OBRA	3.39
3.4.1	Características Geomorfológicas.....	3.39
3.4.2	Características geológicas.....	3.39
3.4.3	Características estructurales	3.41
3.4.3.1	<i>Fallas</i>	3.41
3.4.3.2	<i>Diaclasas</i>	3.41
3.5	Geotecnia	3.42
3.5.1	Clasificación del macizo rocoso.....	3.42
3.5.2	Resistencia a la compresión simple y modulo de deformación del material intacto 3.43	
3.5.3	Características geomecánicas de las discontinuidades	3.43
3.5.4	Propiedades geomecánicas y de deformación del macizo rocoso.	3.43
3.6	Suelos	3.45
3.6.1	Fisiografía.....	3.45
3.6.1.1	<i>Provincia fisiográfica</i>	3.46
3.6.1.2	<i>Región climática</i>	3.46
3.6.1.3	<i>Gran paisaje</i>	3.47
3.6.1.4	<i>Paisajes</i>	3.47
3.6.2	Asociaciones	3.48
3.6.2.1	<i>Asociación Ituango (IT)</i>	3.48
3.6.2.2	<i>Asociación Raudal (RV)</i>	3.49



3.6.2.3	Calderas (CL).....	3.51
3.6.2.4	Santa Bárbara (SB).....	3.52
3.6.2.5	Concordia (CN).....	3.53
3.6.2.6	Gemelos (GA).....	3.54
3.6.2.7	Tuntuna (TG)	3.55
3.6.2.8	Tarazá (TR).....	3.56
3.6.3	Usos potenciales del suelo	3.57
3.7	ANÁLISIS DEL PAISAJE	3.58
3.7.1	Metodología.....	3.59
3.7.1.1	Indicadores ecológicos a nivel de paisaje y de fragmentos de bosque.....	3.60
3.7.2	Resultados	3.62
3.7.2.1	Zonificación Ecológica	3.62
3.7.2.2	Caracterización de los patrones espaciales encontrados en la zonificación a partir de indicadores ecológicos del paisaje.....	3.67
3.8	HIDROLOGÍA.....	3.81
3.8.1	Información disponible y metodología empleada	3.81
3.8.2	Caudales medios característicos	3.82
3.8.3	Crecientes máximas	3.89
3.8.4	Caudales mínimos históricos	3.90
3.8.5	Niveles	3.91
3.9	SEDIMENTOS.....	3.96
3.9.1	Estudio de divagación.....	3.96
3.9.2	Geomorfología general.....	3.97
3.9.2.1	Trayecto 1. Confluencia río Tonusco (km 93+800 US) – Puente de Occidente (km 85+000 US)	3.98



3.9.2.2	Trayecto 2. Puente de Occidente (km 85+000 US) – Confluencia quebrada La Seca (km 77+100 US)	3.98
3.9.2.3	Trayecto 3. Confluencia quebrada La Seca (77+100 US) – Hacienda Canarias (km 55+500 DS)	3.99
3.9.2.4	Trayecto 4. Hacienda Canarias (km 55+500 DS) – sector El Doce (km 60+500 DS) 3.99	
3.9.2.5	Trayecto 5. Sector El Doce (km 60+500 DS) – confluencia quebrada Tunaco (km 69+500 DS)	3.100
3.9.2.6	Trayecto 6. Confluencia quebrada Tunaco (km 69+500 DS) - corregimiento Guarumo (km 126+000 DS).....	3.100
3.9.2.7	Trayecto 7. Corregimiento Guarumo (km 126+000 DS) – Margento (km 182+275 DS)	3.103
3.9.3	Análisis de sedimentos	3.104
3.10	Calidad del agua.....	3.106
3.10.1	Caracterización físico-química y bacteriológica	3.108
3.10.1.1	Metodología	3.109
3.10.1.2	Marco Legal	3.117
3.10.1.3	Resultados.....	3.119
3.10.1.4	Análisis de resultados	3.128
3.10.1.5	Comparación de los diferentes períodos de muestreo	3.142
3.10.2	Caracterización hidrobiológica.....	3.143
3.10.2.1	Perifiton.....	3.143
3.10.2.1	Introducción	3.143
3.10.2.2	Metodología	3.143
3.10.2.3	Resultados y Discusión	3.148
3.10.2.4	Conclusiones	3.163
3.10.2.5	Bentos.....	3.164



3.11	Usos del agua.....	3.182
3.12	Atmósfera	3.188
3.12.1	Clima	3.188
3.12.2	Calidad del aire.....	3.197
3.12.2.1	<i>Material particulado en suspensión</i>	<i>3.197</i>
3.12.2.2	<i>Puntos de muestreo</i>	<i>3.197</i>
3.12.3	Ruido	3.204
3.12.3.1	<i>Objetivos.....</i>	<i>3.205</i>
3.12.3.2	<i>Definición de conceptos generales</i>	<i>3.206</i>
3.12.4	Sonido	3.206
3.12.5	Ruido ambiental.....	3.206
3.12.6	Decibel (A).....	3.206
3.12.7	LEQ / Leq	3.206
3.12.8	Emisión de Ruido	3.206
3.12.9	Norma de emisión de ruido.....	3.206
3.12.10	Norma de ruido ambiental	3.206
3.12.11	L90	3.206
3.12.12	Ruido de Fondo	3.207
3.12.13	Ruido específico	3.207
3.12.14	Ruido continuo	3.207
3.12.15	Ruido residual	3.207
3.12.16	Sonómetro.....	3.207
3.12.16.1	<i>Valor límite permisible (VLP)</i>	<i>3.207</i>
3.12.16.2	<i>Información general de los puntos.....</i>	<i>3.208</i>



3.12.16.3	<i>Metodología</i>	3.211
3.12.16.4	<i>Resultados</i>	3.214



Figura 3.1	Tasa de excedencia de magnitudes del catálogo filtrado.....	3.30
Figura 3.2	Sismicidad y zonas sismogénicas superficiales.....	3.31
Figura 3.3	Sismicidad y zonas sismogénicas profundas.....	3.32
Figura 3.4	Distribución espacial de las fallas superficiales en la zona del Proyecto...	3.33
Figura 3.5	Distribución espacial de las fallas superficiales a escala regional .	3.33
Figura 3.6	Espectros de respuesta de aceleración para los sismos de diseño 3.36	
Figura 3.7	Componente N-S del sismo del 25 enero 1999	3.37
Figura 3.8.	Zonificación ecológica y coberturas vegetales basada en la clasificación de imágenes SPOT.	3.61
Figura 3.9.	El clima en el área del Proyecto.....	3.64
Figura 3.10.	Zonificación ecológica.....	3.65
Figura 3.11.	Coberturas boscosas con la delimitación de la zonificación ecológica.	3.66
Figura 3.12.	Patrón espacial de la vegetación en Paisaje Z1.....	3.68
Figura 3.13.	Patrón espacial de la vegetación en paisaje Z2. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.	3.70
Figura 3.14.	Patrón espacial de la vegetación en paisaje Z3. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.	3.72
Figura 3.15	Patrón espacial de la vegetación en un paisaje Z4. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.	3.74
Figura 3.16.	Patrón espacial de la vegetación en paisaje Z5. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.	3.75
Figura 3.17.	Patrón espacial de la vegetación en paisaje Z6. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.	3.77
Figura 3.18.	Patrón espacial de la vegetación en paisaje Z7. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.	3.79



Figura 3.19. Patrón espacial de la vegetación en un paisaje Z8. Se determinó el área interior de bosque para los bosques secundarios y los rastrojos altos.....	3.80
Figura 3.20. Hidrógrafas típicas del río Cauca	3.84
Figura 3.21. Caudales medios diarios característicos del río Cauca	3.85
Figura 3.22. Curvas de duración de Caudales del río Cauca	3.86
Figura 3.23 Histogramas de caudales Característicos del río Cauca	3.87
Figura 3.24 Distribución mensual y anual de caudales en el río Cauca	3.88
Figura 3.25 Curva de frecuencia de caudales máximos.....	3.90
Figura 3.26 Curva de frecuencia de caudales mínimos.....	3.91
Figura 3.27 Variación de niveles respecto al nivel medio en las distintas estaciones....	3.93
Figura 3.28 Relación caudal nivel en distintas estaciones para el período 1990-2000..	3.94
Figura 3.29 Variación del lecho del río en diferentes estaciones.....	3.95
Figura 3.30. Factores de escala Q para los parámetros involucrados en el WQI-NSF.	3.111
Figura 3.31. Variación de la constante de Henry con la temperatura	3.113
Figura 3.32. Variación del oxígeno de saturación con la temperatura y la altura sobre el nivel del mar	3.114
Figura 3.33. Constante A - Cálculo Índice de Langelier	3.117
Figura 3.34 Constante B, Cálculo del Índice de Langelier.....	3.117
Figura 3.35. Variación de los parámetros <i>in situ</i>	3.120
Figura 3.36. Variación de los parámetros <i>in situ</i>	3.121
Figura 3.37. Variación de los parámetros fisicoquímicos	3.123
Figura 3.38. Arreglo de las variables en los componentes CP1 y CP2.....	3.138
Figura 3.39. Arreglo de las estaciones según sus coordenadas en CP1 y CP2	3.139
Figura 3.40. Arreglo de las variables en los componentes CP2 y CP3.....	3.140
Figura 3.41. Arreglo de las estaciones según sus coordenadas en CP2 y CP3	3.141



Figura 3.42. Curva de acumulación de especies definida a partir de los resultados de las quince estaciones de muestreo.....	3.145
Figura 3.43. Curva de rarefacción de especies definida a partir del conteo de 30 campos al microscopio.....	3.146
Figura 3.44. Perfil de abundancia relativa: pi (basado en el biovolumen celular medio) registrado por los taxones.....	3.153
Figura 3.45. Análisis de agrupamiento espacio-temporal - Índice de similitud de Bray-Curtis. 3.158	
Figura 3.46. Variación del biovolumen y del número de organismos por unidad de volumen en cada estación.	3.160
Figura 3.47. Variación del número de taxones y del número de organismos por unidad de área en cada estación.....	3.160
Figura 3.48. Número total de individuos encontrados en cada estación.....	3.171
Figura 3.49. Riqueza y abundancia en el Río Cauca y otras corrientes de la zona de estudio 3.172	
Figura 3.50. Histogramas de distribución de abundancia en el río Cauca y otras corrientes de la zona de estudio	3.173
Figura 3.51 Logaritmo de la abundancia de las familias de macroinvertebrados en las estaciones de muestreo	3.181



Tabla 3.1. Información de las galerías exploratorias	3.2
Tabla 3.2. Principales características de las perforaciones.	3.2
Tabla 3.3 Fotografías aéreas utilizadas	3.9
Tabla 3.4 Cubrimiento del catálogo	3.29
Tabla 3.5. Clasificación de la actividad de las fallas	3.34
Tabla 3.6 Aceleraciones máximas a nivel de roca (PGA) y Aceleración Espectral para 1.0 segundo	3.35
Tabla 3.7 Atributos para estimar la probabilidad de ocurrencia de sismicidad producida por el llenado del embalse	3.38
Tabla 3.8. Calidad del macizo rocoso en las galerías exploratorias.	3.42
Tabla 3.9 Categorías fisiográficas del área de estudio	3.45
Tabla 3.10 Relación zonas de vida – regiones climáticas	3.46
Tabla 3.11 Asociaciones de suelos en el área de estudio	3.48
Tabla 3.12. Descripción del perfil del suelo en la asociación Ituango	3.49
Tabla 3.13. Descripción del perfil de suelo en la asociación Raudal	3.50
Tabla 3.14. Descripción del perfil de suelo en la asociación Calderas	3.51
Tabla 3.15. Descripción del perfil de suelo en la asociación Santa Bárbara	3.52
Tabla 3.16. Descripción del perfil del suelo en la asociación Concordia	3.54
Tabla 3.17. Descripción del perfil del suelo en la asociación Concordia	3.55
Tabla 3.18. Descripción del perfil del suelo en la asociación Tuntuna	3.56
Tabla 3.19. Descripción del suelo en la asociación Tarazá	3.57
Tabla 3.20. Características fisicoquímicas de las clases agrológicas en el área de estudio	3.58
Tabla 3.21. Usos potenciales de las clases agrológicas	3.58



Tabla 3.22 Paisajes identificados a partir del estudio de suelos y el mapa de coberturas vegetales.	3.63
Tabla 3.23. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z1.	3.68
Tabla 3.24. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z2.	3.69
Tabla 3.25 Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z3.	3.71
Tabla 3.26 Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z4.	3.73
Tabla 3.27. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z5.	3.76
Tabla 3.28. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z6.	3.76
Tabla 3.29. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z7.	3.78
Tabla 3.30. Índices ecológicos a nivel de paisaje para las coberturas encontradas en el Paisaje Z8.	3.80
Tabla 3.31 Características generales de las estaciones	3.82
Tabla 3.32 Caudales característicos del río Cauca para el período 1984-2000	3.83
Tabla 3.33 Rendimiento de los caudales característicos	3.89
Tabla 3.34 Estaciones y períodos para la estimación de crecientes máximas	3.89
Tabla 3.35 Estaciones y períodos para la estimación de caudales mínimos	3.91
Tabla 3.36 Estaciones y períodos para el análisis de niveles	3.92
Tabla 3.37 Variación de niveles del río en las distintas estaciones	3.93
Tabla 3.38 Influencia de la curva de calibración en los caudales y niveles característicos del río Cauca.	3.95
Tabla 3.39. Principales islas-barreras existentes en el año 1961	3.101
Tabla 3.40 Cuadro Resumen del Transporte Anual estimado.	3.105



Tabla 3.41	Transporte anual de sedimentos desagregado por tamaños de partículas 3.106	
Tabla 3.42	Ubicación de los puntos de muestreo	3.107
Tabla 3.43	Descripción de los sitios de muestreo	3.108
Tabla 3.44	Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados	3.110
Tabla 3.45	Factores de ponderación NSF (tomada de http://www.nsf.org)	3.111
Tabla 3.46.	Clasificación de calidad del agua en función del índice NSF	3.113
Tabla 3.47.	Índices de Calidad Ambiental para cada parámetro	3.114
Tabla 3.48.	Ponderación de Parámetros del ICA Objetivo (ICAOBJ)	3.115
Tabla 3.49.	Rangos para el valor ($ICA_{objetivo}$)	3.115
Tabla 3.50.	Resultados de los parámetros microbiológicos	3.116
Tabla 3.51	Criterios de calidad admisible según su uso	3.118
Tabla 3.52	Niveles de calidad de agua establecidos para la potabilización de fuentes superficiales (Tomada del RAS 2000, numeral B.3.3.2.1)	3.119
Tabla 3.53.	Resultados de los parámetros medidos <i>in situ</i>	3.120
Tabla 3.54	Resultados de los parámetros Fisicoquímicos en Laboratorio (Los resultados se presentan en mg/l excepto para Turbiedad (NTU))	3.122
Tabla 3.55	Resultados de los parámetros microbiológicos	3.128
Tabla 3.56.	Índices calidad NFS-WQI, ICAObj, Langelier y clasificación de afluentes	3.128
Tabla 3.57	Uso recomendado y clasificación de los afluentes	3.129
Tabla 3.58.	Datos de calidad de agua manipulados para realizar el ACP	3.135
Tabla 3.59.	Valores obtenidos de varianza explicada para los cuatro primeros CP	3.136
Tabla 3.60.	Valores de coeficientes y aportes de las variables (loadings)	3.137
Tabla 3.61.	Valores de referencia de algunas variables fisicoquímicas en ecosistemas comparables al del proyecto	3.139
Tabla 3.62.	Clasificación general de las algas perifíticas	3.149



Tabla 3.63. Abundancias totales de algas perifíticas (ind/ml)	3.150
Tabla 3.64. Fórmula de biovolumen elegida para cada taxón.	3.150
Tabla 3.65. Abundancias totales del biovolumen celular medio ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$) por taxón.	3.151
Tabla 3.66. Densidades totales por estación.	3.159
Tabla 3.67. Registros de los índices de diversidad, equidad, dominancia.	3.162
Tabla 3.68. Índice biótico BMWP para Colombia (tomado de Roldán, 2003)	3.166
Tabla 3.69. Clases de calidad, valor y significado ambiental del índice BMWP/Colombia (Roldán, 2003)	3.167
Tabla 3.70. Muestreo de macroinvertebrados en área de estudio	3.167
Tabla 3.71. Índice de calidad BMWP para el Río Cauca y otras corrientes	3.178
Tabla 3.72. Atributos de la comunidad de macroinvertebrados	3.179
Tabla 3.73. Concesiones existentes en los municipios del área de estudio	3.183
Tabla 3.74. Usos del agua en la zona de influencia	3.185
Tabla 3.75. Principales usos de las fuentes de agua en la zona	3.187
Tabla 3.76. Valores totales mensuales de precipitación Estación Sabanalarga	3.191
Tabla 3.77. Valores máximos mensuales de precipitación Estación Sabanalarga	3.192
Tabla 3.78. Valores totales mensuales de precipitación Estación El Oro	3.193
Tabla 3.79. Valores promedio de precipitación (mm) para la Zona 2.	3.195
Tabla 3.80. Valores mensuales de precipitación en la estación La Granja, Municipio de Ituango.	3.195
Tabla 3.81: Valores mensuales de precipitación en la estación Santa Rita, Municipio de Ituango.	3.196
Tabla 3.82. Promedio Anual de Lluvias	3.197
Tabla 3.83. Resultados del monitoreo de material particulado, condiciones climáticas y observaciones del punto 1	3.200
Tabla 3.84. Resultados del monitoreo de material particulado, condiciones climáticas y observaciones del punto 2	3.200



Tabla 3.85. Resultados del monitoreo de material particulado, condiciones climáticas y observaciones del punto 3	3.201
Tabla 3.86. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio	3.201
Tabla 3.87. Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia	3.202
Tabla 3.88. Normas a condiciones locales	3.202
Tabla 3.89. Categoría ambiental definida para el PSI material particulado en suspensión 3.203	
Tabla 3.90. Categoría ambiental definida para el PSI material particulado en suspensión 3.203	
Tabla 3.91 Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental, expresados en decibeles db(a)	3.208
Tabla 3.92. Caracterización de los puntos monitoreados	3.209
Tabla 3.93. Localización de los puntos de monitoreo	3.212
Tabla 3.94. Ubicación de los Puntos de Monitoreo	3.213
Tabla 3.95. Ponderación mediciones ruido ambiental horario diurno en semana	3.215
Tabla 3.96. Ponderación mediciones ruido ambiental horario diurno en domingo	3.215
Tabla 3.97. Ponderación mediciones ruido ambiental horario nocturno en semana	3.215
Tabla 3.98. Ponderación mediciones ruido ambiental horario nocturno en domingo	3.215