



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

TESIS DE MAESTRÍA

**MODELO SOSTENIBLE DE EXPLOTACIÓN MINERA A PARTIR DE
LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
HIDROGEOMORFOLÓGICO DE UNA POZA DE DRAGADO Y SU
RECUPERACIÓN AMBIENTAL COMO FUTURA CIÉNAGA**

JHONNATHAN DÍAZ SANTACOLOMA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2013

**MODELO SOSTENIBLE DE EXPLOTACIÓN MINERA A PARTIR DE LA EVALUACIÓN
DEL COMPORTAMIENTO HIDROGEOMORFOLÓGICO DE UNA POZA DE DRAGADO
Y SU RECUPERACIÓN AMBIENTAL COMO FUTURA CIÉNAGA**

JHONNATHAN DÍAZ SANTACOLOMA

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Director:

Ph.D. en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
Jaime Ignacio Vélez Upegui

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia

2013

A mi Esposa y mis Padres

“En los momentos de crisis, sólo la imaginación es más importante que el conocimiento.”

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de la División Ambiental Corporativa de Mineros S.A y a la empresa consultora GMS Ingenieros Consultores S.A.S.

Agradezco especialmente a:

Dios por permitirme y darme las fuerzas necesarias en todo momento, por guiarme, y enseñarme en cada etapa de mi vida.

A mí esposa y a mi familia por su apoyo incondicional y su paciencia en todo momento.

Mi director de tesis el Doctor Jaime Ignacio Vélez, por su orientación y por su crítica siempre constructiva.

Mi jefe y amiga la Ingeniera Gloria J. Mejía por apoyarme y encaminarme en el tema de tesis, por su valiosa ayuda y sus conocimientos.

A los ingenieros de la División Ambiental de Mineros S.A., especialmente al Director el Ingeniero Carlos Mario Castaño, y a los Ingenieros de apoyo Carlos Cardona, Luis Felipe Castañeda, Diana Sernaitis, Carlos Ospina, por su apoyo y colaboración en todo momento.

A mis amigos, conocidos y demás que tuvieron de una u otra manera que ver en la colaboración de este trabajo.

RESUMEN

Ante la importancia que representa la minería para el desarrollo del país y dada la tendencia expansiva del sector, las empresas mineras requieren de herramientas que permitan diseñar un modelo de sostenibilidad. Esta investigación aborda el tema de la sostenibilidad de la minería de oro en ríos aluviales, teniendo como caso de estudio el río Nechí en la zona de explotación de la empresa Mineros S.A. El modelo aquí desarrollado se plantea desde la perspectiva de calidad de agua, hidráulica e hidrogeomorfología.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la sostenibilidad a largo plazo de las pozas artificiales usadas para la extracción del recurso mineral a partir de un modelo que permita que estos cuerpos de agua artificiales se recuperen y tengan propiedades similares a las de una ciénaga natural; esto se llevará a cabo a partir de información que amplíe el conocimiento de los conflictos generados por la actividad minera, además de permitir la estimación de los parámetros físicos y bióticos de mayor importancia, así como un conocimiento en la variación espacio-temporal de los sedimentos y de los parámetros hidráulicos que indiquen técnicas efectivas para el manejo de la ciénaga; y por último, considerar un estimativo del aumento de plantas acuáticas (macrófitas) como indicador de crecimiento de especies en la zona recuperada.

Las implicaciones para la recuperación y funcionamiento de un ecosistema, así como las medidas y el modelo de sostenibilidad son discutidos, y se dan algunas recomendaciones para las futuras operaciones mineras.

Palabras Clave: Sostenibilidad, restauración, hidrogeomorfología, explotación aluvial, minería.

ABSTRACT

In view of the importance that represents the mining for the development of the country and given the expansive trend in the sector, mining companies require tools that allow designing a model of sustainability, this research addresses the issue of the sustainability of gold mining in alluvial rivers, taking as a case study the Nechí River in the area of exploitation of the mining company, the following model arises from the perspective of water quality, hydraulics and hydrogeomorphology.

The main objective of this work is to assess the long-term sustainability of the artificial ponds used for the extraction of the mineral resource based on a model that allows these artificial water bodies are recovered and have properties similar to a natural wetland; This will be carried out based on information that provided to expand knowledge of the conflicts generated by mining activity, besides that allows the estimation of the physical and biotic parameters of greater importance, as well as a knowledge of the variation time-space of sediments and the hydraulic parameters that indicate effective techniques for the management of the wetland, and last whereas an estimated increase of aquatic plants (Macrophytes) as an indicator of growth of species in the reclaimed area.

The implications for recovery and function of an ecosystem, as well as the measures and sustainability model are discussed, and are given some recommendations for future mining operations.

Keywords: Sustainability, restoration, hydrogeomorphology, alluvial exploitation, mining.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ALCANCES Y DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO	2
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1 MINERÍA EN COLOMBIA E IMPACTOS AMBIENTALES.....	5
2.2 GENERALIDADES DE LAS CIÉNAGAS.....	8
2.3 CALIDAD DEL AGUA EN CIÉNAGAS	11
2.4 RESTAURACIÓN HIDROGEOMORFOLÓGICA Y RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE LAS CIÉNAGAS	12
2.5 CARACTERÍSTICAS Y ROL DE LAS PLANTAS ACUÁTICAS.....	15
2.6 ESTUDIOS EXISTENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	17
2.6.1 Estudios de Calidad del Agua y Limnológicos – Mineros S.A.	17
2.6.2 Estudios Hidrológicos e Hidráulicos – GMS Ingenieros Consultores S.A.S. ...	17
3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	19
3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	19
3.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
3.2.1 Objetivo General	21
3.2.2 Objetivos Específicos	21
3.2.3 Hipótesis	22
4. ÁREA DE ESTUDIO	25
4.1 GENERALIDADES	25
4.2 MODELO DE EXPLOTACIÓN AURIFERA ALUVIAL.....	30
4.2.1 Generalidades.....	31
4.2.2 Proceso de Explotación.....	32
4.2.3 Descripción del Proceso.....	34
5. METODOLOGÍA.....	37
5.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	37
5.1.1 Revisión de Literatura Técnica Existente e Información Secundaria	37
5.1.2 Información Obtenida	37
5.1.3 Campañas de Medición Limnología y Calidad de Agua.....	38
5.1.4 Campañas de Medición Hidráulica y Sedimentos.....	42
5.2 INDICES BIOLÓGICOS.....	46
5.3 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	47

5.4	DESARROLLO CONCEPTUAL DEL MODELO HIDRODINÁMICO Y DE SEDIMENTOS	48
5.5	IMPLEMENTACIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO	53
5.6	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	54
6.	RESULTADOS	55
6.1	HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	55
6.1.1	Información Disponible.....	55
6.1.2	Caracterización del Régimen de Precipitación	55
6.1.3	Análisis del Comportamiento de los Caudales Medios Mensuales en la Estación La Esperanza.....	56
6.2	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LAS POZAS EN FASE DE EXPLOTACIÓN Y RECUPERACIÓN	62
6.2.1	Variabilidad de los Parámetros Físicoquímicos – Fase en Operación	63
6.2.2	Variabilidad de los Parámetros Físicoquímicos – Fase de Restauración	68
6.3	ANÁLISIS HIDROGEOMORFOLÓGICO DE LAS POZAS DE EXPLOTACIÓN	73
6.3.1	Condiciones de Frontera para Modelación Hidráulica	74
6.3.2	Modelo Hidrodinámico y de Sedimentos – Escenario 1.....	84
6.3.3	Modelo Hidrodinámico y de Sedimentos – Escenario 2.....	88
6.3.4	Modelo Hidrodinámico y de Sedimentos – Escenario 3.....	92
6.4	EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS ACUÁTICAS (MACROFITAS)	97
7.	DISCUSIÓN.....	103
7.1	EFICIENCIA HIDRÁULICA Y POSIBLES IMPACTOS QUE PUEDAN DARSE POR LA SEDIMENTACIÓN DE LA POZA.....	103
7.2	COMPARACIÓN ENTRE LA ETAPA DE EXPLOTACIÓN Y LA ETAPA DE RECUPERACIÓN	104
7.3	COMPARACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA CIÉNAGA ARTIFICIAL EN RESTAURACIÓN CON UNA CIÉNAGA NATURAL	104
7.4	COMPARACIÓN BIOLÓGICA (MACROFITAS) DE LA CIÉNAGA ARTIFICIAL EN RESTAURACIÓN CON UNA CIÉNAGA NATURAL	109
7.5	RESTAURACIÓN DE LA ZONA DE EXPLOTACIÓN	115
8.	CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES	125
8.1	CONCLUSIONES	125
8.1.1	CALIDAD DE AGUA.....	125
8.1.2	HIDROGEOMORFOLÓGICO Y SEDIMENTOLÓGICOS	126
8.1.3	CRECIMIENTO DE PLANTAS ACUÁTICAS	128
8.1.4	GENERALES	128
8.2	RECOMENDACIONES.....	130
8.3	FUTURAS INVESTIGACIONES	131
9.	BIBLIOGRAFÍA	135

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1: Conflictos de la Zona Minera.....	7
Figura 2-2: Tipos de Ciénagas de Origen Fluvial (Modificada de Arias, 1985)	11
Figura 2-3: Escalas y Condiciones de las Macrófitas Acuáticas	16
Figura 4-1: Localización del Valle del Río Nechí. Tomado de Ortega (2006).....	25
Figura 4-2: Localización de la UP-2 – Poza en Operación	27
Figura 4-3: Localización de la Ciénaga Pujador – Poza en Restauración.....	28
Figura 4-4: Batimetría Poza en Operación UP-2	30
Figura 4-5: Draga de Explotación Minera en las Llanuras Aluviales del Río Nechí	31
Figura 4-6: Exploración y Definición de Bloques de Reserva	32
Figura 4-7: Proceso de Explotación en la Llanura del río Nechí, Vista de Sección Transversal (Arriba) y Vista en Planta (Abajo)	33
Figura 4-8: Modelo de Elevación del Terreno (MDT) del Área de Operación.....	35
Figura 5-1: Canal de Entrada UP-2	42
Figura 5-2: Poza en Recuperación.....	42
Figura 5-3: A) Triangulo 6 Nodos, B) Cuadrilátero 8 Nodos al Azar, C) Cuadrilátero 9 Nodos de Lagrange	49
Figura 5-4: Velocidad Promedio en X.....	50
Figura 5-5: Modelo Esquemático de Composición del Lecho.	53
Figura 6-1: Distribución de Precipitación Promedio Mensual – Estación La Esperanza 56	56
Figura 6-2: Distribución del Caudal Promedio Mensual – Estación La Esperanza.....	57
Figura 6-3: Hidrógrafa de los Caudales Medios Mensuales de la Estación La Esperanza	59
Figura 6-4: Tramo del río Nechí que se Utilizó para Determinar los Niveles a la Entrada de la UP-2	60
Figura 6-5: Sección del Río Nechí – Canal de Entrada UP-2	61
Figura 6-6: Variación del pH para la Poza de Explotación UP-2.....	64
Figura 6-7: Variación de la Temperatura para la Poza de Explotación UP-2	64
Figura 6-8: Variación de la Turbiedad para la Poza de Explotación UP-2.....	64
Figura 6-9: Variación del Oxígeno Disuelto para la Poza de Explotación UP-2	64
Figura 6-10: Variación de la Conductividad Eléctrica para la Poza de Explotación UP-2 66	66
Figura 6-11: Variación de los SST para la Poza de Explotación UP-2.....	66
Figura 6-12: Variación del DBO ₅ para la Poza de Explotación UP-2.....	66
Figura 6-13: Variación del pH para la Ciénaga Artificial Pujador	69
Figura 6-14: Variación de la Temperatura para la Ciénaga Artificial Pujador	69

Figura 6-15:	Variación del Oxígeno Disuelto para la Ciénaga Artificial Pujador	69
Figura 6-16:	Variación de la Conductividad Eléctrica para la Ciénaga Artificial Pujador 69	
Figura 6-17:	Variación de los SST para la Ciénaga Artificial Pujador	71
Figura 6-18:	Variación del DBO ₅ para la Ciénaga Artificial Pujador	71
Figura 6-19:	Variación del Fósforo Total para la Ciénaga Artificial Pujador	71
Figura 6-20:	Discretización de la Malla en Elementos Finitos – Escenario 1	76
Figura 6-21:	Discretización de la Malla en Elementos Finitos – Escenario 2	77
Figura 6-22:	Discretización de la Malla en Elementos Finitos – Escenario 3	78
Figura 6-23:	Batimetría Inicial – Escenario 1	79
Figura 6-24:	Batimetría Inicial – Escenario 2	80
Figura 6-25:	Batimetría Inicial – Escenario 3	81
Figura 6-26:	Variación de la Velocidad	85
Figura 6-27:	Variación de la Profundidad	85
Figura 6-28:	Cambios Morfológicos en el 1 Año de Restauración	87
Figura 6-29:	Cambios Morfológicos en el 5 Año de Restauración	87
Figura 6-30:	Variación de la Velocidad	89
Figura 6-31:	Variación de la Profundidad	89
Figura 6-32:	Cambios Morfológicos en el 1 Año de Restauración	91
Figura 6-33:	Cambios Morfológicos en el 5 Año de Restauración	91
Figura 6-34:	Variación de la Velocidad	93
Figura 6-35:	Variación de la Profundidad	93
Figura 6-36:	Cambios Morfológicos en el 1 Año de Restauración	95
Figura 6-37:	Cambios Morfológicos en el 5 Año de Restauración	95
Figura 6-38:	Cambios Morfológicos en el 10 Año de Restauración	96
Figura 6-39:	Cobertura Estimada en Porcentaje de las Macrófitas más Abundantes en la Ciénaga Artificial Pujador	99
Figura 6-40:	Variación del Porcentaje de Cobertura de Macrófitas para los Años de Registro 100	
Figura 6-41:	Variación de los Índices Ecológicos en la Ciénaga Pujador	101
Figura 7-1:	Localización de la Ciénaga Natural Carreto	105
Figura 7-2:	Aspecto General de la Ciénaga Natural Carreto.....	106
Figura 7-3:	Variación del pH para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto	107
Figura 7-4:	Variación de la Temperatura para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto 107	
Figura 7-5:	Variación del Oxígeno Disuelto para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto 107	
Figura 7-6:	Variación de la Conductividad Eléctrica para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto	107
Figura 7-7:	Variación de los SST para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto	108
Figura 7-8:	Variación del DBO ₅ para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto	108
Figura 7-9:	Variación del Fósforo Total para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto 108	

Figura 7-10: Cobertura Estimada en Porcentaje de las Macrófitas más Abundantes en la Ciénaga Natural Carreto	111
Figura 7-11: Variación de los Índices Ecológicos en la Ciénaga Carreto	112
Figura 7-12: Abundancia de la Cobertura.....	113
Figura 7-13: Eleocharis Acutangula.....	114
Figura 7-14: Eichornia Azurea.....	114
Figura 7-15: Oxycarium Cubense.....	114
Figura 7-16: Ludwigia sp1	114
Figura 7-17: Relación de Categorías y sus Divisiones (Vargas, Orlando).....	117
Figura 7-18: Secuencia de la Restauración de Cargueros (Explotación, Restitución Morfológica y Reforestación)	122

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 5-1: Límites de Concentración para Diferentes Estados de Eutrofización en Ecosistemas.....	41
Tabla 6-1: Localización Estación Pluviométrica y Limnigráfica La Esperanza - IDEAM	55
Tabla 6-2: Caudales Medios Mensuales - Estación La Esperanza (Río Nechí)	58
Tabla 6-3: Niveles de la Superficie del Agua a la Entrada de la Poza UP-2.....	61
Tabla 6-4: Caudales Calibrados a la Entrada de la Poza UP-2	62
Tabla 6-5: Resumen de los Parámetros Fisicoquímicos en los Canales de Entrada y Salida – Fase en Operación.....	63
Tabla 6-6: Resumen de los Parámetros Fisicoquímicos en la Ciénaga Artificial Pujador – Fase en Restauración.....	68
Tabla 6-7: Resumen de los Porcentajes de Cobertura en la Ciénaga Artificial Pujador – Fase en Restauración.....	98
Tabla 7-1: Resumen de los Parámetros Fisicoquímicos en la Ciénaga Natural Carreto	106
Tabla 7-2: Resumen de los Porcentajes de Cobertura en la Ciénaga Natural Carreto	110
Tabla 7-3: Resumen de los Índices Ecológicos en la Ciénaga Artificial y la Ciénaga Natural en Estudio	115

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda en el sector de la minería en Colombia durante los últimos años, ha generado un incremento en la extracción de los recursos naturales no renovables. Sin embargo, en la actualidad nos estamos enfrentando a una serie de problemas ambientales generados en la explotación inadecuada ocasionada en la mayoría de veces por el escaso conocimiento de metodologías que permitan un desarrollo sostenible entre el hombre y el medio ambiente.

A menudo se plantea el argumento que el concepto de desarrollo sustentable es incompatible con la industria extractiva de minerales y que la minería en cualquier forma no es sustentable. Si se acepta que el bienestar y progreso de la especie humana es una causa valiosa, entonces estamos moralmente obligados a considerar el asunto del desarrollo sustentable en todos los aspectos de nuestras vidas. Pero ¿qué significa “desarrollo sustentable” en general y específicamente para la industria minera?

Es importante destacar en cuanto al tema de sostenibilidad se refiere, que la disposición general de la ley 685 de 2001, código de Minas Colombiano, indica que la explotación de los recursos mineros es para satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y para que su aprovechamiento se realice en forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país.

Mientras que muchos sistemas están siendo destruidos debido al incremento de inundaciones, a la pérdida de vida animal y del hábitat, y a la erosión y deterioro de la calidad del agua; muchas ciénagas artificiales están siendo creadas con el fin de utilizar sus funciones y servicios para comida y producción de energía o como tratamiento de aguas.

En cuanto a los humedales artificiales se refiere, se puede decir que estos son creados por los humanos para el beneficio de sus funciones y servicios, por ejemplo en la producción de energía y alimentos o como sistemas de tratamiento de aguas residuales. También puede ser el resultado de actividades como la minería. En zonas mineras los humedales o pozas son creados para abastecer agua en el proceso minero o también pueden ser el resultado de excavaciones abandonadas. Con el tiempo estas pozas pueden convertirse en sumideros de los residuos mineros o de desechos peligrosos, razón por la cual tradicionalmente han sido vistos como reservorios de contaminantes (Bradshaw and Hüttl, 2001). Sin embargo, el interés general por restaurar las funciones ecosistémicas en sitios degradados por la minería se ha incrementado, incluyendo aquellas funciones que provienen de los ecosistemas de humedal que han sido creados en los procesos de extracción minera.

Las fuentes principales de información para la realización de este trabajo fueron los datos proporcionados por la División Ambiental Corporativa de Mineros S.A. y los estudios realizados por la empresa consultora GMS Ingenieros Consultores S.A.S.

Los principales resultados esperados de esta tesis permitirán conocer si este tipo de explotación minero aluvial es sostenible a largo plazo, evaluando los cambios en los parámetros de mayor importancia desde la fase de operación o explotación hasta su restauración; este trabajo constituye un reto científico y profesional, ya que uno de los objetivos de la empresa Mineros S.A., es demostrar la compatibilidad de la actividad minera con la conservación del medio ambiente.

1.1 ALCANCES Y DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO

La metodología del proyecto de tesis formuló la descripción de las siguientes actividades discriminadas por capítulos:

El Capítulo 1 contiene una introducción general y la importancia del desarrollo de esta investigación, incluye además los alcances y la descripción del documento.

El Capítulo 2 contiene el estado del arte, el cual aborda los antecedentes en el tema de sostenibilidad minera aluvial, así como los antecedentes en cada uno de las etapas que conformaron el desarrollo de la propuesta de tesis, además contiene una síntesis de los estudios existentes en la zona y que contienen la información requerida para la elaboración de este proyecto.

El Capítulo 3 contiene el planteamiento del problema de investigación y su justificación, incluyendo los objetivos generales y específicos a desarrollarse, y las hipótesis iniciales que se tienen.

En el Capítulo 4 se abordan las generalidades de la zona de estudio, y la descripción del modelo de explotación llevado a cabo en esta zona del país.

El Capítulo 5 contiene la recopilación de la información, la metodología empleada para el desarrollo de la tesis, el análisis y procesamiento de la información, así como la metodología de la simulación hidráulica.

El Capítulo 6 muestra los resultados obtenidos en cada una de sus etapas, dentro de las cuales están la caracterización hidrológica de la zona de estudio, la evaluación de la calidad del agua considerando un análisis fisicoquímico en la etapa de operación y de restauración. Posterior a esto se muestra el análisis de la restauración hidrogeomorfológica, considerando los resultados obtenidos del modelo matemático empleado para la simulación hidráulica y de sedimentos en las pozas. Finalmente se tienen los resultados obtenidos en el análisis de las coberturas de las plantas acuáticas.

El Capítulo 7 contiene una discusión sobre los resultados obtenidos en cada una de sus etapas, evaluando los posibles impactos por la sedimentación de la poza, y validando los resultados con ciénagas naturales.

El Capítulo 8 se dan las conclusiones finales del trabajo de investigación, y las recomendaciones para futuras investigaciones.

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 MINERÍA EN COLOMBIA E IMPACTOS AMBIENTALES

El oro ha jugado un papel muy importante a lo largo de la historia del hombre, ya que lo han apreciado y utilizado por sus características de maleabilidad, de belleza y de patrón monetario.

En Colombia, la importancia del oro está en el sector minero y en la economía nacional, donde ha tenido una participación importante desde 1974, porque se acoge la medida de pagar el oro a precio internacional del mercado libre. A nivel nacional aumentó su producción, lo cual tuvo una repercusión inmediata en la generación de reservas internacionales y en Colombia una gran demanda industrial y artística.

Según la Fundación Universitaria Agraria de Colombia (2004), la producción registrada en el país apenas alcanza ser aproximadamente el 2% de la producción mundial. A pesar de la larga trayectoria de explotación que ha tenido el oro en Colombia, se afirma que los avances de exploración, prospección, explotación y beneficio permitirán aprovechar depósitos auríferos que han permanecido inexplorados. Nuevas posibilidades tecnológicas, en cuanto a maquinaria y organización de la producción y conocimiento geológico, podrían posibilitar el aumento en la producción de mediana y pequeña escala.

El sector aurífero se ha convertido en uno de los principales rubros de exportación y uno de los mayores canalizadores de la inversión directa. Durante los últimos meses se ha intensificado el boom de inversión y exploración de oro en el país, Colombia es el productor 20 en el mundo pero aún es un jugador pequeño, el gran reto para seguir

avanzando es convertir el crecimiento del oro en una fuente de progreso teniendo en cuenta el desarrollo sostenible de los recursos ambientales. (Portal Minero Colombia, 2011).

El organismo de Recursos Naturales de Canadá (2001) “ve en el desarrollo sustentable, la integración de consideraciones ambientales, económicas y sociales, como la clave para asegurar el mantenimiento de la calidad de vida y continuación de la creación de empleo, sin comprometer la integridad del ambiente natural o la habilidad de generaciones futuras para cubrir sus propias necesidades”.

Por otro lado, cuando se considera la sustentabilidad de la industria minera, la opción de prohibir la minería no es una consideración real, pero todas las otras facetas de la industria deben ser revisadas. La sustentabilidad de la industria minera descansa en tres bases que incluye aspectos económicos, ambientales y sociales (Mining Journal, 2000). Cada uno de estos aspectos debe ser considerado por separado, aunque una solución sustentable requiere una integración global de ellos. Además para que la sustentabilidad sea real se requiere de una cuarta base que son las políticas gubernamentales.

Sin un desarrollo sustentable en la industria minera, el potencial de los impactos ambientales que pueden ocurrir debido a las actividades mineras pueden ser los siguientes: erosión y sedimentación, elementos químicos como el mercurio presentes en el agua, emisiones de polvo, modificación del hábitat, alteración del terreno y alteración en el agua subterránea. Muchos de estos impactos ambientales son posiblemente minimizados como resultado de un buen diseño, operación y regulación de las operaciones de la mina. (Montana State University, 2011)

Es importante mencionar que los recursos minerales se enfrentan a un conflicto entre los distintos intereses y demandas sociales que se plantean sobre estos bienes (**Figura 2-1**). Sobresalen los intereses del sector minero por explotar tales recursos; los del Estado como propietario del subsuelo y regulador de la explotación minera; y los de la comunidad que tiene una identidad propia con los recursos y ve en su extracción, además de un medio de subsistencia, una acción predatoria de la base natural de su territorio. Por añadidura, existen intereses por parte de grupos al margen de la ley que pugnan por su control y explotación. (Ortega, 2006).

Se establece también que de la relación entre la minería y el ambiente surgen otro tipo de conflictos: los de los impactos que afectan al medio natural y socioeconómico, los conflictos entre el suelo y el subsuelo, los cuales se presentan entre los usos actuales o proyectivos del suelo y el potencial geo-minero. En este caso, el nivel de conflictividad es mayor cuando zonas con importante potencial minero se traslapan con territorios indígenas o de comunidades negras; áreas de manejo especial como los parques nacionales naturales; y centros poblados; entre otros.

Finalmente, es relevante mencionar que la resolución de algunos conflictos, como el que se presenta entre la minería y los humedales, se dificulta por la incoherencia entre la normatividad minera y la legislación ambiental y territorial. De igual manera, la desarticulación institucional entre el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible obstaculiza la resolución de conflictos de Intereses.

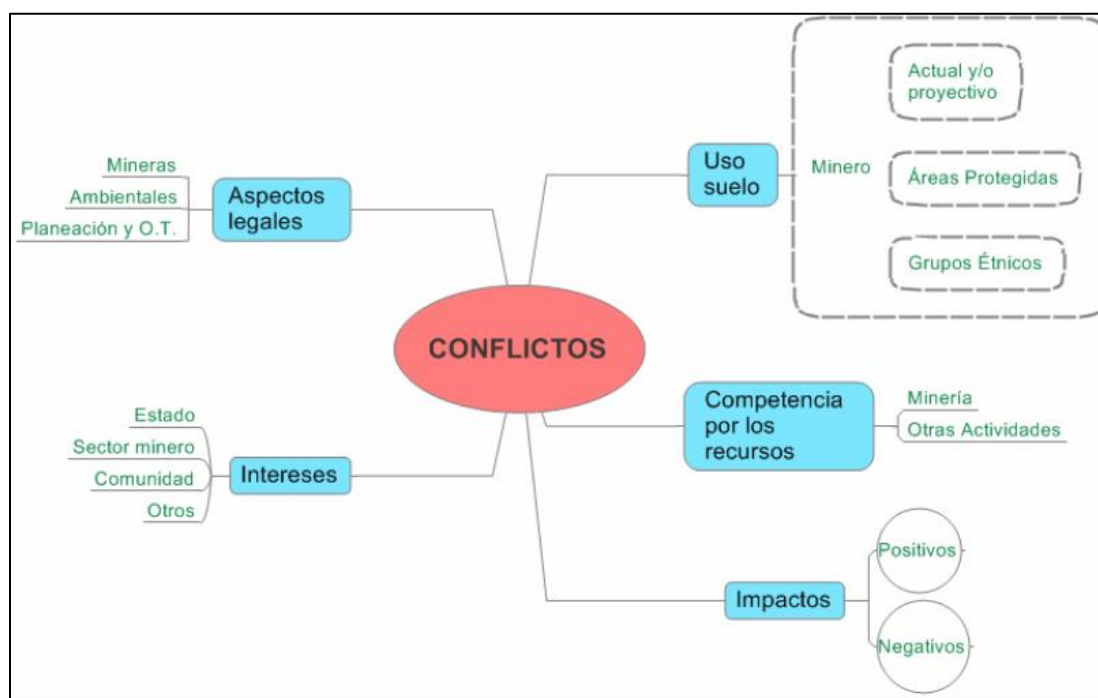


Figura 2-1: Conflictos de la Zona Minera

2.2 GENERALIDADES DE LAS CIÉNAGAS

Según The Ramsar Convention on Wetlands (Ramsar, 2011), las ciénagas son áreas donde el agua es el primer factor que controla el medio ambiente y la asociación de plantas y vida animal. En el Artículo 1.1 del texto de la convención las ciénagas son definidas como:

“Áreas de humedal, pantanos, turberas o agua, ya sea natural o artificial, permanente o temporal, con el agua en forma estática o en movimiento, ya sea de agua dulce, aguas salobres o saladas, incluyendo áreas de agua marina con profundidades que no excedan los 6 metros en nivel bajo.” (Ramsar, 2007)

Existen 5 tipos de ciénagas generalmente reconocidas:

- Marinas (Ciénagas costeras incluyendo lagos costeros y arrecifes de coral)
- Estuarinas (Incluyendo deltas, marismas y manglares)
- Lacustres (Ciénagas asociadas con lagos)
- Riverañas (Ciénagas a lo largo de ríos y corrientes); y
- Palustres (Es decir “pantanosos” – marismas, pantanos y turberas.

Según Mitsch and Gosselink (2007), las ciénagas naturales han sido reconocidas como componentes clave de los terrenos donde en la mayoría de los casos sirven de control de flujo de los ríos, además juegan un papel importante en la retención de agua durante tormentas, hábitat, y mejoras de la calidad del agua.

Estos ecosistemas a lo largo del mundo son los de alta relevancia científica y económica, considerados entre los de mayor productividad primaria del planeta, pues sirven de sustento a poblaciones importantes de la cadena trófica. Hay un sin número de diversidad biológica, lo cual provee agua y productividad primaria con una gran cantidad de especies de plantas y animales dependiendo de su supervivencia. Las ciénagas son de gran importancia también en plantas de material genético, como el arroz, por ejemplo, que es

una planta de ciénaga común y es el alimento básico de más de la mitad de la humanidad. (Ramsar, 2007)

Esta productividad se explica por una elevada dinámica física y por la coexistencia de comunidades vegetales con alta eficiencia fotosintética, constituyéndose en fuente de gran diversidad biológica (Conde y Bonilla, 2002). En condiciones ecuatoriales esta productividad es mayor, debido a la mayor radiación solar y a temperaturas que aceleran los procesos químicos y biológicos.

Los servicios ambientales de los humedales se pueden resumir en tres grandes categorías: Suministro de agua para diferentes usos, suministro de biomasa y suministro de beneficios no extractivos como la recreación y el transporte, entre otros (Postel y Carpenter, 1997).

En cuanto al comportamiento hidrológico, la ciénaga depende en gran medida de las variables hidrológicas locales, como de las actividades que tenga el ser humano sobre estas. Las ciénagas dependen en gran medida, de la relación hidráulica entre ésta y el río, además la carga de sedimentos y calidad del agua están supeditados por esta relación, la cual, a su vez, depende de la estacionalidad de las condiciones hidrológicas de la zona. Las ciénagas pueden ser creadas si se tienen las condiciones hidrológicas correctas, crearlas con la hidrología apropiada se puede desarrollar una biota apropiada (Ej. Plantas de ciénaga) y físico-química (Ej. Suelos hídricos) relativamente rápido sin necesidad de hacer plantaciones (Mitsch et al., 2005).

Las ciénagas que conciernen a esta investigación son artificiales localizadas en zonas riverseñas, por lo cual se encuentra dentro de lo establecido por la convención Ramsar. Sin embargo, se debe aclarar que los cuerpos cenagosos resultantes de la explotación minera alcanzan profundidades mayores a las esperadas según Ramsar.

Las ciénagas en la mayor parte del mundo continúan siendo vulnerables a procesos antrópicos y climáticos, en los que la influencia de los procesos hidrológicos e hidrogeomorfológicos mantienen el equilibrio del estado dinámico de las ciénagas. (Riddell et al., 2010), para los investigadores es de vital importancia cuantificar la relación

entre los patrones ecológicos y los mecanismo hidrogeomorfológicos de la ciénaga (Zhou et al., 2008).

Ducharmé (1975) y Arias (1985), describieron los aspectos relacionados con la formación de ciénagas de origen fluvial en Colombia, sus características físicas y químicas, y su papel biológico y ecológico. Las ciénagas son cuerpos de agua localizados en depresiones poco profundas (no sobrepasan los 5m de profundidad) y conectadas al río mediante estrechos canales meandriformes y paleocanales. Se localizan sobre terrenos de baja altitud (0 a 1000 msnm) por lo que su temperatura es propia de climas cálidos.

Estas se forman por acción inundante del río sobre tierras bajas adyacentes y por continua acción erosiva, que origina brazos que eventualmente se convierten en ciénagas y permanecen unidas al río por uno o más caños.

Arias (1985) clasifica las ciénagas en cuatro tipos (**Figura 2-2**):

- Una ciénaga simple y primaria conectada directamente al río.
- Conjunto o racimo de ciénagas, consistente en una primaria conectada directamente al río y una o más ciénagas secundarias conectadas directa o indirectamente a la primaria.
- Una ciénaga primaria conectada indirectamente al río.
- Una ciénaga aislada sin conexión con el río.

Por su naturaleza misma, las ciénagas son ecosistemas altamente dinámicos, sujetos a una amplia gama de factores naturales que determinan su modificación en el tiempo, aun en ausencia de factores de perturbación. Aunque se reconoce su valor para la protección de la pesca y fauna silvestre en general, otros beneficios no se habían identificado sino hasta hace poco tiempo (Benjumea y Wills, 2007).

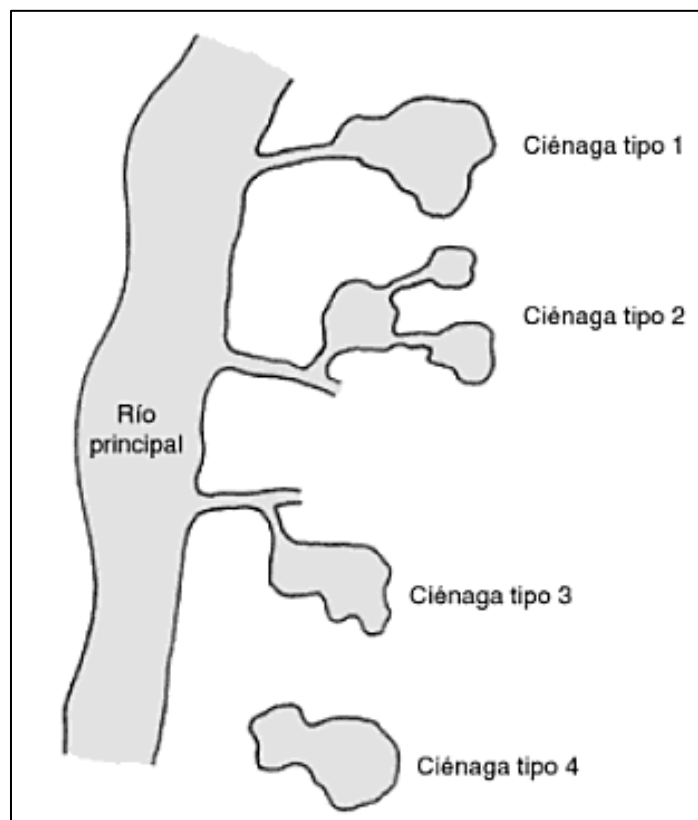


Figura 2-2: Tipos de Ciénagas de Origen Fluvial (Modificada de Arias, 1985)

Atributos como las condiciones topográficas, edáficas e hidrológicas son continuamente moldeados por procesos como la desecación y la sedimentación en las ciénagas. En estos sistemas las condiciones químicas y biológicas varían gradualmente por la acumulación de materia orgánica en la zona de captación, las cuales modifican la dinámica ecológica del sistema, determinando los valores y servicios ambientales del mismo. (Naranjo et al., 1999)

2.3 CALIDAD DEL AGUA EN CIÉNAGAS

Los científicos reconocen las ciénagas como recursos naturales importantes, ya que proveen valores a la sociedad, que van desde la calidad ambiental hasta beneficios socio-económicos en pesca y hábitat de la zona. Además mencionan que las ciénagas creadas y restauradas tienen alto potencial para reemplazar la superficie perdida y mejorar los

problemas de los ecosistemas, incluyendo el exceso de descarga de nutrientes y sólidos, regulación de los flujos hídricos durante épocas de inundaciones, retención de sedimentos y pérdida del hábitat. (Montgomery and Eames, 2008)

La degradación de la calidad del agua en las ciénagas ha sido evidente desde hace décadas, sobre todo en las ciénagas o humedales situados en las proximidades de las ciudades y asentamientos humanos. La calidad del agua posee impactos considerables en la biota acuática, en la salud pública y en la calidad del agua subterránea (Chandra et al., 2010), además en la mayoría de los casos las pozas artificiales mineras han sido vistas como reservorios de polutantes y contaminantes. (Bradshaw and Hüttl, 2001)

Diversos contaminantes, que van desde la demanda de oxígeno por contaminantes orgánicos, los nutrientes y los metales pesados, desempeñan un papel importante en la degradación de los humedales. Estos contaminantes posteriormente afectan directamente la capacidad de autorregulación, la capacidad de amortiguación y los habitantes bióticos.

Según Montgomery and Eames (2008) en su artículo ilustran la necesidad de incorporar la calidad del agua dentro del planeamiento, monitoreo y diseño en la restauración de las ciénagas. Por tanto se evaluará la calidad del agua en las ciénagas de estudio ubicadas sobre el río Nechí, con el fin de analizar los cambios que han pasado durante los años de registro, desde la etapa de operación hasta la etapa de recuperación. Para ello se monitorearan las siguientes variables: pH, temperatura, turbiedad, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales y DBO₅.

2.4 RESTAURACIÓN HIDROGEOMORFOLÓGICA Y RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE LAS CIÉNAGAS

Recientemente, la restauración o creación de ciénagas, ha recibido gran atención debido a los múltiples servicios ambientales que ofrecen estos ecosistemas a nivel mundial. (Mitsch et al., 2005; Zedler and Kercher, 2005). Como los servicios ambientales provistos por las ciénagas han tenido más valoración (Moreno-Mateos & Comin, 2010; Li et al.,

2010), el número de proyectos de restauración y creación en todo el mundo ha incrementado anualmente.

Los procesos de restauración hidrogeomorfológica modifican los aspectos hidrológicos y geomorfológicos de las áreas intervenidas, que a su vez determinan el potencial biológico en términos de comunidades de organismos, como resultado de la modificación de las condiciones de hábitat (Cuhaciyán, 2008).

La restauración hidrogeomorfológica tiene en cuenta la estructura abiótica (referente al clima, suelo e hidrología) y la estructura biótica (flora y fauna), así como la función de los procesos ecológicos y la variabilidad del ecosistema, permitiendo caracterizar las diferencias entre el estado actual y las condiciones deseadas.

La morfología de las ciénagas comprende el estudio del origen y de la influencia de la forma sobre las características físicas, químicas y biológicas, trata de la cuantificación de los diversos elementos de forma o parámetros morfométricos, además comprende el conjunto de métodos para medir las dimensiones utilizadas para representar las medidas del sistema. (Roldán y Ramírez, 2008).

Persson et al. (1999) sugieren que para una buena práctica en la creación de las ciénagas es necesario tener en cuenta tres componentes de diseño principales, que son:

- La efectividad hidrológica;
- La eficiencia hidráulica; y
- La facilitación y optimización de los procesos de calidad de agua.

Los objetivos primarios de la restauración o creación de ciénagas son: calidad de agua, biodiversidad, control de flujo y recreación. (Zedler, 2000), sin embargo la mayoría de los estudios en restauración o creación de ciénagas tienen como enfoque principal las mejoras en la calidad del agua.

La restauración hidrogeomorfológica incluye una restauración ecológica, buscando llevar un ecosistema degradado o alterado a su condición inicial o a un estado cercano (Simmons et al., 2007). En el caso particular que compete a esta investigación, sería la restauración de una llanura de inundación que fue degradada debido a la explotación

minera aluvial y de la cual se pretende obtener una ciénaga que tenga una funcionalidad muy similar a la de una natural y que sea sostenible a largo plazo.

La comunidad científica ha notado que muchos problemas en el manejo de las ciénagas pueden ser atribuidos a unas características hidrodinámicas pobres (Jenkins, 2003). Al igual que la hidráulica la retención de sedimentos en una ciénaga se describe como beneficio en la calidad del agua (Fennesy et al., 1994), sin embargo una entrada excesiva de sedimentos provenientes de la erosión o de la explotación descontrolada en la zona puede crear un severo impacto en los cuerpos de agua.

Los impactos en la sedimentación incluyen incremento en la turbiedad, lo cual reduce la profundidad de la zona fótica e incrementa la caída de sedimentos lo que conlleva a cubrir a los productores primarios y los invertebrados. Los sedimentos pueden llegar a generar eventos catastróficos o graduales, las cuencas al estar muy afectadas por los sedimentos pueden llegar a bloquear totalmente el funcionamiento de las ciénagas (Wardrop and Brooks, 1998).

Los estudios actuales donde se hace creación o recuperación de ciénagas en zonas rivereñas, no consideran un canal de entrada con conexión al río para obtención del agua, sino que consideran una estación de bombeo para el llenado de la poza (Mitsch et al., 2005); lo cual tiene como ventaja que al bombear no traen consigo sedimentos y que la poza tendrá las dimensiones establecidas en la construcción por lo cual no existirán cambios morfológicos. Esta tesis por su parte considera el estudio inicial de la poza conectada mediante uno o dos canales al río con flujo constante que depende de la variación de los niveles del río.

Para la evaluación de la hidráulica y los sedimentos se consideró un modelo bidimensional del flujo que ha sido usado en la última década de manera exitosa gracias al desarrollo técnico en cómputo permitiendo realizar complejas y extensas simulaciones. (Roca et al., 2009) Se realizó una simulación con el fin de conocer la variabilidad del flujo y la distribución de sedimentos en la poza con el fin de evaluar la dinámica de esta a lo largo del tiempo. Se utilizó el modelo numérico FESWMS-2DH el cual demuestra la

aplicabilidad de las ecuaciones clásicas promediadas en la profundidad de Navier-Stokes (Froehlich, 1989; Chaudhry, 1993).

Los resultados del modelo hidrodinámico del SMS muestran generalmente buenos resultados en la calibración y verificación, y pueden ser utilizados como datos de entrada para el modelo de transporte y depositación de sedimentos. El desarrollo conceptual de este modelo se mostrará en el **Capítulo 5** de la presente investigación.

2.5 CARACTERÍSTICAS Y ROL DE LAS PLANTAS ACUÁTICAS

El objeto primordial de la restauración y rehabilitación es reducir los efectos negativos de la degradación sobre el funcionamiento de un ecosistema de ciénaga o humedal (Trepel, 2007). Este objetivo se torna cada vez más necesario debido a la pérdida acelerada de estos sistemas naturales a nivel mundial.

Este tipo de intervenciones contribuyen a mejorar la calidad fisicoquímica del agua, produciendo cambios en las relaciones funcionales y de productividad de las comunidades acuáticas, así como en la estabilidad del ecosistema. (Roldán, 2008).

Las plantas acuáticas superiores o macrófitas acuáticas son importantes componentes ecológicos, ya que al ser productoras primarias proveen hábitat para invertebrados, peces y una gran diversidad de otros organismos y constituyen un recurso que hasta la fecha ha sido casi o totalmente subutilizado. (Wychera et al., 1993), estas plantas juegan diferentes roles ecosistémicos y se considera que son de gran importancia para el mantenimiento del estado del agua.

No existe una estricta definición del término macrófitas acuáticas, puesto que algunas plantas pueden desarrollarse en la zona de transición entre los ambientes terrestres y el agua, o bien en zonas inundadas durante ciertas épocas del año, por lo que se consideran plantas acuáticas aquellas que crecen asociadas al agua o que al menos están presentes en suelos cubiertos de este elemento durante la mayor parte de su crecimiento. (Gutiérrez, 2000)

Barendregt & Bio (2003) resume según la experiencia en la gestión de aguas y en la descripción geomorfológica, las condiciones de las macrófitas en tres escalas diferentes del paisaje. (**Figura 2-3**), las cuales reflejan los parámetros de mayor estudio. El presente trabajo se desarrolla en la escala local, mostrando el estudio de las condiciones morfológicas, de calidad de agua y de sedimentos.

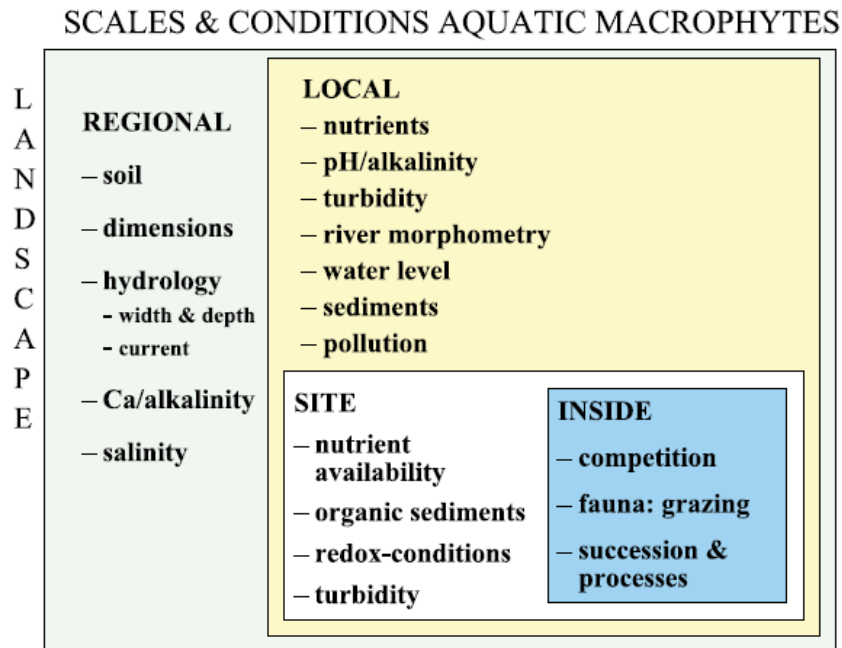


Figura 2-3: Escalas y Condiciones de las Macrófitas Acuáticas

La importancia de los lechos de macrófitas se ha incrementado por su capacidad para absorber grandes cantidades de nutrientes y sustancias tóxicas. Los procesos físicos, químicos y biológicos que se presentan en los lechos contribuyen a mejorar la calidad del agua. (Prystay, 1998).

Las plantas acuáticas contribuyen a la transformación de nutrientes participando en los procesos físicos, químicos y microbiológicos, pero además los remueven al utilizarlos para su crecimiento. Las plantas ofrecen resistencia mecánica al flujo del agua, incrementan el tiempo de retención y facilita la sedimentación de material particulado. También mejoran el paso del agua a través del suelo, a medida que las raíces crecen y crean espacios después de su muerte.

2.6 ESTUDIOS EXISTENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO

En este numeral se enuncian cada uno de los estudios realizados a la fecha en la zona de estudio, para la Empresa Mineros S.A., los cuales hacen parte del Plan de Manejo Ambiental, estos estudios han sido realizados en diferentes épocas del año, para estudiar la variabilidad del nivel del agua, el régimen hidrológico y establecer los cambios de los parámetros físicos-químicos y biológicos anualmente.

2.6.1 Estudios de Calidad del Agua y Limnológicos – Mineros S.A.

El estudio de calidad del agua y los estudios de limnología, parten de una serie de mediciones de parámetros físicos, químicos y biológicos en diferentes épocas del año, con el propósito de conocer la variabilidad de éstos con el tiempo y con el propósito de efectuar lo establecido en el Plan de Manejo Ambiental de la empresa para dar cumplimiento a los requerimientos del Ministerio de Medio Ambiente y las Corporaciones Regionales, estos estudios se realizan para las pozas que actualmente se encuentran en operación y para las pozas en etapa de recuperación. Los datos fueron suministrados por la empresa Mineros S.A.

2.6.2 Estudios Hidrológicos e Hidráulicos – GMS Ingenieros Consultores S.A.S.

El régimen hidrológico de la zona de estudio está en relación con el río Nechí, que es el abastecedor de cada una de las pozas en operación y en recuperación, y su profundidad está directamente asociada con las épocas de lluvias, permitiendo la entrada de aguas en verano e invierno.

Los estudios hidrológicos e hidráulicos fueron suministrados por la empresa consultora GMS Ingenieros Consultores S.A.S., quien se encarga de evaluar la dinámica del río anualmente, y determina la variación del volumen de sedimentos a lo largo de éste.

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Dentro del estado del arte que se presentó en el **Capítulo 2**, se resaltó que para una buena práctica en la creación y restauración de ciénagas era indispensable tener en cuenta tres componentes (Persson et al, 1999).

- La efectividad hidrológica;
- La eficiencia hidráulica; y
- La facilitación y optimización de los procesos de calidad de agua.

Teniendo en cuenta dichas componentes se desarrolló este trabajo investigativo sobre las metodologías que tenían en cuenta dichas componentes y que pudieran dar solución a las siguientes preguntas de investigación.

- ¿Cuál es el diseño e implementación de las medidas de manejo, tendientes a la recuperación de las pozas?
- ¿Pueden detectarse los impactos potenciales que puedan llegar a afectar las pozas a largo plazo?
- ¿Cómo es la variabilidad de los sedimentos, de los parámetros físicos y químicos, así como la variación de las plantas acuáticas (macrófitas) en estos ecosistemas de ciénaga, y en especial en uno creado a partir de la explotación minera?

El propósito de este estudio va encaminado a mejorar el conocimiento acerca de la sostenibilidad, haciendo referencia en particular a la técnica de la minería de oro aluvial, donde debido a este tipo de minería la zona explotada se modifica, generando un impacto

ambiental en los ámbitos físico, químico, biológico, ecológico y social de importantes magnitudes, entre estos impactos están los cambios en las llanuras de inundación, alteraciones temporales y algunas veces permanentes del régimen de flujo a lo largo de la corriente; destrucción de la flora y fauna con afectación en el ecosistema acuático; conflictos sociales que desencadenan asentamientos de minería ilegal y problemas con la comunidad local.

Teniendo en cuenta los impactos ambientales generados en este tipo de minería, el problema radica en que estas pozas de explotación quedan totalmente descubiertas y sin una integración al ecosistema una vez han sido explotadas. Este plan de trabajo constituye el primer intento en el país por explorar un modelo sostenible de explotación minera considerando estas pozas de extracción de oro como futuras ciénagas del río, que en este caso específico se trata de las pozas de extracción de oro de la empresa Mineros S.A. sobre las llanuras de inundación del río Nechí.

Las pozas de dragado ubicadas en la llanura aluvial del río Nechí son zonas de explotación de oro de la empresa Mineros S.A. La restauración se llevó a cabo para demostrar la eficacia de las pozas restauradas a largo plazo, y se espera que esta investigación proporcione la metodología y las herramientas necesarias para desarrollar programas de restauración en pozas que fueron dejadas por la explotación minero aluvial.

Debido a la ausencia de estudios que evalúen la sostenibilidad de la extracción-minera aluvial, nace esta investigación aplicada que permitirá brindar información acerca de la sostenibilidad de la extracción de material en ríos, ampliar el conocimiento en cuanto a los conflictos generados con el medio ambiente por esta actividad. Finalmente pretende evaluar el efecto de la restauración hidrogeomorfológica sobre la calidad del agua, la variación de los sedimentos y el crecimiento de macrófitas. Se evalúa el proceso desde la etapa de explotación hasta la etapa de recuperación, permitiendo a su vez, establecer parámetros que aporten al conocimiento aplicado de la restauración, conservación y manejo sostenible de las zonas que fueron degradadas por la explotación minero aluvial.

La mayoría de los estudios en los que se consideran teorías o recomendaciones de manejo de ciénagas escogen una escala de tiempo pequeña, ya que resulta más sencillo

obtener datos que en una escala de tiempo más larga con mayores experimentos y observaciones (Mitsch et al., 2005). Desmond et al. (2002) definen que un tiempo de supervisión de menos de 5 años es demasiado corto para evaluar el desarrollo de los atributos importantes del ecosistema.

Mineros S.A. tiene registros y un seguimiento frecuente tanto en la etapa de operación o explotación como en la etapa de restauración, estos registros permiten tener una idea del comportamiento de las pozas en explotación y a la vez facilitan la comparación con las pozas ya recuperadas.

3.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1 Objetivo General

Aplicar un modelo de explotación sostenible a largo plazo para la minería aluvial que se desarrolla en pozas laterales a los ríos, con el fin de evaluar el mejor método de explotación considerando el componente hidrogeomorfológico. Se evalúa la recuperación de las pozas como consecuencia del desplazamiento y operación de las dragas, con la idea de mejorar las condiciones ambientales de estas pozas artificiales dejadas por la explotación minera de oro sobre el Río Nechí, en la región del Bajo Cauca antioqueño.

El problema de la sostenibilidad en general de la explotación minera no es el objetivo de esta tesis, su marco de acción se restringe al tipo de minería esbozada en el párrafo anterior.

3.2.2 Objetivos Específicos

- Recolectar y revisar la información existente obtenida en campo.
- Efectuar un análisis espacio-temporal de los parámetros físico – químicos reportados en campo en las pozas de explotación, mediante técnicas simples de estadística (media aritmética, desviación estándar y determinación de los p-valores).

- Caracterizar las pozas en explotación y recuperación considerando el análisis físico-químico realizado anteriormente.
- Desarrollar el modelo hidrodinámico Surface Water Modeling System (SMS) de las pozas de explotación, con el fin de tener conocimiento sobre el régimen de velocidades, profundidades y distribución de sedimentos específicamente en los meses de marzo y noviembre que corresponden a los meses de estiaje y creciente respectivamente.
- Calibrar y verificar el modelo hidrodinámico, y determinar las posibles opciones de explotación y recuperación de la zona.
- Comparar los resultados obtenidos de una poza en operación con una poza en recuperación, y verificar con ciénagas naturales, evaluando los posibles impactos por la sedimentación de la poza.
- Caracterizar biológicamente el crecimiento espacio-temporal de las plantas acuáticas superiores o macrófitas y establecer los objetivos a definirse cuando se va a proyectar la recuperación de las pozas.
- Identificar los impactos potenciales en las funciones de la futura ciénaga.
- No se evaluarán en este trabajo por carecer de datos los parámetros relacionados con la fauna.

3.2.3 Hipótesis

- La explotación minera de oro puede ser de tres tipos: a cielo abierto, en socavón y la explotación aluvial en pozas ya sea directa en ríos o laterales a estos.
- La extracción de oro en pozas consiste en excavar socavones profundos en los que una draga de succión realiza un descapote previo y una draga de cucharas extrae el oro del aluvión profundo. Este tipo de explotación se hace generalmente utilizando un canal de entrada que transporta las aguas del río hacia las pozas y una canal de salida que regresa el agua desde la poza hacia el río.
- Este tipo de sistema de explotación está sujeto al ingreso de sedimentos que finalmente colmata el sistema. Esta colmatación reduce la posibilidad de garantizar la

sostenibilidad ambiental de los ecosistemas loticos ya que alteran los parámetros físico-químicos del agua.

- Se parte de la hipótesis de que es posible realizar un tipo específico de explotación en pozas que permita integrar estos elementos artificiales a los ecosistemas garantizando que puedan alcanzar un comportamiento similar a las ciénagas naturales en los aspectos bióticos y físico-químicos.

- Esta hipótesis tiene tres líneas fundamentales:

→ Debe existir similitud en los parámetros físico-químicos de tal forma que permita el desarrollo de la vida.

→ Debe existir similitud en los desarrollos de especies acuáticas, de tal forma que los tipos de especies presentes en las ciénagas naturales puedan aumentar su cobertura y establecerse en buen estado ecológico en las pozas artificiales.

→ Finalmente la poza como sistema paralelo a un río, está sometido al proceso de entrada y salida de sedimentos; por lo tanto, su comportamiento hidráulico debe garantizar la eficiencia en el proceso de atrapamiento de sedimentos, tal y como ocurre en una ciénaga natural.

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

4. ÁREA DE ESTUDIO

4.1 GENERALIDADES

El sitio de estudio está localizado en el valle aluvial del río Nechí, ubicado al noroccidente de Colombia. (**Figura 4-1**), en jurisdicción de los municipios de El Bagre, Zaragoza, Cauca y Nechí. El valle presenta alturas que oscilan entre 80 y 150 msnm, con una temperatura promedio multianual de 28°C, y una humedad relativa de 80%. El río Nechí es uno de los tributarios más importantes del río Cauca, que corresponde al segundo río más importante de la vertiente atlántica de Colombia.

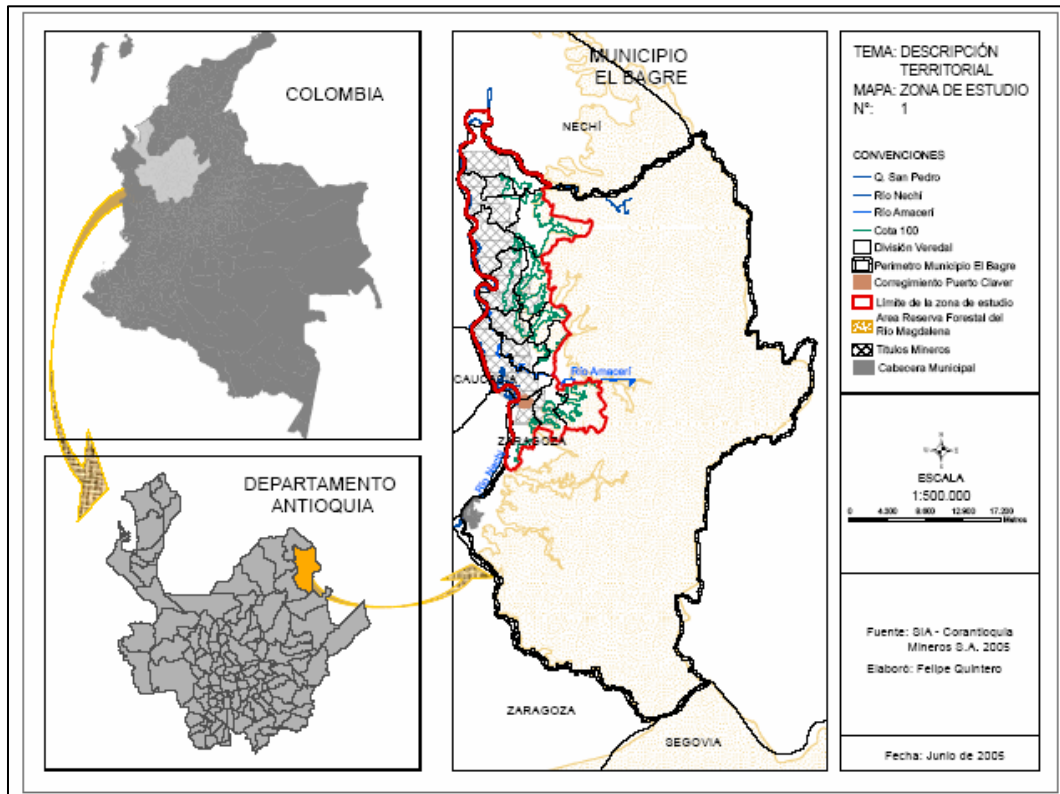


Figura 4-1: Localización del Valle del Río Nechí. Tomado de Ortega (2006)

La unidad típica de paisaje de la llanura de inundación del río Nechí incluye canales, ciénagas, bajos y terrazas con un régimen de inundación natural asociado con las temporadas húmedas, que por alteraciones antrópicas de la parte media y alta de las cuencas, ha aumentado el nivel de vulnerabilidad del sistema. Estas zonas de llanura de inundación del río Nechí conforman un sistema de ciénagas que son un elemento constitutivo vital de la cuenca, puesto que éstas actúan como grandes reservorios de poca profundidad y extensión variable y donde su capacidad de embalse radica la dinámica de amortiguamiento que posee la cuenca para autorregularse y controlar los crecimientos cíclicos de los niveles de inundación. La presencia de ciénagas es especialmente común en las partes más bajas de la cuenca, lo cual transmite a su región su características más especial, que es la de estar formada por terrenos bajos sometidos a inundaciones periódicas.

El valle ha tenido una tradición minera que data del período prehispánico, pero desde mediados del siglo XX, la mayor parte del oro ha sido explotado mediante grandes dragas legales e ilegales que trabajan con energía eléctrica, sobre las terrazas aluviales alterando el paisaje y dejando un pasivo ambiental. (Dirección de Planeación Estratégica Integral, 2009)

Las pozas usadas para este estudio, son la poza denominada UP-2 que actualmente se encuentran en operación o fase de explotación y está localizada geográficamente en las coordenadas (7° 48' 31" N y 74° 48' 14" W) y que fue creada para la extracción del oro de un depósito aluvial (**Figura 4-2**), y la Ciénaga Pujador (**Figura 4-3**), que corresponde a una antigua poza en operación y ahora se encuentran en restauración y está localizada en las coordenadas (7° 44' 47" N y 74° 8' 60" W). Ésta ciénaga se encuentra a una altura de 60 msnm y presenta alrededor de ella, pastos, vegetación arbórea y algunos cultivos, además predominio del buchón de agua. Tanto las pozas en operación como la que se encuentra en restauración están conectadas hidrológicamente al río Nechí por medio de canales artificiales y por paleocanales. Es importante mencionar que no se tienen registros de los datos de la Ciénaga San Francisco en la etapa de explotación, por lo que esta tesis parte de hacer un comparativo de una poza que se encuentra en explotación actualmente con una ciénaga que ya se encuentra en restauración.

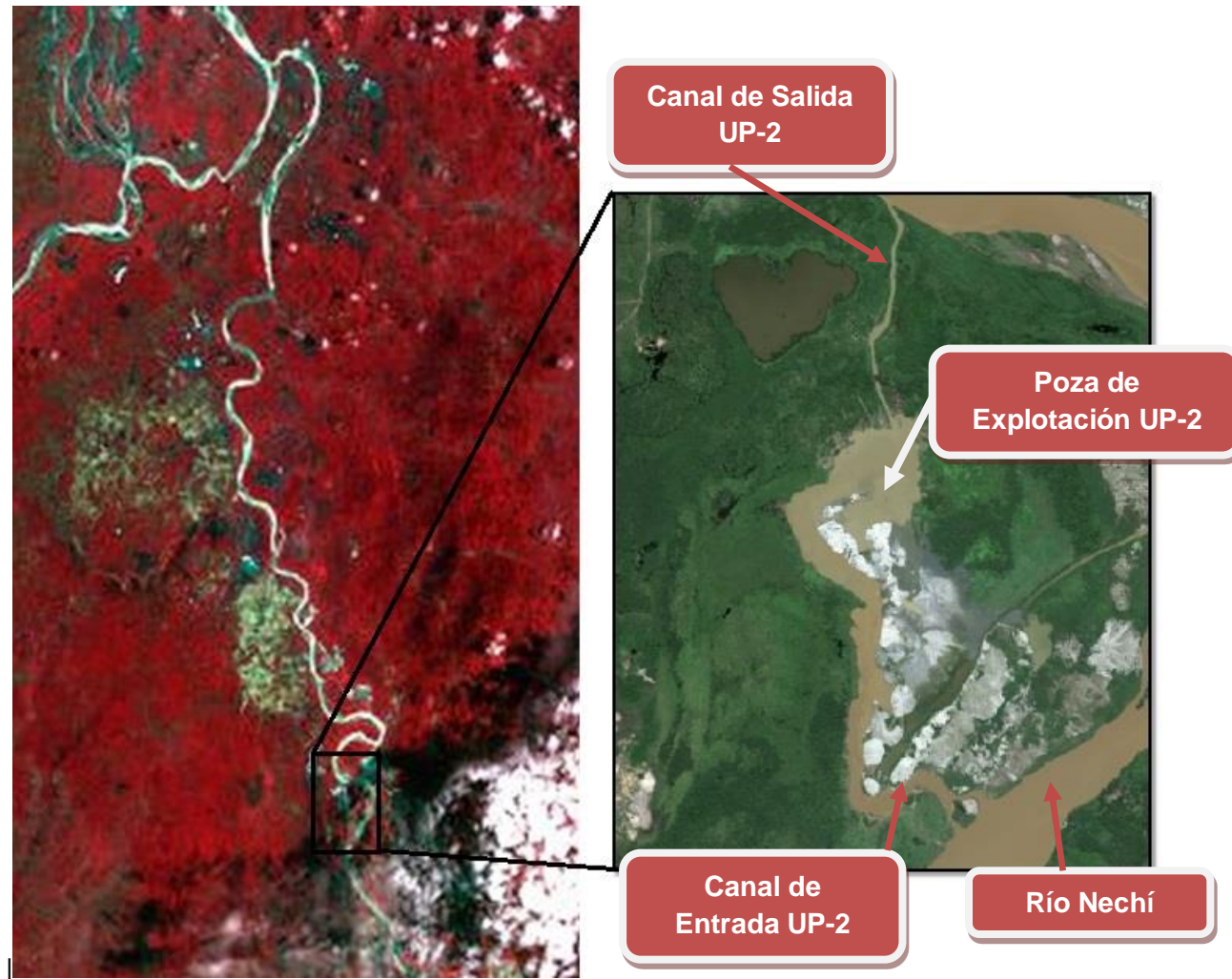


Figura 4-2: Localización de la UP-2 – Poza en Operación
(Imagen Satelital del SPOT 2011 y GeoEye 2010)

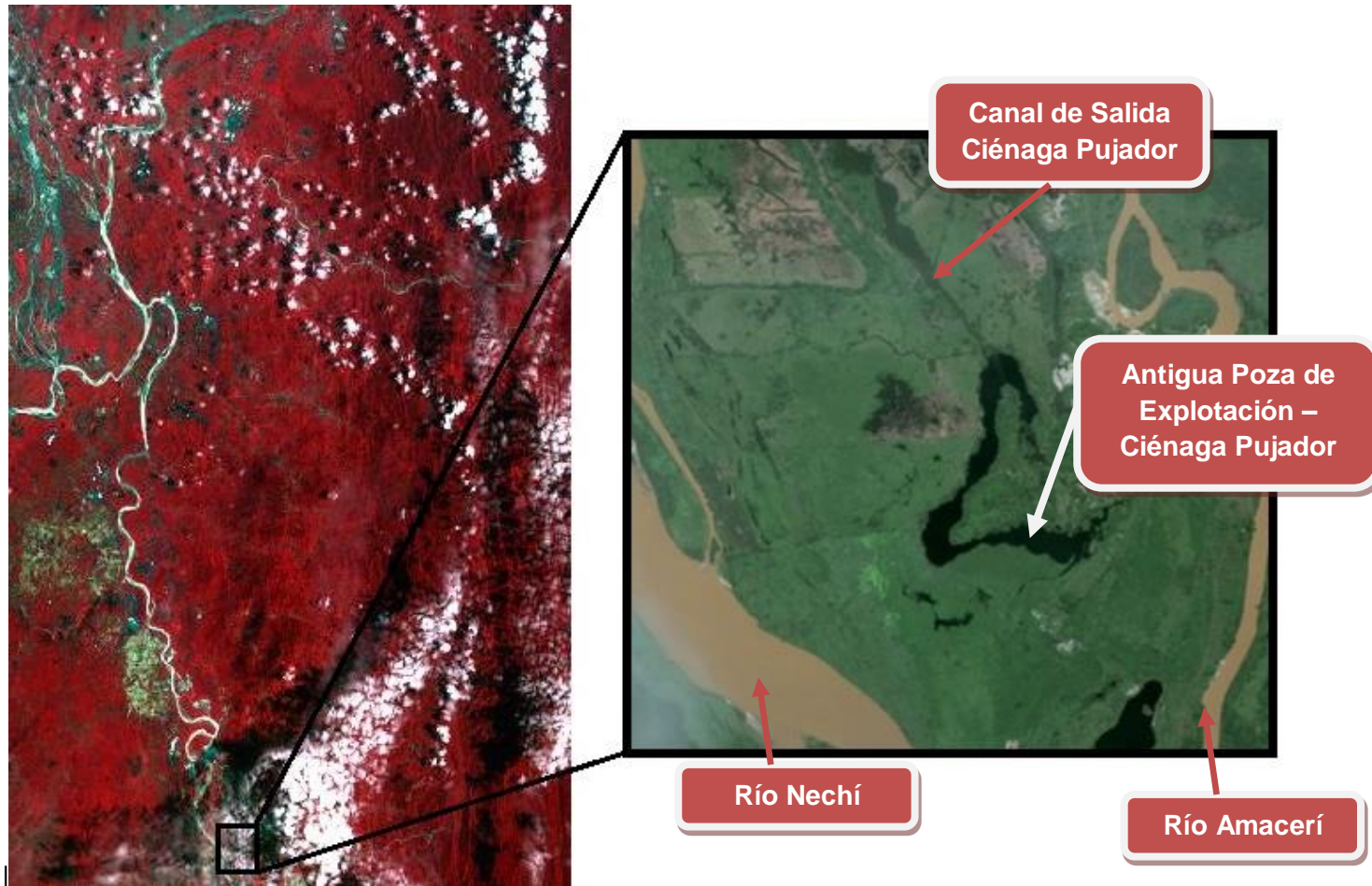


Figura 4-3: Localización de la Ciénaga Pujador – Poza en Restauración
(Imagen Satelital del SPOT 2011 y GeoEye 2010)

La poza en operación es la UP-2, la cual terminó su proceso de explotación e inició su fase de restauración en Enero de 2011, por lo que no se cuentan con datos suficientes para su evaluación en esta última fase, los registros abarcan desde el año 2000 hasta el 2011. Para la evaluación en fase de restauración se consideraron los datos de la ciénaga artificial Pujador, la cual tiene un registro histórico desde el año 2004 al 2008, pero que no cuenta con datos en la fase de explotación. Ésta evaluación se considera aceptable dado que la zona presenta las mismas características climáticas, hidrológicas, morfológicas, y el sistema de explotación aplicado en ambas es el mismo.

Actualmente, las pozas de Mineros S.A., que se encuentran en etapa de operación o explotación tienen una conexión al río Nechí mediante un canal de entrada y un canal de salida, de manera tal que haya aporte de caudal a la poza, y donde la draga pueda estar en funcionamiento, los canales que conectan a la poza UP-2 con el río, tienen en promedio 25 m de ancho, y una profundidad promedio de 1,50m. En cuanto a la poza, su forma varía dependiendo del planeamiento dado por la División de Ingeniería para la extracción del oro y las profundidades varían entre 30 y 43.5 msnm (Ver **Figura 4-4**).

Para la fase de post-operación de la poza o de restauración, los depósitos de grava fueron puestos hacia la margen Este, previniendo la orilla de inundaciones del río, además facilitando la recirculación del flujo y demás parámetros fisicoquímicos en la poza; en esta etapa Mineros S.A. cierra el canal de entrada de la poza, permitiendo solo la conexión con el río a través del canal de salida, la forma que adquiere la poza al final de la explotación no es definida previamente, sino que es la que se tiene una vez la División de Ingeniería decide no explotar más dicho bloque.

En la zona coexisten los pequeños y medianos mineros que operan en condiciones de ilegalidad, y la gran minería desarrollada por la empresa Mineros S.A. Sin embargo, la información minera considerada en el análisis de esta tesis hace referencia a la explotación aurífera a gran escala, ya que no hay datos sobre el otro tipo de Minería.

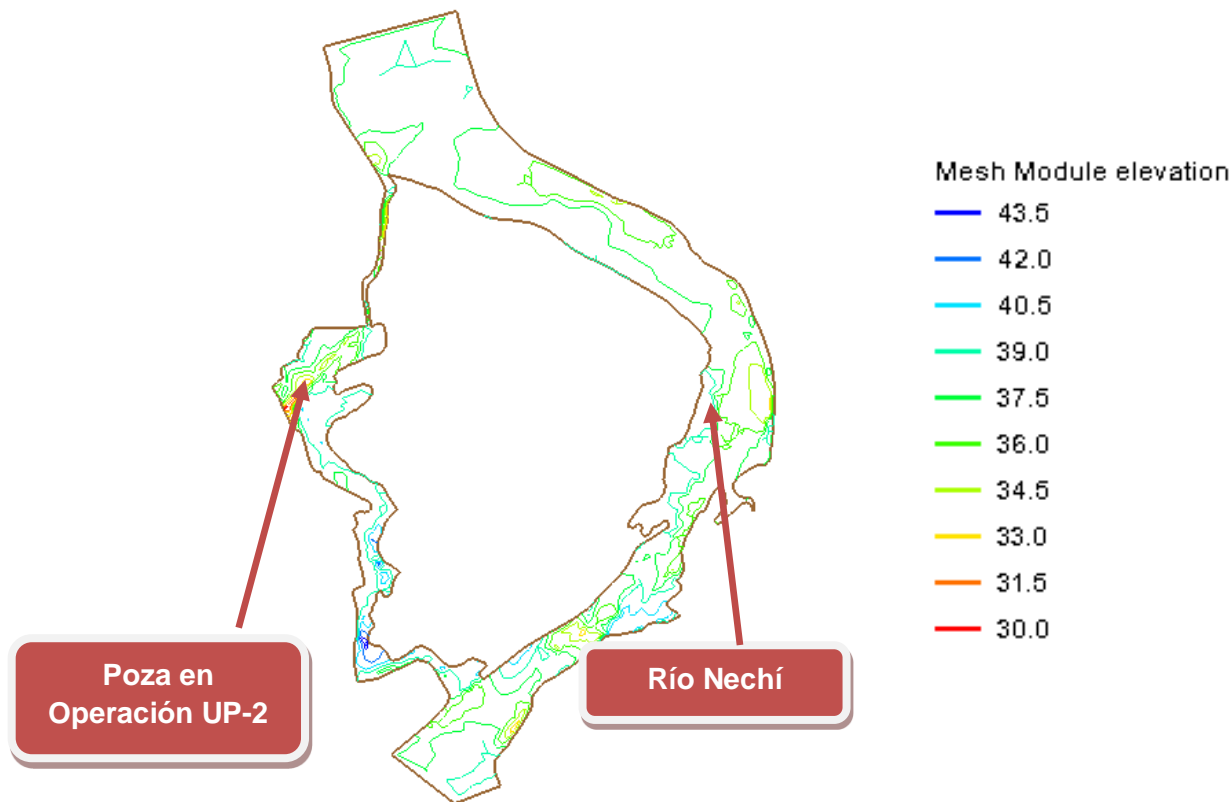


Figura 4-4: Batimetría Poza en Operación UP-2

En la zona de estudio, la ausencia de autoridad ambiental en el ámbito minero ha sido una de las principales causas del deterioro del territorio. Esto se evidencia en hechos como la inexistencia de un programa de seguimiento y control a la minería informal de la región; de ahí que no se cuente con información sobre este tipo de minería.

4.2 MODELO DE EXPLOTACIÓN AURIFERA ALUVIAL

La exploración de aluviones es el conjunto de actividades definidas para la delimitación de las áreas potenciales con el fin de encontrar reservas y recursos con base en una malla regular de perforaciones, proceso que permite la delimitación y cálculo de los bloques de reservas, base de información para el planeamiento minero.

4.2.1 Generalidades

El sistema de explotación se hace “a cielo abierto” (en aluviones profundos), empleando el método de corte y relleno, es decir, es un movimiento de tierras que se hace utilizando dragas de succión para el descapote y dragas de cucharas para la extracción de las gravas y arenas del aluvión. (López, 2009). **(Figura 4-5)**. Estas dragas aún se encuentran en operación por ser técnica y económicamente eficientes, y ambientalmente controlables, ningún otro sistema es comparable.



Figura 4-5: Draga de Explotación Minera en las Llanuras Aluviales del Río Nechí

La palabra **aluvión** se refiere a los depósitos de minerales, compuestos de materiales sueltos o cementados como piedras, guijarros, arena, arcilla, etc., que ocupan el lecho antiguo de las corrientes de agua o paleocanales, de los valles o de sus flancos, y en ocasiones, por fenómenos geológicos, las crestas o mesetas montañosas. Cuando por procesos de meteorización y concentración mecánica se ha acumulado un mineral valioso, a este aluvión se le denomina “placer”.

Estas dragas (Dragas de Cucharas) tienen en promedio 76 m de largo, 15 m de ancho y 24 de altura, excavan la llanura aluvial del río creando lagunas o pozas de flotación dentro de las cuales pueden operar. En estas pozas, la extracción de material comienza a una profundidad de 20-30 m. La capacidad de las dragas de cucharas es de aproximadamente

280.000 m³/mes de material procesado, estas dragas son equipos especialmente desarrollados para aluviones profundos y de bajo tenor. Combinan en una misma unidad la extracción del material, el beneficio del mineral valioso, y la redepositación de los materiales de rechazo o colas.

4.2.2 Proceso de Explotación

El primer subproceso que compone al proceso de explotación aluvial consiste en la exploración y cálculo de las reservas auríferas. Los resultados de la exploración mediante perforaciones, evaluados individualmente, se analizan en conjunto para establecer, según su ubicación, la conformación de los bloques de reservas que serán las futuras áreas de explotación. Ver la **Figura 4-6**.

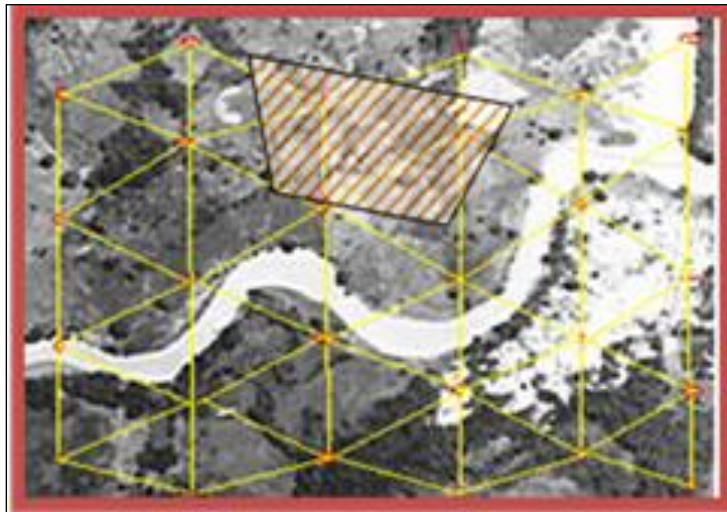


Figura 4-6: Exploración y Definición de Bloques de Reserva

Para la delimitación de los bloques de reservas o bloques productivos se realiza el análisis con la consideración de las variables técnicas, económicas, sociales y ambientales, luego se realiza la planeación de la explotación y finalmente se procede con la explotación y el beneficio del oro.

Estas pozas están conectadas al río, por unos canales que permiten la circulación del flujo, el cual es requerido para que la draga sea puesta en marcha.

Primero, la draga de succión hace el movimiento de tierras del material de descapote (relleno hidráulico), y lo direcciona hacia los cargueros de grava que va dejando la draga de cucharas, de manera que este material quede confinado.

Luego, la draga de cucharas entra al bloque productivo y extrae el material aluvial profundo, beneficiando internamente el oro contenido, y dejando como producto de este movimiento de tierras a las arenas que salen del sistema de beneficio para soportar el ancla y a las gravas que conforman finalmente los cargueros. (Ver **Figura 4-7**)

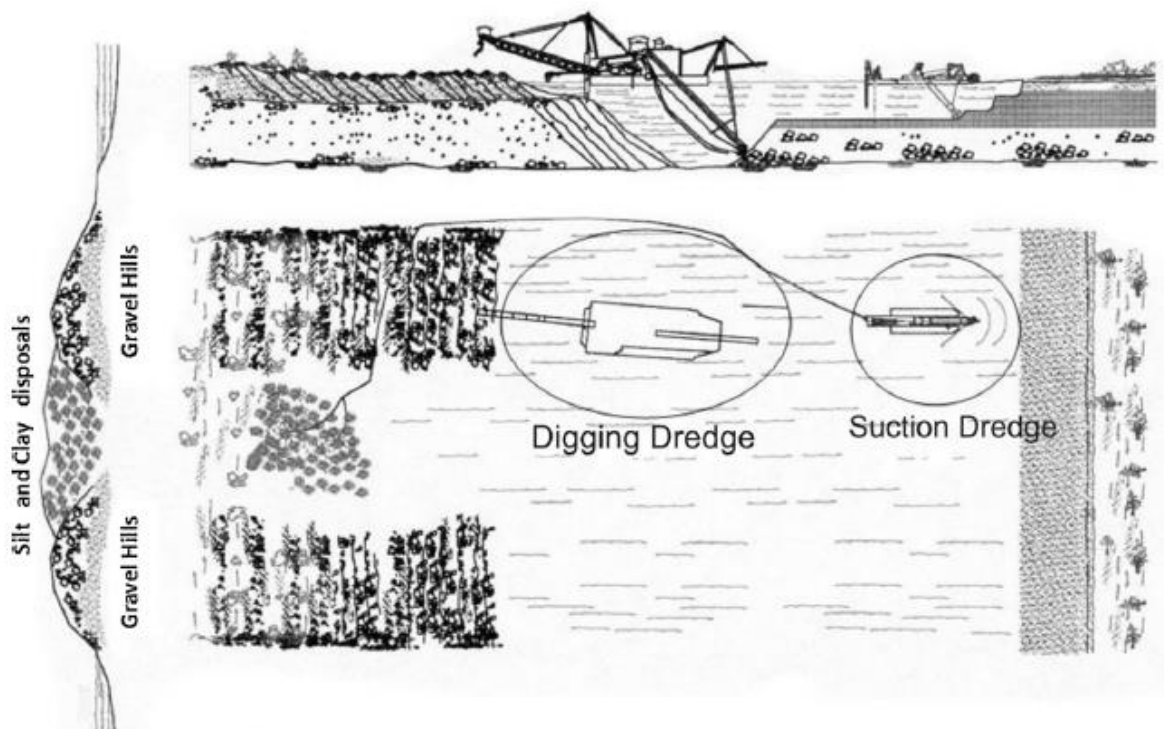


Figura 4-7: Proceso de Explotación en la Llanura del río Nechí, Vista de Sección Transversal (Arriba) y Vista en Planta (Abajo)

El proceso técnico y las dragas usadas en el río Nechí son esencialmente las mismas que las descritas por Bahre and Withlow (1982), para la parte noreste del Valle de California (USA) durante el primer semestre del siglo XIX, pero con una mayor diferencia: En el Valle del río Nechí, se utiliza una draga adicional, la cual toma la capa de suelo superficial

(limos y arcillas), dejando únicamente la porción de grava, la cual contiene los depósitos de oro, para la draga de excavación.

Finalmente, con maquinaria pesada se realiza el perfilamiento de los cargueros y rellenos, para luego entrar en el proceso continuo de Recuperación Ambiental.

Estas pozas o ciénagas artificiales una vez han sido explotadas generan un impacto visual de una zona devastada, totalmente modificada, generando un impacto ambiental en los ámbitos físico, químico, biológico, ecológico y social de grandes magnitudes, entre estos impactos están los cambios en el movimiento de tierras, los cambios del lecho del río causando un alteración en el régimen del flujo a lo largo del mismo, destrucción de la flora y fauna, con afectación al ecosistema acuático, o dentro de los conflictos sociales se puede tener asentamientos de minería ilegal. Debido a estos impactos, el propósito es establecer estas zonas como futuras ciénagas del río, lo cual es un propósito ambiental que ayuda a conservar el equilibrio de la zona y el desarrollo sostenible de los recursos que están siendo utilizados.

4.2.3 Descripción del Proceso

En aluviones profundos, el único sistema para la explotación es el dragado industrial con dragas de cucharas, desarrollado en California y Nueva Zelanda desde finales del siglo pasado. En esos países y en otros aún operan estas dragas, por ser técnica y económicamente eficientes, y ambientalmente controlables; ningún otro sistema es comparable.

La explotación se desarrolla mediante la excavación dinámica de pozas con un área aproximada de 1,5 hectáreas, cuya profundidad depende del tipo de draga, pero que en el caso de Mineros S.A. llega únicamente hasta los treinta metros. Previo a la excavación con la draga, se realiza el descapote o remoción de la capa de sobrecarga con las dragas de succión para confinarlas o depositarlas de manera controlada entre y sobre las filas de “cargueros” o colas de gravas.

Gran parte del proceso de beneficio del oro se realiza dentro de la draga, la cual devuelve el material de rechazo por la parte posterior y lo descarga dentro de la misma excavación para llenarla. Este es un proceso de explotación con retrolleado o movimiento de tierras dinámico, similar a los que se desarrollan en otros sistemas de minería a cielo abierto. La operación progresa lenta y uniformemente, dejando detrás una superficie con una altura levemente superior a la vega original, lo cual permite mejorar zonas anegables y orillas erosionables. **Figura 4-8.**

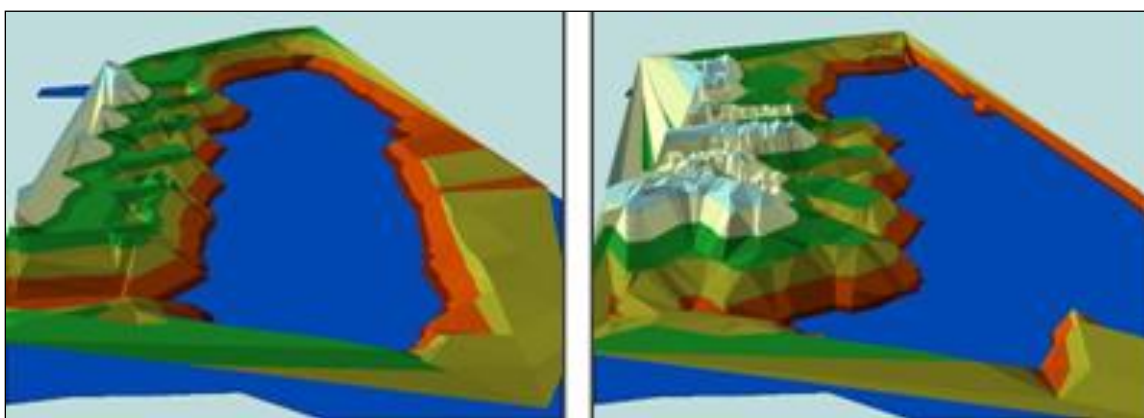


Figura 4-8: Modelo de Elevación del Terreno (MDT) del Área de Operación

El proceso de explotación es lento, predecible y controlable, pudiendo ser inclusive suspendido sin que se lleguen a afectar zonas extensas. El riesgo de producción o escape de sedimentos es nulo o mínimo si se considera el retrolleado con las gravas y arenas descargadas por la draga de cucharas y el confinamiento de la sobrecarga impulsada por la draga de succión hacia los cargueros de grava. Si la pérdida del material se produjera, la draga no podría anclarse, la poza no podría llenarse y menos aún podría generarse la sobreelevación que se logra en relación con el nivel anterior de la superficie. Esto también lo explica la diferencia de profundidades medias existente entre la poza de operación (30 m) y el sistema de drenaje principal o natural (4 m), que genera un gradiente suficiente para que los sólidos no puedan escaparse, y al contrario, se atrapen los sedimentos que le llegan al sistema desde aguas arriba de la cuenca.

Una vez que se termina de establecer la poza y se ha llegado al comienzo del bloque de reservas, el área de la poza es de 1,5 ha, sin contar la poza de la draga de succión que es de 1,0 ha. A partir de este momento, la explotación avanzará a un ritmo aproximado de 1,5 hectáreas/mes, lo que dependerá de la profundidad de dragado y el ritmo de explotación. A medida que avanza la draga de cucharas, ésta redeposita el material de rechazo por la parte posterior, de modo que la poza se irá desplazando con el avance de la explotación.

5. METODOLOGÍA

En este numeral se presenta una breve descripción de las actividades llevadas a cabo para cumplir cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

5.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

5.1.1 Revisión de Literatura Técnica Existente e Información Secundaria

La información disponible en la investigación, incluye material bibliográfico de diversas fuentes, artículos especializados en incorporación de parámetros físicos-químicos y biológicos en la restauración de humedales, así como modelamiento hidráulico y de sedimentos en elementos finitos, e información secundaria de campañas de aforos y mediciones de parámetros fisicoquímicos en las pozas en estudio.

5.1.2 Información Obtenida

Se recopilaron mapas topográficos y batimétricos y otras fuentes información que se presentan a continuación:

- Campañas de medición de parámetros físico-químicos realizados en la zona de estudio, tanto en la fase de operación como en la fase de recuperación.
- Series históricas de precipitación y caudal de la estación hidrometeorológica y limnográfica La Esperanza perteneciente al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y que son requeridas para la determinación de los caudales requeridos para la simulación hidráulica en el HEC-RAS 4.1.0 y en el SMS 10.1.

- Campañas de aforo líquido y sólido en los canales que conectan al río con las pozas de dragado.
- Serie histórica de cobertura de macrófitas

5.1.3 Campañas de Medición Limnología y Calidad de Agua

Para el estudio limnológico y de calidad de agua, se reunió toda la información fisicoquímica y biológica disponible por Mineros S.A., desde el año 2004, tanto de las pozas en explotación como las pozas en recuperación, con el fin de obtener un compendio de la información y así realizar posteriormente su tabulación y análisis. Las campañas para la toma de estos datos se realizan de dos a tres veces al año, de manera tal que cubran cada una de las etapas que corresponden al patrón estacional típico de la zona. Las mediciones se llevaron a cabo en el principal cuerpo de agua de la poza o ciénaga y en los principales canales de entrada y salida que conectan al río con la este cuerpo de agua.

Para la definición del número y ubicación de las estaciones del muestreo general se tuvo en cuenta los siguientes criterios: localización de los canales de entrada y salida que conectan al río con las pozas, zonas pelágicas y muertas, profundidad, áreas permanentemente inundadas y cobertura de macrófitas (considerado en la etapa de recuperación). Las variables fisicoquímicas y los procedimientos de análisis se describen a continuación:

- **Profundidad**

Este parámetro es de gran importancia, puesto que determina muchas características de su funcionamiento, entre las que se destacan la columna de productividad, el enraizamiento de macrófitas, la previsión de vida útil como cuerpo de agua, temperatura y capacidad de amortiguamiento de sedimentos y de la acción de contaminantes, para ello se suministró la batimetría de la poza en fase de operación.

- **Temperatura**

La temperatura está determinada por la cantidad de energía calórica (ondas del infrarrojo) que es absorbida por el agua. La temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos útiles.

Conforme la profundidad aumenta, van penetrando menos radiaciones, por lo que la temperatura disminuye, encontrándose por esto una capa superficial de agua relativamente caliente. Por otro lado, es preciso tener en cuenta que un cambio brusco de temperatura puede conducir a un fuerte aumento en la mortalidad de la vida acuática.

- **Turbiedad**

La turbidez indica la cantidad de materia sólida suspendida en el agua y se mide por la luz que se refleja a través de esta materia. A mayor intensidad de luz dispersa, mayor nivel de turbidez. La turbidez hace que el agua pierda su transparencia y sea opaca.

- **Conductividad**

Es la capacidad que tiene una solución de conducir una corriente eléctrica en función de la concentración de iones presentes en ella. Aunque el incremento de la conductividad eléctrica con la temperatura puede variar de un ión a otro, en general se acepta que esta aumenta en promedio 3% por cada grado centígrado. La conductividad eléctrica es una medida importante de la calidad del agua, porque indica la cantidad de materia disuelta en la misma.

- **pH**

El pH es un parámetro de mucha importancia para evaluar el estado de un cuerpo de agua y se define como la presencia disociada en iones H^+ y OH^- en el agua. Las sales

minerales disueltas en el agua se disocian en iones positivos y negativos, variando esta ionización de unos compuestos a otros.

El pH se expresa en la práctica como una escala que va de 1 a 14 y representa el inverso de logaritmo 10^{-14} . En una solución con un pH de 7, existe un equilibrio entre los iones, y por tanto este valor constituye el punto neutro. Por debajo de este valor, el pH es ácido y por encima será más alcalino. Los lagos y ciénagas de las partes bajas tropicales presentan rangos de pH que varían entre 5,0 y 9,0 dependiendo de su estado de eutrofización y alcalinidad.

- **Sólidos Suspendidos Totales**

Las características físicas más importantes del agua residual son: el contenido de los sólidos, término que engloba la materia en suspensión; la materia sedimentable; la materia coloidal y la materia disuelta.

- **Oxígeno Disuelto**

El límite principal de todo sistema acuático es el oxígeno. Si sus valores no están dentro de un rango de disponibilidad en el agua, afectaría la supervivencia de la gran mayoría de las especies o restringe el desarrollo y crecimiento de las mismas.

El oxígeno disuelto en el agua lo adquiere a través de la atmosfera y por medio de los productores primarios que realizan la fotosíntesis. Cualquier perturbación que disminuya los niveles de oxígeno en el agua tendrá un efecto dramático en el funcionamiento de las comunidades animales y el ecosistema general.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se define como la cantidad de oxígeno requerido por las bacterias para descomponer la materia orgánica bajo condiciones aeróbicas. Esta prueba se usa ampliamente para determinar el grado de contaminación de las aguas en términos del oxígeno que estas requieren para oxidar toda la materia orgánica que llevan en solución.

- **Fósforo Total**

El fósforo es uno de los contribuyentes fundamentales de los seres vivos, especialmente para la actividad celular de los organismos autótrofos o fotosintetizadores que lo necesitan para crecer y desarrollarse. En el tejido de los organismos se encuentra formando ésteres fosfóricos, separándose fácilmente y rápidamente y liberándose al ambiente al momento de la muerte.

En ecosistemas acuáticos, éste es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta por ser un elemento limitante y se tienen límites de concentración para diferentes estados de eutrofización en ecosistemas así:

Estado del Ecosistema	Fósforo Total (mg/L)
Oligotrófico	< 0,001
Mesotrófico	0,001 – 0,02
Eutrófico	0,02 – 1,00
Hipereutrófico	> 1,00

Tabla 5-1: Límites de Concentración para Diferentes Estados de Eutrofización en Ecosistemas

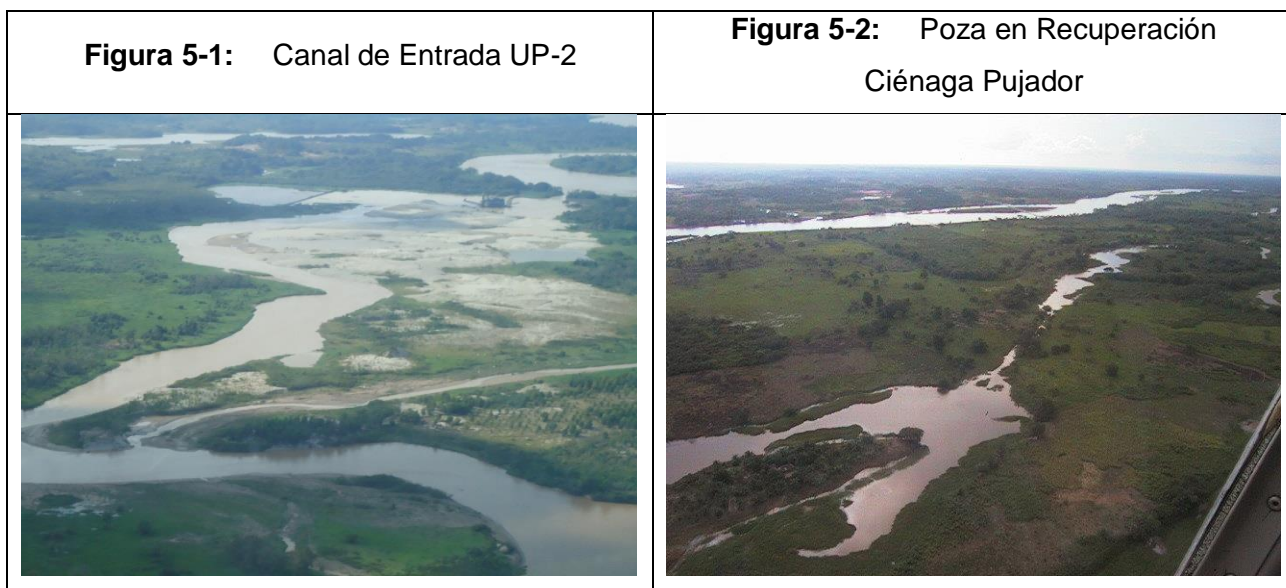
- **Plantas Acuáticas (Macrófitas)**

Las plantas acuáticas, están representadas por todo aquel tipo de vegetación que crece en la zona litoral de lagos, embalses y ríos. La densidad de población de macrófitas acuáticas está en relación con el área litoral, sus condiciones topográficas y el estado de eutrofización del agua. Normalmente, ciénagas muy eutrofizadas con litorales poco profundos son los medios más adecuados para el desarrollo de extensas zonas de vegetación acuática. Lugares de esta naturaleza son propicios para el desarrollo de una gran variedad de macroinvertebrados, zooplancton, perifiton y desove de peces. Para el desarrollo de esta parte, Mineros S.A. suministró los porcentajes de cobertura estimada de cada especie dentro de la ciénaga artificial Pujador en fase de restauración y de la

ciénaga natural Carreto, con el fin de hacer una comparación entre ambas, para así determinar su similitud.

5.1.4 Campañas de Medición Hidráulica y Sedimentos

Para el estudio hidráulico y de sedimentos se realizan tres campañas al año de aforo líquido y sólido al año, específicamente en los meses de Marzo, Junio y Noviembre. Los puntos de muestreo se realizan en los canales de entrada y salida a la poza. En las **Figuras 5-1 y 5-2** se puede ver algunas fotos de los sitios de estudio.



El monitoreo de los sitios de aforo se realiza mediante la toma de muestras de sedimentos y determinación de la carga sólida de los ríos, la metodología básica para la medición de caudales y toma de muestras en suspensión está basada en los protocolos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

- **Determinación de la Sección de Aforo**

Para la determinación de la sección de aforo en cada uno de los sitios, se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Estar situada a un tramo recto de la corriente. Y en lo posible que la longitud del tramo tenga un mínimo equivalente a cinco (5) veces el ancho de la Sección.
- Dirección de la corriente paralela, para diferentes estados del río; aguas bajas, medias y altas.
- Pendiente constante y distribución uniforme de velocidades, evitándose aquellas secciones en las cuales existan sectores de altas velocidades, aguas muertas y contracorrientes o remolinos.
- Lecho del río libre de obstáculos (troncos de árboles, grandes rocas, vegetación, etc.).
- Evitar los lechos fangosos (especialmente en algunos caños).
- Márgenes con taludes naturales sobresalientes de manera que no se produzca desbordamiento durante las crecidas. (este punto es de difícil cumplimiento por la configuración del terreno en la zona de explotación. Lo que hace que de una época de un aforo a otra cambie bruscamente la información por las variaciones en diferentes parámetros. Lo mismo que la forma y el tamaño de la sección de aforos.

- **Aforo con Lancha en Movimiento**

Para los aforos por lancha móvil se requieren los siguientes equipos:

- Sección establecida con sus respectivos mojones.
- Jalones.
- Sextante, tránsito o estación total (actualmente la que utilizamos).
- Lancha con motor fuera de borda.
- Radios Portátiles.
- El mismo equipo utilizado para los aforos por suspensión.

Frecuentemente, en ríos muy anchos y caudalosos, la aplicación de los métodos convencionales de aforo, no es la más apropiada por el costo y el tiempo. El fundamento del método de la lancha móvil, es el mismo del procedimiento habitual de los aforos convencionales, se basa en la determinación de áreas parciales de secciones y las velocidades del agua para dichas secciones; la diferencia radica en la manera de recoger los datos, el hidromensor (aforador) viaja en un bote que se traslada de una orilla a otra

en forma continua y a una velocidad constante. En este método el bote está equipado con un molinete universal y un prisma especial que indica la distancia de la posición de la embarcación respecto a la normal de la corriente, las medidas se realizan atravesando el río a lo largo de una sección fija normal a la corriente; durante la travesía, efectuada se toma las profundidades de la sección transversal y el molinete en operación continua mide las velocidades combinadas de la corriente.

El procedimiento de campo que se ha utilizado para los aforos en lancha móvil es el siguiente:

- Se arma el equipo (estación Total) cerca del mojón en concreto o punto de referencia (PR).
- Se toma la lectura de la mira si la hay; o se coloca una señal arbitraria para conocer si hubo cambios de niveles durante el aforo.
- A continuación se realiza una lectura con la estación la distancia desde el P.R hasta la orilla del río más próxima. (d1)
- Luego la embarcación se desplaza en línea recta hasta la orilla opuesta; se coloca el prisma y desde el punto de referencia se toma la distancia o ancho total del río (d2). Después de una operación matemática se distribuye el número de verticales a medir; (anteriormente se realizaban hasta 16 verticales, hoy como mínimo deben ser 18 verticales).
- Con la ayuda del prisma y los radios de comunicación, el topógrafo va alineando y posicionando en cada vertical a medir; para facilitar la ubicación de la embarcación.

- **Aforos de Bote Cautivo**

Cuando el ancho y las velocidades de la sección son relativamente pequeñas y no se cuenta con estructuras hidrométricas (tarabitas, puentes, garruchas, equipos de aforos desde la orilla, equipos de topografía etc.). Se puede instalar una manila debidamente abscisada. La cual se amarra de orilla a orilla bien templada, se determina el ancho de la lámina de agua y se calcula la distancia entre puntos. Por último se fija el bote a la manila abscisada para el desplazamiento. Los demás procedimientos son iguales que los del aforo con lancha en movimiento.

- **Medición del Ancho de la Sección de Aforo**

La posición horizontal de los puntos de observación se determinará con el auxilio de un equipo de topografía, una manila o una cinta métrica, que se extenderá provisionalmente a través del río hasta un punto fijo en la orilla. Este ancho se denominará franja o sección y servirá para determinar las áreas aferentes a las velocidades medias calculadas sobre cada vertical.

- **Selección del Numero de Verticales**

El espacio entre verticales será aquella distancia que permita que entre cada una de ellas no escurra más del 10% del caudal total y como mínimo 18 abscisas. Para la realización de los aforos líquidos y sólidos se tuvo en cuenta el procedimiento de mediciones hidrométricas del IDEAM.

- **Procedimiento de Muestreo en Suspensión**

El muestreo en suspensión que se lleva a cabo en cada una de las secciones de aforo se denomina muestreo integrado, porque integra la muestra tanto en profundidad como a lo ancho de la sección. El procedimiento es el siguiente.

- Una vez establecidas las verticales para la toma de caudal líquido, se determina en cuales verticales se llevará a cabo la toma de muestra en suspensión.
- La muestra en suspensión se saca en las verticales intermedias o sea hay nueve verticales en cada uno de los aforos con muestra en suspensión
- El tiempo de bajada y ascenso de la botella ha sido previamente calculado, en función de la profundidad; en ningún caso la velocidad supera $0.4 V_m$ donde V_m es la velocidad media en la vertical. Se descartan muestras que sobrepasen los $4/5$ de capacidad de la botella.
- Una vez se saca la muestra se pasa por el tamiz, se determina el volumen de la muestra y el exceso de agua se recoge en el balde, en el que reposa el volumen de agua medido de todo el muestreo.

- Se hace un muestreo integrado superficialmente a una misma altura en las secciones ubicadas a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ del ancho.
- Finalmente del volumen total almacenado en el balde se toma una muestra llamada alícuota que se extrae en un frasco de 500 ml y que contiene partículas menores de 63 micras; las partículas mayores se recogen separadamente en un frasco plástico.
- La muestra se lleva al laboratorio para determinar la concentración de sedimentos.

5.2 INDICES BIOLÓGICOS

Existen decenas de índices para medir la diversidad y todos son igualmente válidos, pues todos establecen una medida abstracta (numérica) que tiene utilidad en cuanto permiten la comparación de resultados. Se calcularon los índices de diversidad de Shannon & Weaver y el índice de dominancia de Simpson, adicionalmente se midió la riqueza (S) de número de especies encontradas.

El índice de Shannon & Weaver es utilizado para muestreos de comunidades grandes y con una diversidad indefinida. Asume que los individuos fueron muestreados aleatoriamente y que la mayoría de las especies están representadas en la muestra. El índice de dominancia de Simpson es útil para localizar la presencia de especies con valores altos de abundancia dentro de la comunidad, aunque no precisamente la especie dominante, ya que hay otros factores, además de abundancia, que hacen a una especie dominante.

$$H = \sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i)$$

Donde :

S : Número de Especies.

p_i : Frecuencia relativa de las especies.

Índice de Diversidad de Shannon & Weaver, (Gómez, 2011)

Los valores del índice de Diversidad de Shannon & Weaver varían entre 0 en adelante, siendo 0 los lugares de menor riqueza y los >0 los lugares de mayor riqueza de especies.

$$D' = \sum_{i=1}^S (p_i)^2$$

Donde :

S : Número de Especies.

p_i : Frecuencia relativa de las especies.

Índice de Dominancia de Simpson, (Gómez, 2011)

Los valores del Índice de Dominancia varían entre 0.1 y 1, siendo los valores cercanos a cero donde no se presenta dominancia de alguna especie y los valores cercanos a 1 los lugares con mayor probabilidad de que haya condiciones específicas que favorezcan el establecimiento de una especie.

5.3 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

En esta etapa se revisó tanto la información procedente de las campañas, como también un análisis general de las series hidrológicas que se emplearon en la modelación hidrodinámica.

En cuanto a la información batimétrica, se verificó que no hubiese puntos con profundidades anómalas, las cuales pudieran alterar la simulación hidrodinámica.

El procesamiento de la información hidrológica se llevó a cabo mediante el uso de técnicas simples de estadística, para excluir aquellos valores que generen un cambio importante en la media.

5.4 DESARROLLO CONCEPTUAL DEL MODELO HIDRODINÁMICO Y DE SEDIMENTOS

Un modelo conceptual es la representación simplificada de cierto fenómeno real y su comportamiento; en este caso, la dinámica espacio – temporal de los sedimentos en una poza artificial dejada por la explotación, para lo cual se estudiarán diferentes opciones de manejo con el fin de evaluar su recuperación sostenible a largo plazo.

Se realizó la modelación hidráulica haciendo uso del modelo bidimensional SMS 10.1 (Surface Water Modeling System), que es un programa que resuelve las ecuaciones hidrodinámicas en un medio continuo mediante la solución de los puntos del dominio discretizados por medio de los elementos de una malla, con dicha continuidad es posible modelar los vórtices en el tramo a modelar, la modelación se realizó con el fin de determinar las características del flujo, tales como: profundidad de flujo, velocidad, número de Froude, etc.

El modelo fue desarrollado por el Laboratorio De Investigaciones De Modelación Ambiental EMRL por sus siglas en ingles de la Universidad de Brigham Young. Más que un modelo, el SMS es una interfaz que integra una serie de modelos tanto para ríos como para costas. El SMS es una herramienta con la que se pueden simular modelos hidrodinámicos en una, dos o tres dimensiones por medio de elementos finitos como el RMA2, el FESWMS y el HVEL2D (Modelos Hidrodinámicos), el RMA4 (Modelo de Contaminantes), el CGWAVE, el ADCIRC y el STWAVE (Modelos Costeros).

Con este modelo es posible obtener información aplicable a la simulación de corrientes naturales y canales artificiales, los resultados obtenidos con este modelo hidrodinámico son similares a los obtenidos con modelos de una dimensión, tales como: profundidad de flujo, velocidad, transporte de sedimentos, transporte de sustancias químicas u orgánicas en una corriente de agua, migración de contaminantes bajo condiciones de flujo permanente y no permanente.

El modelo numérico aplicado es el FESWMS-FST2DH (Two-dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model), este sistema de modelación de agua superficial ha sido implementado por la Administración Federal de Carreteras de los EEUU (FHWA), principalmente para evaluar condiciones complejas en cruces de carreteras por cursos de agua, cuando el análisis convencional basado en cálculos unidimensionales no proporciona suficiente nivel de detalles para los objetivos del estudio.

El modelo hidrodinámico FESWMS en dos dimensiones para régimen subcrítico y supercrítico, se basa en la teoría de elementos finitos, el método de elementos finitos que se emplea es el método de Galerkin, en el cual las soluciones durante el proceso de iteración se dividen en regiones físicas llamadas elementos. Dichos elementos bidimensionales pueden ser de forma triangular o rectangular y son definidos por nodos conectados a lo largo de los bordes e interiores de dichos elementos, los cuales conforman el dominio computacional o malla. Los elementos bidimensionales más empleados son los siguientes (**Figura 5-3**):

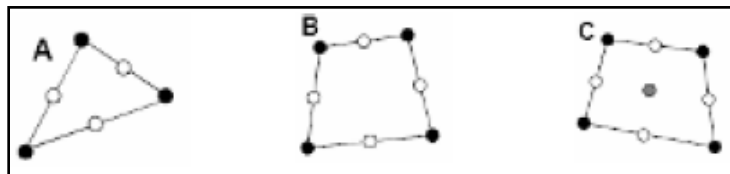


Figura 5-3: A) Triángulo 6 Nodos, B) Cuadrilátero 8 Nodos al Azar, C) Cuadrilátero 9 Nodos de Lagrange

El modelo hidrodinámico bidimensional promedia en la vertical y calcula los niveles de la superficie libre y las componentes horizontales de la velocidad de flujo en ríos, estuarios y zonas costeras, utiliza los conceptos básicos de la conservación de masa y momentum, las pérdidas friccionales se estiman a través de la ecuación de Manning o de Chezy, mientras que para caracterizar la turbulencia se utilizan coeficientes de viscosidad de remolino (Eddy).

Las ecuaciones básicas para un flujo bidimensional (2DH) provienen de la integración de las ecuaciones de Reynolds. La ecuación de continuidad para el flujo es:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0$$

$$U = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_s} u dz$$

$$V = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_s} v dz$$

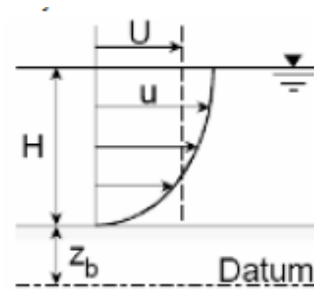


Figura 5-4: Velocidad Promedio en X.

Y donde las ecuaciones de movimiento comúnmente usadas son:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial (H + Z_b)}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho H} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial (HT_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (HT_{xy})}{\partial y}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial (H + Z_b)}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho H} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial (HT_{xy})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (HT_{yy})}{\partial y}$$

Dónde:

U: Velocidad promedio en x.

V: Velocidad promedio en y.

H: Profundidad.

Z_b : Elevación del lecho.

τ_{bx} , τ_{by} : Cambio horizontal del momentum debido a la viscosidad, turbulencia, flujo espiral y distribución no uniforme en la velocidad.

La distribución vertical de la velocidad media es calculada mediante la siguiente expresión:

$$u = \frac{U_*}{k} \log \left(\frac{z - z_b}{K} \right)$$

Dónde :

$$U_* = \sqrt{c_f} U \quad c_f = \frac{g}{C^2}$$

Dónde:

U_* : Velocidad cortante en el lecho.

K: Coeficiente de Von Karman

K: Constante con dimensiones de longitud.

Cf: Coeficiente de esfuerzo cortante derivado a partir del coeficiente de rugosidad obtenido por la ecuación de Manning (n) o la ecuación de Chezy (C).

En el módulo FESWMS, la viscosidad del torbellino (Eddy viscosity) es isotrópico por lo tanto:

$$\nu = \nu_{xx} = \nu_{xy} = \nu_{yx} = \nu_{yy}$$

La cual es expresada de la siguiente manera:

$$\nu = \nu_0 + c_\mu U_* H$$

Dónde:

ν_0 : Constante de viscosidad cinemática del Eddy, un valor de $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ para esta constante se considera adecuado según datos de laboratorio. (Roca et al., 2009)

c_μ : Coeficiente adimensional. Para ríos se sugiere un valor variable entre 0,25 y 0,60. (Roca et al., 2009)

U_* : Velocidad cortante en el lecho.

Se pueden analizar problemas tanto en flujo permanente como no permanente, además es capaz de calcular la profundidad y la distribución de velocidades alrededor de islotes, a través de puentes, contracción o expansiones de canales, confluencias o derivaciones de ríos, así como las entradas y salidas de estructuras hidráulicas.

Para el análisis de sedimentos se hizo uso de la herramienta FESWMS, el cual considera la siguiente ecuación de continuidad para flujos bidimensionales promediados en la profundidad, y así obtener los cambios del lecho por erosión y depositación del sedimento.

$$(1 - \eta_s) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{s1}}{\partial x} + \frac{\partial q_{s2}}{\partial y} = 0$$

Dónde:

η_s : Porosidad del material del lecho.

q_{s1} , q_{s2} : Caudal por unidad de volumen total de sedimento (incluye sedimento del lecho y sedimento en suspensión)

H: Profundidad.

Z_b : Elevación del lecho.

τ_{bx} , τ_{by} : Cambio horizontal del momentum debido a la viscosidad, turbulencia, flujo espiral y distribución no uniforme en la velocidad.

La cantidad de sedimento que entra en el dominio desde aguas arriba del tramo considerado es un aspecto importante en el análisis del transporte de sedimentos. El modelo permite seleccionar entre varios métodos diferentes la asignación de la entrada de sedimentos al modelo, entre ellas están: especificación de aguas claras (no hay entrada de sedimentos), considerando concentraciones volumétricas como condiciones naturales, especificando las tasas de transporte volumétrico para cada tamaño de clase, y forzando al FST2DH a calcular las tasas de transporte requeridas para obtener un equilibrio de sedimento a lo largo de la porción de canal. (FHWA, 2002)

El modelo conceptual de erosión y depositación usado en FESWMS – FST2DH está basado en las ideas de Bennett and Nordin (1977) en (FHWA, 2002). Donde el lecho está dividido en dos o tres capas dependiendo de si anteriormente ha ocurrido erosión o depositación (tres capas de depositación y dos capas para socavación). El proceso se ilustra esquemáticamente en la **Figura 5-5**. La capa superior es llamada la capa activa y siempre está presente, en otras palabras es la capa que contiene el material del lecho disponible para el transporte. Una cantidad de sedimento que se haya adicionado a la capa activa es luego sustraída y adicionada a la capa de depositación, esto ocurre cuando hay depositación, en el caso de que exista erosión sobre la capa activa, un volumen igual al erodado es sustraído de la capa original del lecho. Debajo de la capa activa está la capa inactiva, que es la capa utilizada para el almacenamiento. Debajo de estas dos capas está el lecho no perturbado.

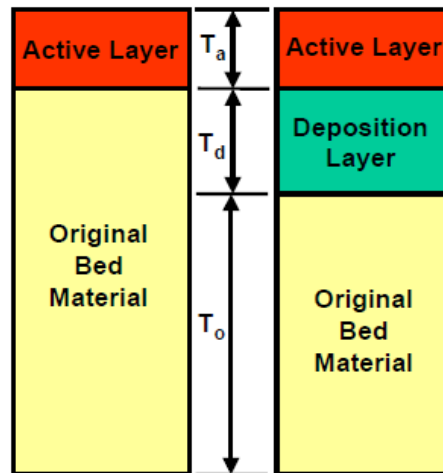


Figura 5-5: Modelo Esquemático de Composición del Lecho.

Dentro de las ecuaciones presentadas para el análisis del transporte total del lecho, se tienen las determinadas por Engenlund and Hansen (1967), Ackers and White (1973), Yang (1973, 1984), Laursen (1958) y Meyer-Peter and Mueller (1948) es usado para simular el movimiento de los sedimentos cohesivos.

5.5 IMPLEMENTACIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO

La implementación del modelo requirió de la construcción de una base de datos con los parámetros medidos en las campañas de aforo, y con las variables hidrológicas e hidráulicas de las pozas en estudio.

La calibración del modelo comenzó en la fase de conceptualización del problema al determinar las variables de interés para el modelo, y cuáles eran los parámetros de entrada que afectan a los mismos.

En el proceso de calibración se buscaron los valores de las constantes implementadas en el modelo, bajo las cuales, empezando desde un cierto valor "semilla", el cual se variaba hasta alcanzar un estacionario de los elementos.

5.6 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Los escenarios de simulación que se formularon pretendieron dar respuesta a la dinámica de los parámetros físicos en la poza, así mismo conocer la variabilidad espacial de los sedimentos, frente a diferentes condiciones morfológicas.

6. RESULTADOS

6.1 HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

En este capítulo se muestra todo el desarrollo realizado para la estimación de los caudales mensuales y máximos de los canales de entrada a las pozas, obtenidos a partir de los niveles de la superficie del agua del río Nechí los cuales fueron calculados considerando la serie histórica de precipitación y caudal de la estación La Esperanza.

6.1.1 Información Disponible

En la zona de estudio se localiza una estación pluviométrica y una limnigráfica operadas por el IDEAM, estas estaciones se listan a continuación en la **Tabla 6-1**.

Código	Estación	Corriente	Tipo	Coordenadas	
				Norte	Este
2703701	La Esperanza	Nechí	Pluviométrica	08°01'°	74°47'
2502148			Limnigráfica		

Tabla 6-1: Localización Estación Pluviométrica y Limnigráfica La Esperanza - IDEAM

6.1.2 Caracterización del Régimen de Precipitación

La caracterización de la precipitación en la zona de estudio se realizó utilizando los registros mensuales de precipitación de la estación La Esperanza. Ver **Figura 6-1**.

Según lo observado, se puede establecer que el régimen de precipitación en la zona es unimodal con un período húmedo que fluctúa entre los meses de abril a noviembre y un período seco de diciembre a marzo. En cuanto a la precipitación promedio multianual se tiene un valor igual a 4606,00 mm.

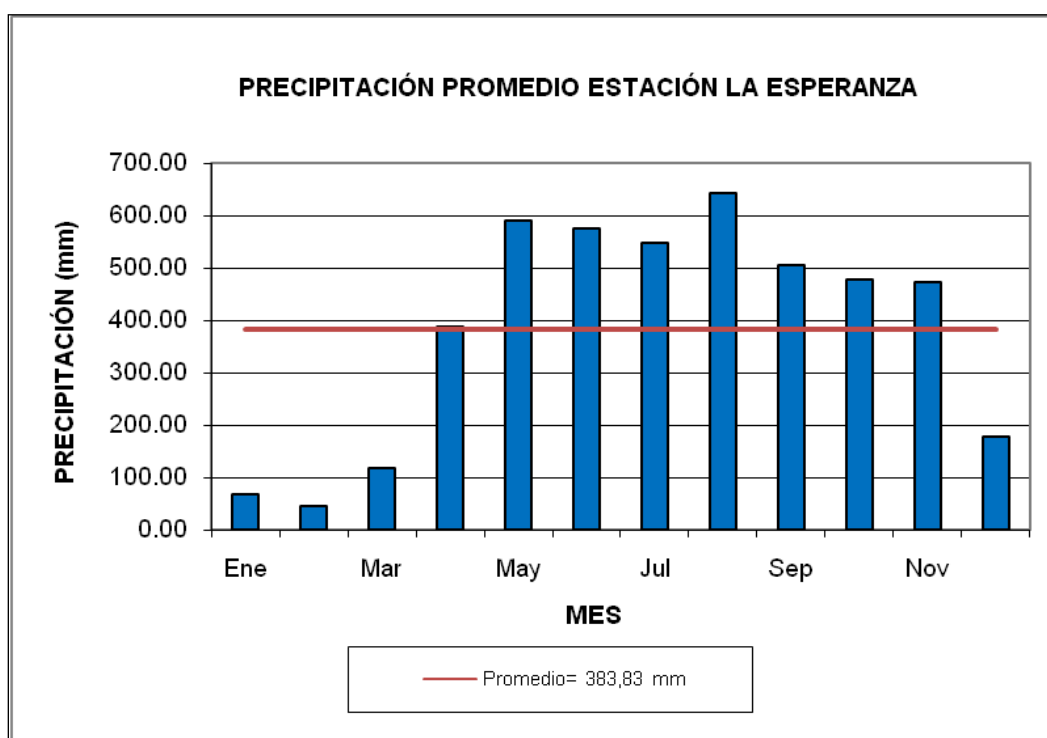


Figura 6-1: Distribución de Precipitación Promedio Mensual – Estación La Esperanza

6.1.3 Análisis del Comportamiento de los Caudales Medios Mensuales en la Estación La Esperanza

A continuación se muestra el análisis de la serie de caudales medios en la Estación La Esperanza. Se tiene de la serie histórica de caudal medio que el valor promedio multianual es igual a 832,26 m³/s, en cuanto a la distribución mensual se puede observar en la **Figura 6-2**, que el comportamiento mensual es de forma unimodal muy similar al comportamiento de la precipitación promedio mensual, presentada en el numeral anterior.

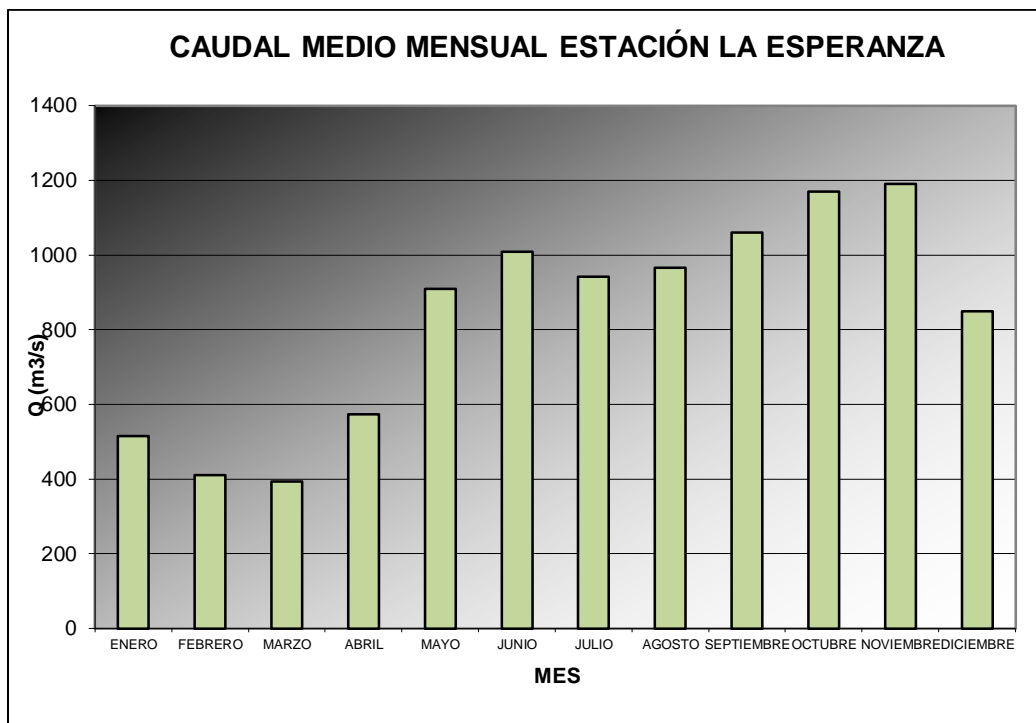


Figura 6-2: Distribución del Caudal Promedio Mensual – Estación La Esperanza

Se puede ver en la **Figura 6-2** que se presenta un período húmedo continuo desde el mes de mayo hasta diciembre; siendo los meses de octubre y noviembre los meses que presentan los caudales más altos en ese período. El verano se inicia en el mes de enero y va hasta el mes de abril, donde marzo es el mes en el que se presentan los caudales más bajos.

Es de gran importancia conocer estos comportamientos dentro de la caracterización de la zona, ya que en base a esto se realiza toda la planeación para la realización de los trabajos de la explotación minera y de la restauración de la zona.

En cuanto a la hidrología de las pozas, se determinó a partir de la medición de la superficie del agua, obtenidas de la curva de caudales medios de la estación limnigráfica La Esperanza perteneciente al IDEAM.

Inicialmente se consideró la componente hidrológica en la que se determinan los caudales de entrada mensuales en la poza de dragado y en la poza recuperada y se establecen los

niveles de la superficie del agua para cada mes, requeridos para la modelación hidráulica unidimensional y bidimensional del flujo. Actualmente se tienen los caudales medios mensuales medidos en la estación La Esperanza (estación perteneciente al IDEAM), y con estos se determinan los niveles de la superficie del agua en el punto de entrada a la poza artificial. Se tomaron estos caudales ya que la estación se encuentra muy cercana a la zona de explotación actual de Mineros S.A. A continuación en la **Tabla 6-2** se muestran los caudales medios mensuales obtenidos para el río Nechí en la estación anteriormente mencionada. En la **Figura 6-3** se muestra la variación del caudal medio mensual de la estación antes mencionada, mostrando los valores máximos en los meses de octubre a noviembre de cada año y los menores valores en los meses de febrero y marzo.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	VALOR ANUAL
515,63	410,72	393,17	573,84	909,64	1009,34	
JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	832,26
941,08	965,24	1060,07	1169,63	1189,47	849,32	

Tabla 6-2: Caudales Medios Mensuales - Estación La Esperanza (Río Nechí)

Con los caudales medios mensuales del río Nechí fue posible determinar el nivel de la superficie de agua en la entrada a cada la pozas de explotación UP-2, para ello se hizo uso del software HEC-RAS que es un modelo unidimensional que permite calcular los niveles de la superficie del agua bajo condiciones de flujo permanente o no permanente y gradualmente variado, en un canal natural o artificial. Este programa tiene la capacidad de calcular las condiciones de flujo para regímenes de flujo subcrítico y supercrítico o cuando se presente una mezcla de ambos. Igualmente, el programa, presenta también opciones de cálculo para la simulación de diferentes estructuras hidráulicas como puentes, box-culverts (alcantarillas de cajón) y vertederos.

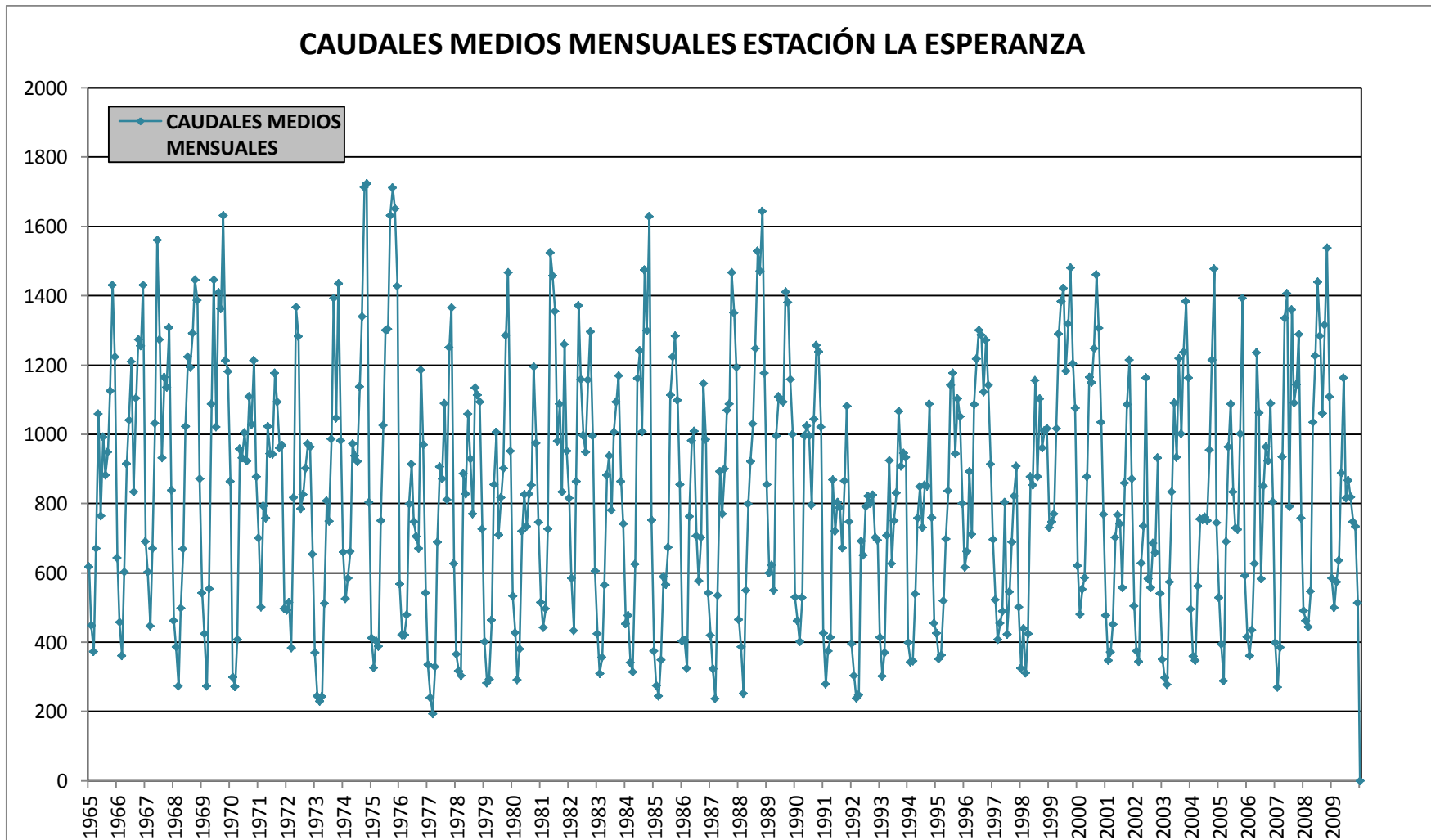


Figura 6-3: Hidrógrafa de los Caudales Medios Mensuales de la Estación La Esperanza

Periodo de Registro: 1965 a 2009

A continuación en la **Figura 6-4** se muestra la topología del río Nechí en el tramo de estudio, y en la **Figura 6-5** la sección del río Nechí donde se localiza la entrada del canal que comunica a este con la poza UP-2.

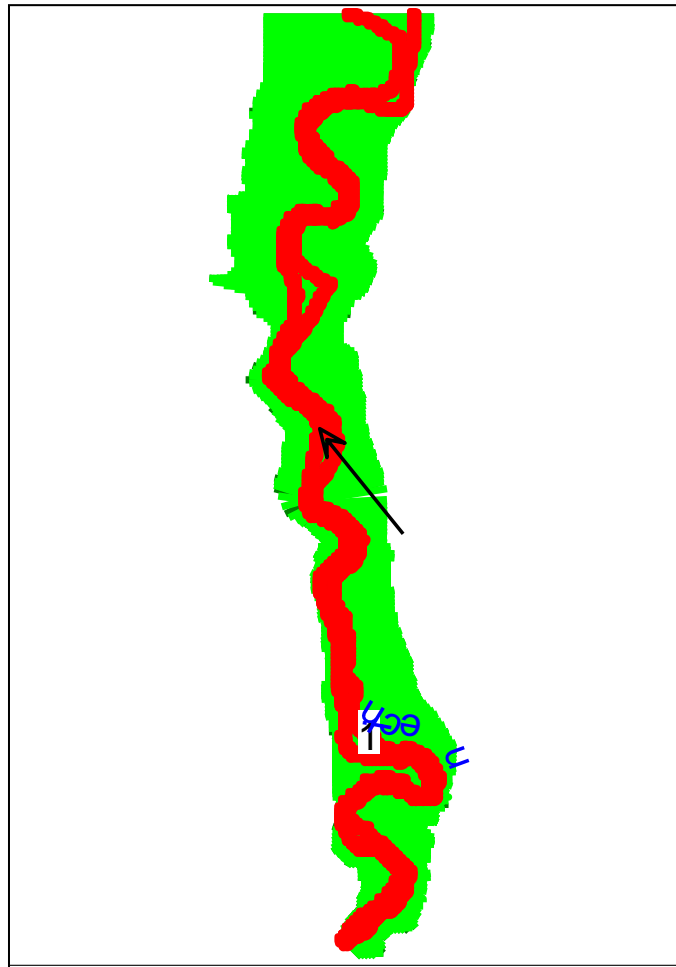


Figura 6-4: Tramo del río Nechí que se Utilizó para Determinar los Niveles a la Entrada de la UP-2

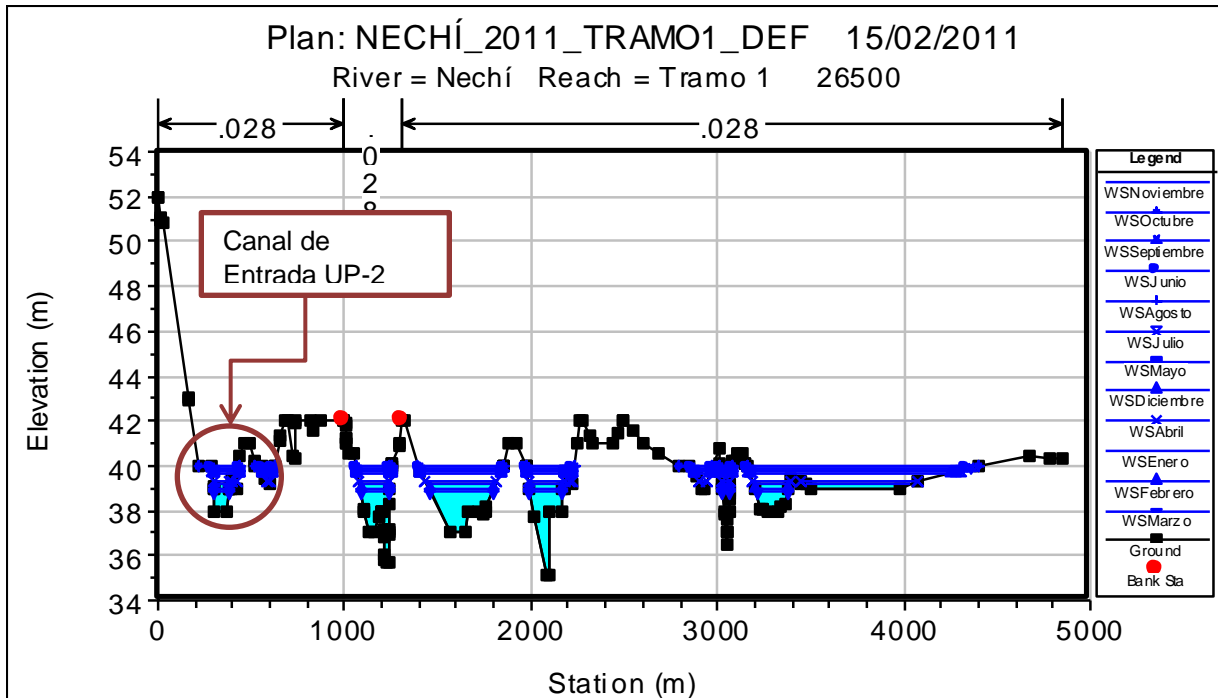


Figura 6-5: Sección del Río Nechí – Canal de Entrada UP-2

A continuación en la **Tabla 6-3**, se muestran los niveles mensuales de la superficie del agua para la unidad de producción UP-2, con dichos niveles se determinó el caudal entrante a las pozas a partir de una calibración de la sección del canal de entrada a la poza, los caudales calibrados y que corresponden a los caudales de entrada a la poza UP-2 se pueden ver en la **Tabla 6-4**.

Tabla 6-3: Niveles de la Superficie del Agua a la Entrada de la Poza UP-2

Mes	Elevación de la superficie de agua	
	Hw (msnm)	
Enero	39,15	
Febrero	38,92	
Marzo	38,87	
Abril	39,26	
Mayo	39,74	
Junio	39,85	

Mes	Elevación de la superficie de agua	
	Hw (msnm)	
Julio	39,77	
Agosto	39,80	
Septiembre	39,90	
Octubre	40,00	
Noviembre	40,03	
Diciembre	39,68	

Tabla 6-4: Caudales Calibrados a la Entrada de la Poza UP-2

Mes	Caudal
	Q
	(m ³ /s)
Enero	6,40
Febrero	3,50
Marzo	3,00
Abril	8,00
Mayo	18,50
Junio	21,80

Mes	Caudal
	Q
	(m ³ /s)
Julio	19,50
Agosto	20,30
Septiembre	23,30
Octubre	26,60
Noviembre	27,60
Diciembre	17,00

Con los caudales anteriormente obtenidos se llevó a cabo la simulación bidimensional del flujo para la poza de explotación UP-2, y para los análisis de posibles formas de restauración de dicha poza.

6.2 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LAS POZAS EN FASE DE EXPLOTACIÓN Y RECUPERACIÓN

En el presente numeral se exponen los resultados de la calidad del agua en las pozas, para ello se cuenta con los datos históricos obtenidos de un monitoreo de seguimiento realizado cada año. Para la fase de operación o de explotación se analizarán las variables en los canales de entrada y salida que comunican al río Nechí con la poza y se evaluarán los cambios entre los parámetros, de manera tal que se puedan conocer las bondades de la poza de explotación; posteriormente en la fase de recuperación se analizarán los parámetros en la poza, dado que esta solo cuenta con un canal de comunicación con el río; y finalmente se presentan las conclusiones obtenidas de esta evaluación, indicando si las pozas facilitan y optimizan los procesos de calidad de agua.

6.2.1 Variabilidad de los Parámetros Fisicoquímicos – Fase en Operación

Para determinar la calidad del agua en la poza, se cuenta con un monitoreo de las variables fisicoquímicas más importantes, y así medir y cuantificar los impactos o los resultados positivos encontrados.

Es de gran importancia conocer la variabilidad espacio-temporal de los parámetros de calidad de agua, ya que de ellos depende de la existencia de la vida, y de la integración del ecosistema.

La comparación consiste inicialmente en evaluar la eficiencia de la poza en los parámetros fisicoquímicos, dentro de los cuales se encuentran pH, temperatura, turbiedad, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales y DBO₅. A continuación en la **Tabla 6-5** se muestra un resumen de los resultados obtenidos en los canales de entrada y salida de la Poza UP-2, y en las **Figuras 6-6 a 6-12** se muestra la variabilidad de los parámetros de calidad de agua en el tiempo desde el inicio de la explotación en el canal de entrada y salida artificiales que comunican a la poza con el río Nechí.

Tabla 6-5: Resumen de los Parámetros Fisicoquímicos en los Canales de Entrada y Salida – Fase en Operación

Canal	pH (Unidades de pH)	Temperatura (°C)	Turbiedad (NTU)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
Entrada	7,10 ± 0,44	26,00 ± 0,79	495,95 ± 327,28	7,87 ± 0,73
Salida	6,98 ± 0,39	25,86 ± 0,68	359,82 ± 248,88	7,51 ± 0,73
Canal	Conductividad Eléctrica (us/cm.)	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	DBO ₅ (mg O ₂ /l)	
Entrada	54,63 ± 14,56	429,59 ± 278,11	3,71 ± 1,83	
Salida	53,69 ± 13,60	326,27 ± 143,41	3,60 ± 1,66	

Figura 6-6: Variación del pH para la Poza de Explotación UP-2

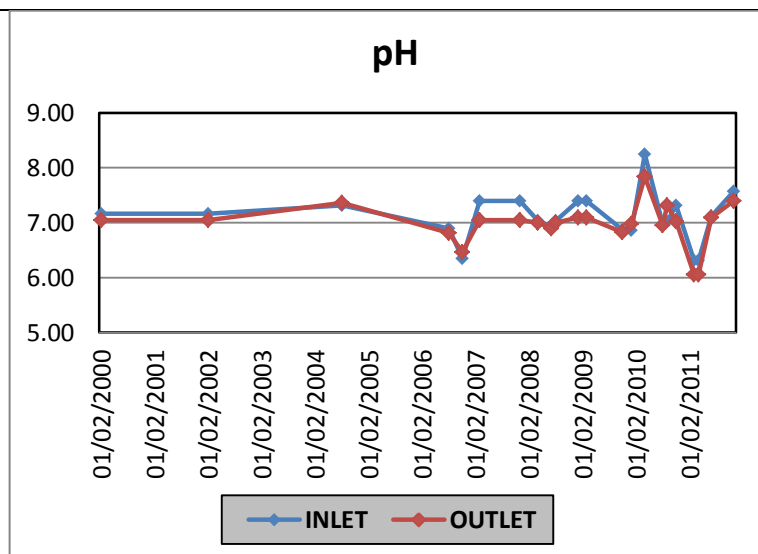


Figura 6-7: Variación de la Temperatura para la Poza de Explotación UP-2

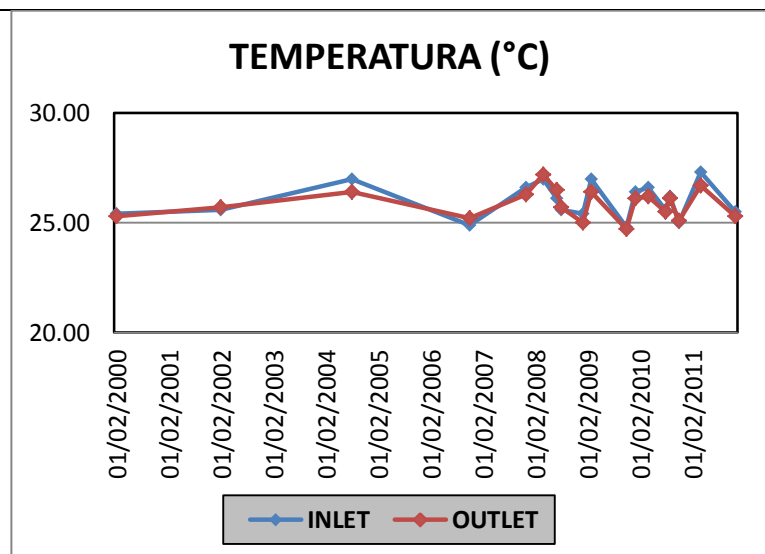


Figura 6-8: Variación de la Turbiedad para la Poza de Explotación UP-2

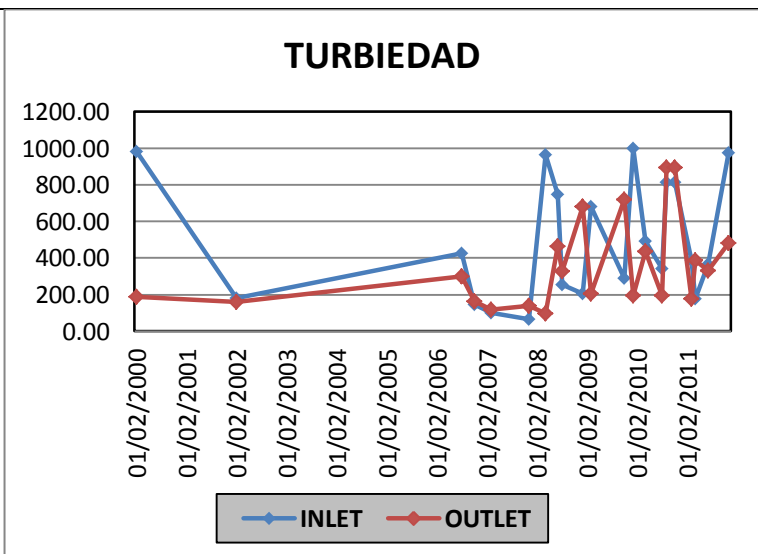
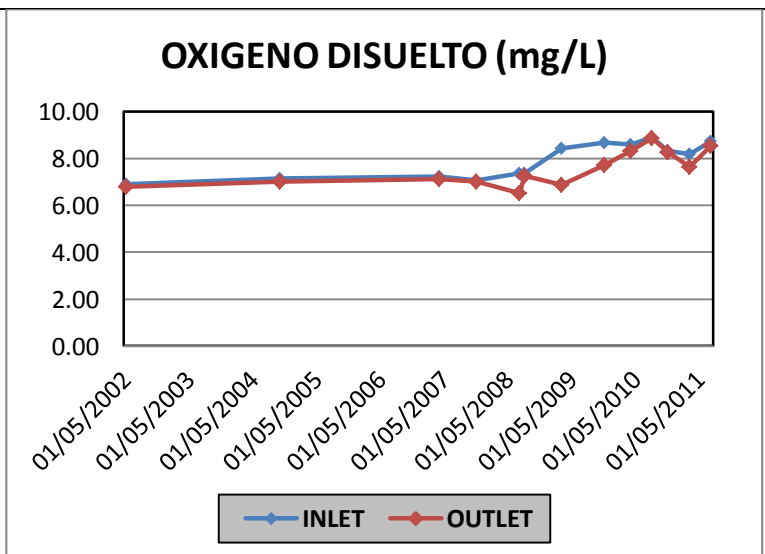


Figura 6-9: Variación del Oxígeno Disuelto para la Poza de Explotación UP-2



El pH a la entrada (INLET) y a la salida (OUTLET) no muestran diferencias en la tendencia, pero varios picos severos ocurren (Abril 12/2010, Marzo 30/2011) (**Figura 6-6**). El pH medio a la entrada fue de 7,1 ($\pm 0,44$), con pH variando entre 6,31 y 8,25. Para el canal de salida el pH medio fue de 6,98 ($\pm 0,39$), con una variación del pH entre 6,06 y 7,84. De este parámetro se concluye que los valores medios del pH no fueron estadísticamente diferentes.

La temperatura superficial no presentó márgenes amplios de variación. Dichos cambios se producen más lentamente en el agua que en el aire debido a que posee un calor específico más alto. El rango de variación oscila entre 24,70 y 27,30°C. Para los meses de marzo-abril, las temperaturas alcanzaron su máximo ascenso, ya que se espera que la temperatura disminuya en invierno (Septiembre, Octubre y Noviembre) debido a la entrada de aguas más frías provenientes del río Nechí y afluentes adyacentes.

La temperatura a la entrada (INLET) y a la salida (OUTLET) muestra una estacionalidad típica en la tendencia (**Figura 6-7**). La temperatura media a la entrada fue de 26,00 ($\pm 0,79$), con temperaturas variando entre 24,80 y 27,30. Para el canal de salida la temperatura media fue de 25,82 ($\pm 0,68$), con una variación de temperatura entre 24,70 y 27,20. Lo que indica que la temperatura media disminuyó un 0,54% entre la entrada y la salida. Adicional, la temperatura media fue significativamente mayor ($P < 0.05$) que la temperatura media a la salida.

La turbiedad hace que el agua pierda su transparencia y sea opaca, durante períodos de flujo bajo (flujo normal); la turbidez presenta valores menores a 10 NTU, y en épocas de creciente las partículas que son erodadas por el río se introducen originando que el agua se ponga de color café (por los limos, arcillas, coliformes y lodos), lo cual indica que el agua tiene valores altos de turbidez. Se puede ver de la **Figura 6-8**, que en la mayoría de los casos los valores en el canal de salida son menores o similares que en el canal de entrada, en este último se llegan a presentar valores de turbidez de hasta 1000 NTU y a la salida salen de 200 a 600 NTU, lo que indica que las pozas tienen una alta eficiencia de retención de este parámetro.

Las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) muestran un patrón muy similar y ascendente, donde los valores más altos están asociados con altos flujos de la corriente y decrecen en los meses de verano. La concentración de OD a la entrada varía entre 6,90 y 8,89 mg/L, y las concentraciones a la salida varían entre 6,52 y 8,86 mg/L. Sin embargo los patrones de concentración media no son significativamente diferentes.

Figura 6-10: Variación de la Conductividad Eléctrica para la Poza de Explotación UP-2

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (us/cm)

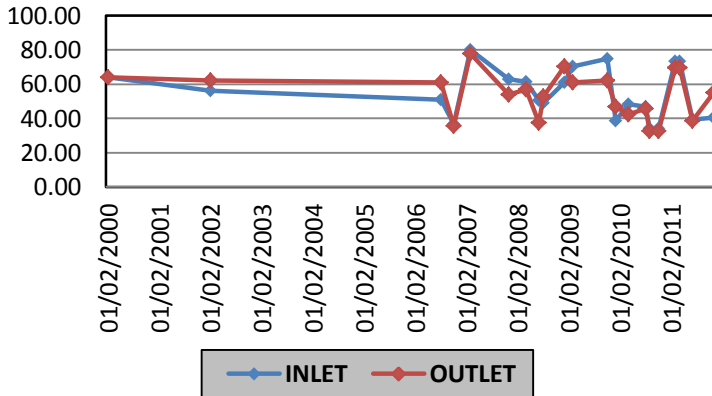


Figura 6-11: Variación de los SST para la Poza de Explotación UP-2

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L)

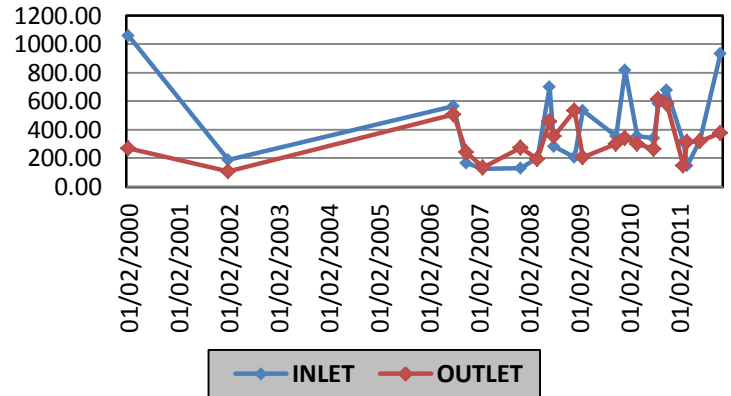
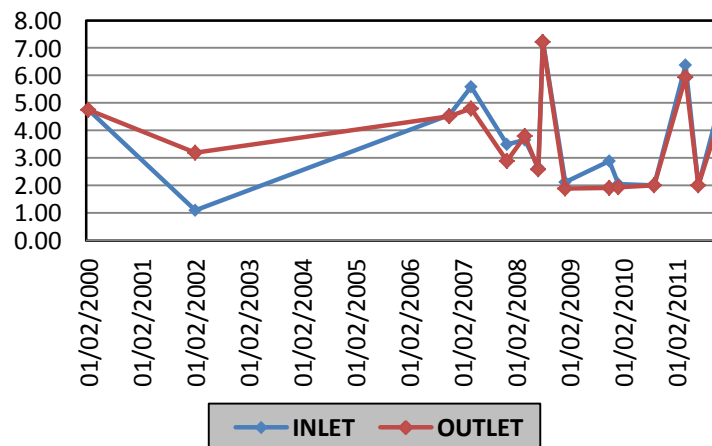


Figura 6-12: Variación del DBO₅ para la Poza de Explotación UP-2

DBO₅ (mg O₂/l)



La conductividad eléctrica encontrada en la poza que se está en fase de operación, es relativamente alta, con rangos de variación entre 34,20 y 80 us./cm a la entrada y 32,40 y 78 us./cm a la salida, la conductividad eléctrica media a la entrada es igual a 54,63 ($\pm 14,56$) y a la salida es igual a 53,69 ($\pm 13,60$). Los rangos de oscilación de la conductividad parecen estar limitados por las épocas de altos o bajos niveles de agua, según el año hidrológico, mostrando los mayores valores en veranos y menores valores

de conductividad eléctrica en las épocas de invierno. En cuanto a la variación, se puede establecer que el patrón es muy similar.

Para los sólidos suspendidos totales se encontró una variación entre 125 y 1061 mg/L a la entrada y 107.6 y 615 a la salida, el valor medio a la entrada es igual a 429.59 (± 278.11) y a la salida es igual a 326.27 (± 143.41), lo que indica una disminución del parámetro en 31.67% (p<0.05). Se puede observar que los sólidos suspendidos totales presentan valores muy altos, esto es debido a la carga de sedimentos proveniente del río Nechí por el canal de entrada.

Los incrementos de sólidos totales se llevan a cabo en la época de invierno, cuando el río Nechí comienza a adquirir mayor caudal y fuerza hidrodinámica, arrastrando grandes volúmenes de material en suspensión. Estos materiales, según su densidad y las características del medio receptor, son depositados en el fondo, lo que muestra que la poza trabaja como un sedimentador.

Lo anterior evidencia la eficiencia hidráulica de la poza ante los parámetros fisicoquímicos, mostrando que los sólidos en suspensión que entran del río a la poza son retenidos, además se puede ver que el dragado en la poza no llega a afectar la dinámica del río principal, debido a que no se evidencia un aumento en los sólidos suspendidos totales.

Este parámetro es un indicador que mide el estado de contaminación por materia orgánica, estableciéndose que valores menores a 4,00 mg/l son indicativos de baja contaminación por materia orgánica, la demanda biológica de oxígeno encontrada en la poza muestra en el canal de entrada un valor medio de 3,71 (± 1.83) y en el canal de salida es igual a 3,60 ($\pm 1,66$). Mostrando que la demanda disminuye una vez el flujo atraviesa la poza; corroborando la alta eficiencia que tienen estas pozas, además que no hay contaminación por materia orgánica en la fase de operación.

En conclusión, se tiene que para la fase de operación la poza muestra cambios significativos de los parámetros fisicoquímicos, sirviendo como un sedimentador de nutrientes y sólidos.

6.2.2 Variabilidad de los Parámetros Físicoquímicos – Fase de Restauración

Dentro de un proceso de restauración, el monitoreo consiste en el seguimiento y evaluación continuos de los cambios que experimenta el ecosistema, bajo los diferentes escenarios aplicados. Este monitoreo constante tiene como objetivo final asegurar el éxito en la restauración hidrogeomorfológica, puesto que brinda la información necesaria para evaluar y ajustar las prácticas de restauración, de modo que puedan ser modificadas en cualquier momento para una mejora. A continuación se muestran las variaciones en los parámetros físicoquímicos que han sido medidos en la poza de restauración, y finalmente se da una conclusión con respecto a las variaciones obtenidas en la poza de operación.

En la **Tabla 6-6** se resumen de los resultados obtenidos en la ciénaga artificial Pujador, y en las **Figuras 6-13 a 6-19** se encuentra la variabilidad de los parámetros de calidad de agua en el tiempo desde la terminación en la fase de operación hasta donde se tienen datos.

Tabla 6-6: Resumen de los Parámetros Físicoquímicos en la Ciénaga Artificial Pujador – Fase en Restauración

Ciénaga	pH (Unidades de pH)	Temperatura (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Conductividad Eléctrica (us/cm.)
Pujador	6,71 ± 0,26	30,68 ± 2,07	4,62 ± 0,84	60,63 ± 4,60
Ciénaga	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	DBO5 (mg O2/L)	Fósforo Total (mg P/L)	
Pujador	7,4 ± 3,09	5,1 ± 1,55	0,1 ± 0,05	

Figura 6-13: Variación del pH para la Ciénaga Artificial Pujador

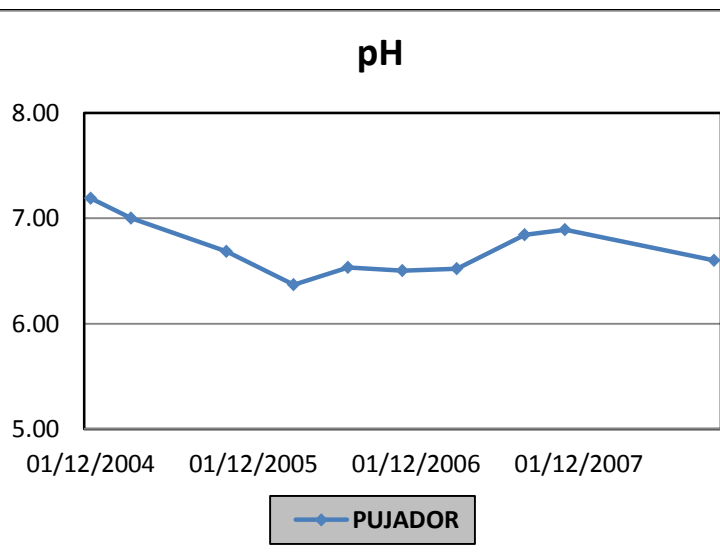


Figura 6-14: Variación de la Temperatura para la Ciénaga Artificial Pujador

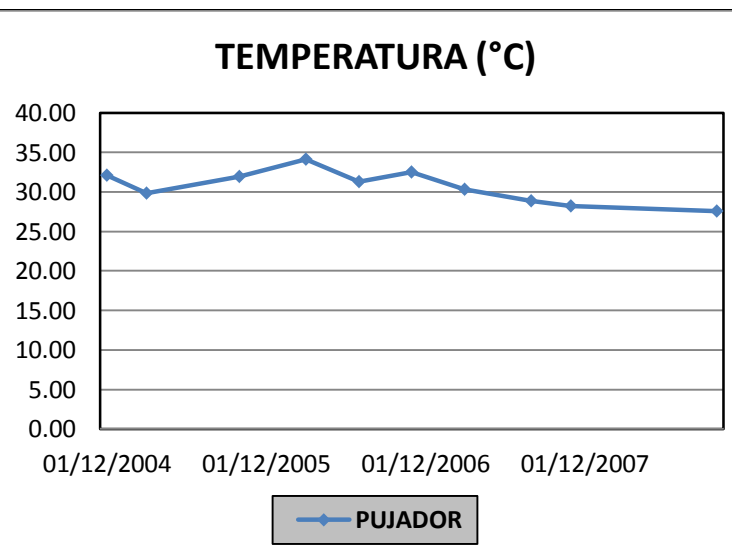


Figura 6-15: Variación del Oxígeno Disuelto para la Ciénaga Artificial Pujador

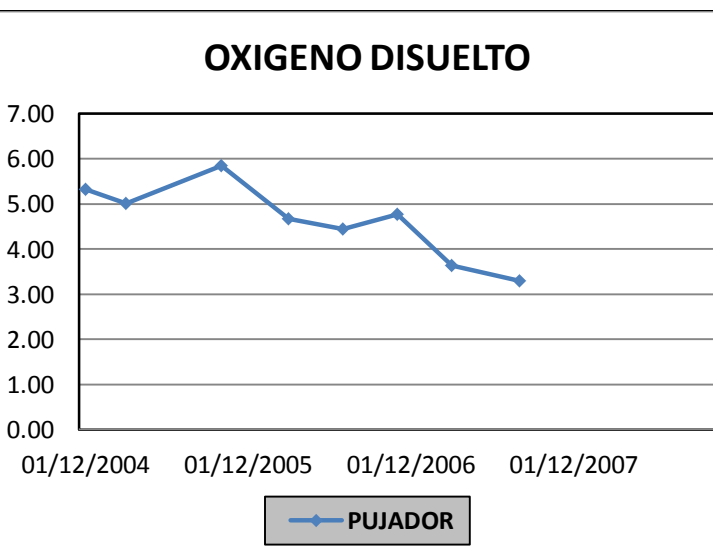
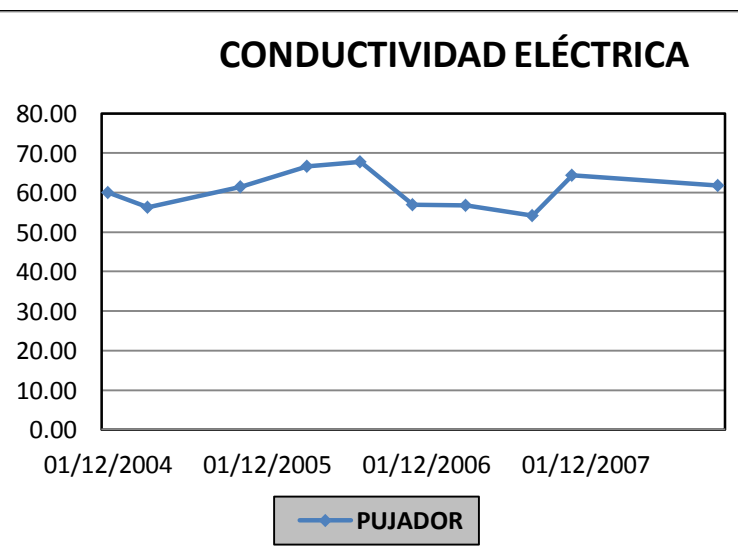


Figura 6-16: Variación de la Conductividad Eléctrica para la Ciénaga Artificial Pujador



Se puede ver de la **Figura 6-13** que el pH no tiene diferencias en la tendencia, mostrando un pH medio de $6,71 (\pm 0,26)$, con pH variando entre 6,37 y 7,19. Si se compara con las variaciones obtenidas en la fase de operación se puede ver que el valor medio obtenido en la fase de restauración es menor que el valor del pH en la fase de operación, señalando que este valor se encuentra cercano al punto neutro, lo cual se considera adecuado dado que los lagos y ciénagas de las partes bajas tropicales presentan rangos

de pH que varían entre 5,0 y 9,0. En términos generales el comportamiento del pH indicó una gran estabilidad espacial y temporal en la ciénaga artificial.

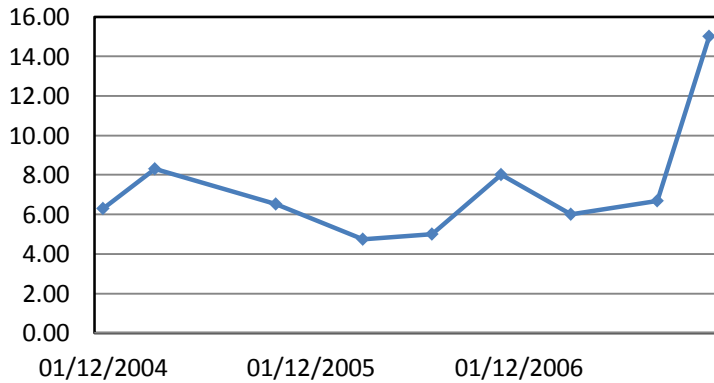
En cuanto a la temperatura superficial se puede ver de la **Figura 6-14** que no presentó márgenes amplios de variación. El rango de variación oscila entre 27,60 y 34,10°C. El valor medio fue de 30,68 ($\pm 2,07$).

Las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) muestran al igual que en la fase de operación, un comportamiento donde los valores más altos están asociados con altos flujos de la corriente y decrecen en los meses de verano. La concentración de OD varía entre 3,30 y 5,84 mg/L. Si se compara con los valores obtenidos en la fase de operación, se puede ver que este valor disminuye drásticamente en la fase de restauración, esto se debe a que una vez se deja la poza abandonada, ésta empieza a llenarse de sedimentos lo que hace que la profundidad de la poza sea menor y por tanto la variación del oxígeno disminuya.

La conductividad eléctrica encontrada en la ciénaga Pujador muestra una variación 54,20 y 67,70 us./cm, la conductividad eléctrica media es igual a 60,83 ($\pm 4,98$). Los rangos de oscilación de la conductividad parecen estar limitados por las épocas de altos o bajos niveles de agua, presentando diferencias importantes asociadas a los periodos climáticos. Comparando con los valores de conductividad eléctrica obtenidos en la fase de operación se puede establecer que muestra el mismo comportamiento hidrológico, indicando un aumento en el valor medio; esto es justificado con los valores de temperatura registrados, porque un aumento en la temperatura permite que los iones pasen más rápidamente, conduciendo mayor electricidad.

Figura 6-17: Variación de los SST para la Ciénaga Artificial Pujador

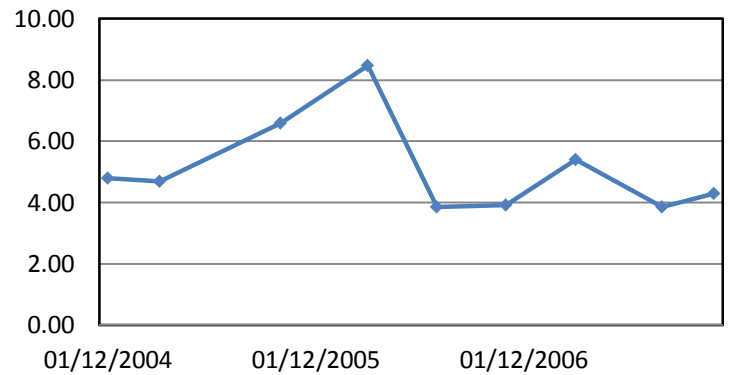
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES



PUJADOR

Figura 6-18: Variación del DBO₅ para la Ciénaga Artificial Pujador

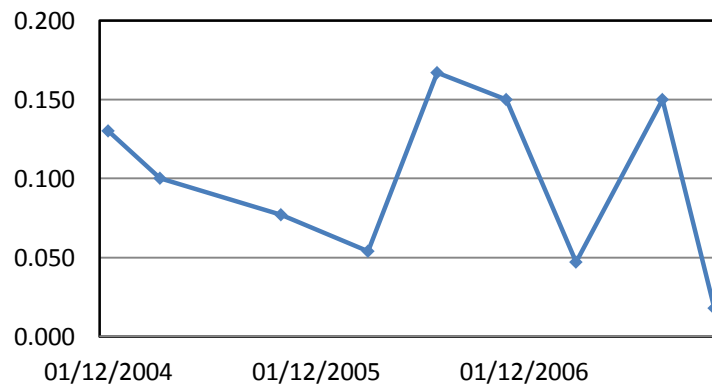
DBO₅



PUJADOR

Figura 6-19: Variación del Fósforo Total para la Ciénaga Artificial Pujador

FÓSFORO TOTAL



PUJADOR

De la **Figura 6-17** se puede ver que los sólidos suspendidos totales obtenidos en la ciénaga Pujador muestran una variación entre 4,75 y 25 mg/L, obteniéndose un valor medio igual a 7,40 (± 3.09), comparando con los sólidos suspendidos totales, se puede ver una disminución notable, lo que indica que el funcionamiento de la poza con un solo canal es muy eficiente. Una vez concluida la operación, cesados los procesos de remoción de sedimentos y recuperado el canal de entrada la tasa de erosión disminuye y con ella la

tasa de producción de sedimentos. Adicionalmente, la conexión de la poza con el río Nechí por el canal de salida evita la entrada de sólidos suspendidos con mayor frecuencia, y por ende se evita la colmatación de la poza.

Por otro lado, la demanda biológica de oxígeno encontrada en la poza muestra un valor medio de 5,10 ($\pm 1,55$), en general el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos requieren de concentraciones de oxígeno disuelto superiores a 5 mg/l, siendo valores fundamentales para el mantenimiento y desarrollo de la fauna y flora acuática y haciendo que las bacterias y otros microorganismos dispongan de una rica fuente de alimentos, permitiendo que se reproduzcan con rapidez, y teniendo como límite un valor de 10 mg/l ya que valores mayor son característicos de aguas contaminadas.

Se evaluó el fósforo total en la ciénaga artificial Pujador (**Figura 6-19**) pues es un valor de importancia para definir el estado de eutrofización del ecosistema. Se encontró para la ciénaga artificial Pujador un valor medio de 0,10 ($\pm 0,05$) mg P/L, y con variaciones entre 0,02 y 0,17, encontrándose un ecosistema eutrófico, lo que hace que la ciénaga sea productiva.

Los resultados de esta etapa arrojan que en las estaciones de muestreo en la fase de operación o explotación, en una misma época, presentan un patrón similar de comportamiento, indicando una eficiencia hidráulica de las pozas. Por su parte para la fase de restauración, se pudo observar como las variables muestran una disminución de los parámetros fisicoquímicos, donde los valores se encuentran cercanos a los sugeridos para un ecosistema natural, validando la optimización de los procesos de calidad de agua desde la fase de explotación hasta la fase de restauración.

La suma de todos los factores limnológicos medidos en la ciénaga artificial Pujador implican una respuesta a la capacidad del mismo como productor, siempre basados en el régimen hidrológico anual que regula el sistema, convirtiéndolo en un plano inundable en donde sus aguas obtendrán re-oxigenación, nutrientes y una gran capacidad de amortiguación por el mismo hecho de que esta ciénaga obra como filtro en el sistema.

En general, la dinámica de las pozas y futuras ciénagas sobre el río Nechí están regidas por cambios estacionales hidrológicos. La causa y efectos biológicos dependen de la rapidez inundante o bajante de las aguas.

6.3 ANÁLISIS HIDROGEOMORFOLÓGICO DE LAS POZAS DE EXPLOTACIÓN

Como se dijo en el **Numeral 2.4**, la restauración hidrogeomorfológica en ecosistemas de ciénagas naturales o artificiales o en humedales comprende la rehabilitación batimétrica y el restablecimiento de hábitats acuáticos para la conservación fauna, considerando para ello el análisis y distribución de los sedimentos, de manera tal que a largo plazo no afecten el cuerpo de agua recuperado y se contribuya a mejorar la calidad del agua y a incrementar la capacidad de embalsamiento en épocas de creciente.

Es importante mencionar que para el desarrollo de este numeral se cuenta con la batimetría de la poza que se encontraba en explotación (Poza UP-2), y de la cual se hará la propuesta de los posibles escenarios de restauración, considerando para ello los cambios morfológicos de la poza, de manera tal que se determine las posibles opciones de explotación y de restauración de la poza garantizando la sostenibilidad de la poza a futuro.

En este capítulo se presenta el análisis de los parámetros hidráulicos de mayor importancia, se da a conocer la variación espacio-temporal de la profundidad y la velocidad, además de evaluar la eficiencia hidráulica de las pozas para diferentes escenarios morfológicos, y así ver la variación de sedimentos y definir patrones e impactos de la sedimentación, para ello se consideró el modelo FST-2DH incluido en el software en elementos finitos SMS (Surface Water Modeling System).

Los análisis numéricos y las técnicas de modelación son considerados buenas herramientas al simular y pronosticar el transporte y depositación de sedimentos en lagos y humedales. Para poner en marcha el modelo se requieren los resultados del modelo hidrodinámico 2-D como dato de entrada, para lo cual se hará uso del software SMS 10.1.

El plan a desarrollarse es el siguiente:

- Construcción del mapa geométrico del lecho de la poza usando los datos batimétricos como parámetro de entrada en el modelo bidimensional.
- Calibrar y validar el modelo bidimensional.
- Estudiar el problema de sedimentación en la poza usando el modelo de transporte de sedimentos incluido en el SMS 10.1.
- Detectar los cambios espacio-temporales de la depositación de sedimentos en la poza para cada uno de los escenarios evaluados.
- Determinar cuál es el escenario óptimo para la fase de restauración, teniendo en cuenta la sostenibilidad de cuerpo de agua a largo plazo.

De acuerdo a lo anterior, el objetivo de este análisis es determinar el escenario óptimo para la fase de restauración; para lo cual se proponen tres posibles escenarios:

- *Escenario 1:* Consiste en dejar la poza que estuvo en proceso de explotación con la conexión al río mediante los canales artificiales de entrada y salida.
- *Escenario 2:* Consiste en dejar la poza con una sola conexión con el río mediante el canal de entrada.
- *Escenario 3:* Consiste en dejar la poza con una sola conexión con el río mediante el canal de salida.

6.3.1 Condiciones de Frontera para Modelación Hidráulica

Los escenarios propuestos serán evaluados en la poza de explotación UP-2, dado que los puntos de elevación levantados en campo se realizaron un mes antes de entrar a la fase de restauración (Diciembre/2010), por lo cual se cuenta con las máximas profundidades de la poza dejada por la draga que se encontraba en operación, toda la batimetría fue interpolada a partir de puntos de dispersión (x, y, z) levantados en campo y usando el sistema coordenado MAGNA SIRGAS definido para Colombia. Estos puntos se usaron

posteriormente en la generación de la malla batimétrica de cada uno de los modelos propuestos.

- **Discretización de la Malla**

El modelo se hace mediante la construcción de una malla en elementos finitos, donde a cada uno se le asocia con un vector de velocidad. Debido a que el modelo está en capacidad de modelar bidimensionalmente la distribución de velocidades y profundidades, es bastante útil para observar las zonas de alta vorticidad, zonas de aquietamiento del flujo y zonas de altas velocidades, ya que muestra gráficamente la magnitud y dirección de los vectores de velocidad.

La discretización de la malla se realizó considerando elementos rectangulares; en primer lugar, porque un elemento cuadrilátero cubre mayor área que un elemento triangular, y permite que sean menos elementos; y segundo, porque puede mantener buenos ángulos internos y tiene mayor resolución en una dirección haciendo que el modelo sea más estable. La malla fue determinada a partir de la llanura de inundación obtenida para el caudal medio mensual obtenida del modelo unidimensional. A continuación se muestran las mallas utilizadas para la modelación hidráulica bidimensional de los tres escenarios propuestos. (**Figuras 6-20 a 6-22**).

Después de generada la malla, se realiza un TIN (Triangulated Irregular Network) a partir de los puntos de dispersión obtenidos del levantamiento batimétrico, el cual es usado en la interpolación de los niveles del lecho. En las **Figuras 6-23 a 6-25** se muestran la batimetría inicial requerida para la simulación hidráulica.

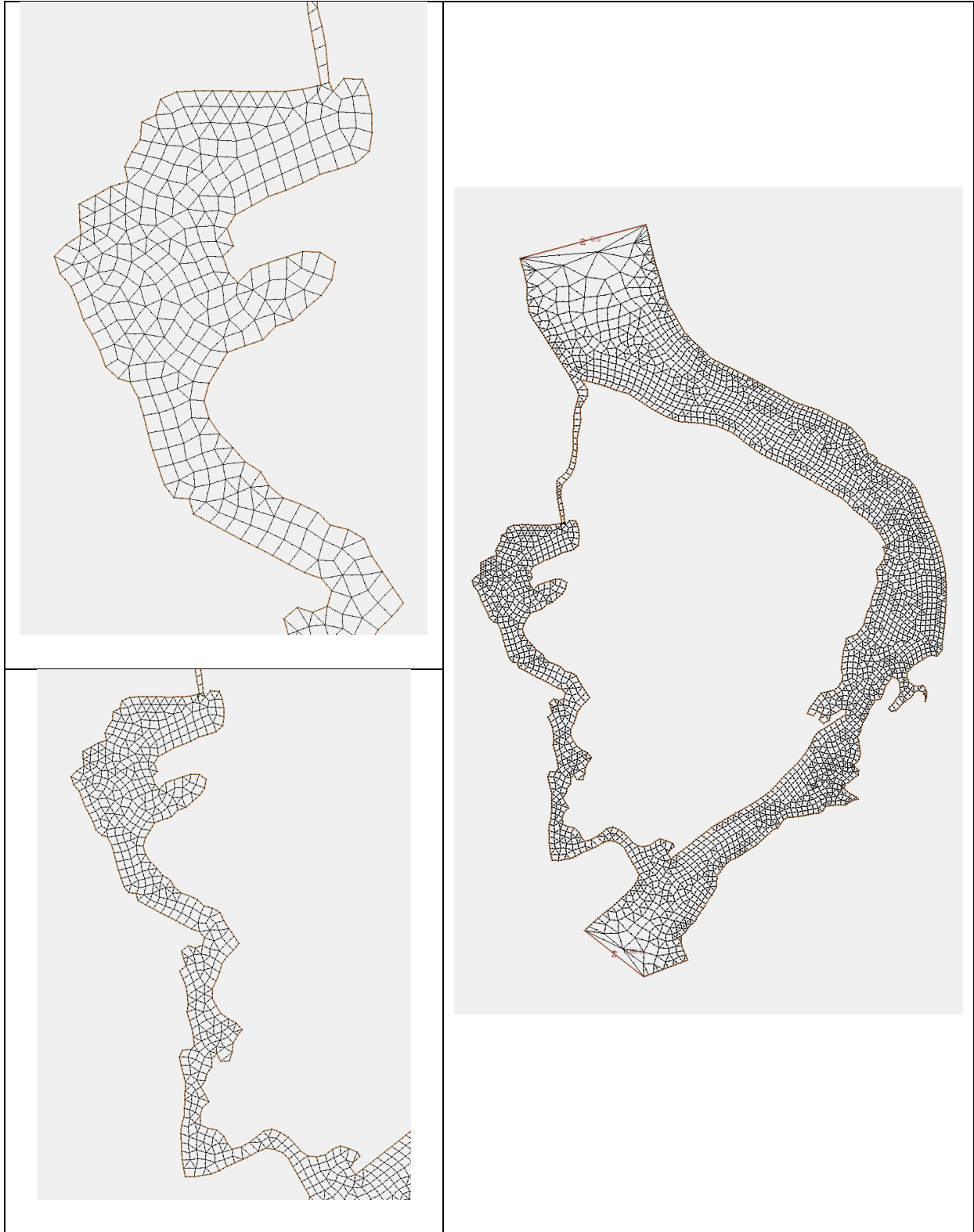


Figura 6-20: Discretización de la Malla en Elementos Finitos – Escenario 1

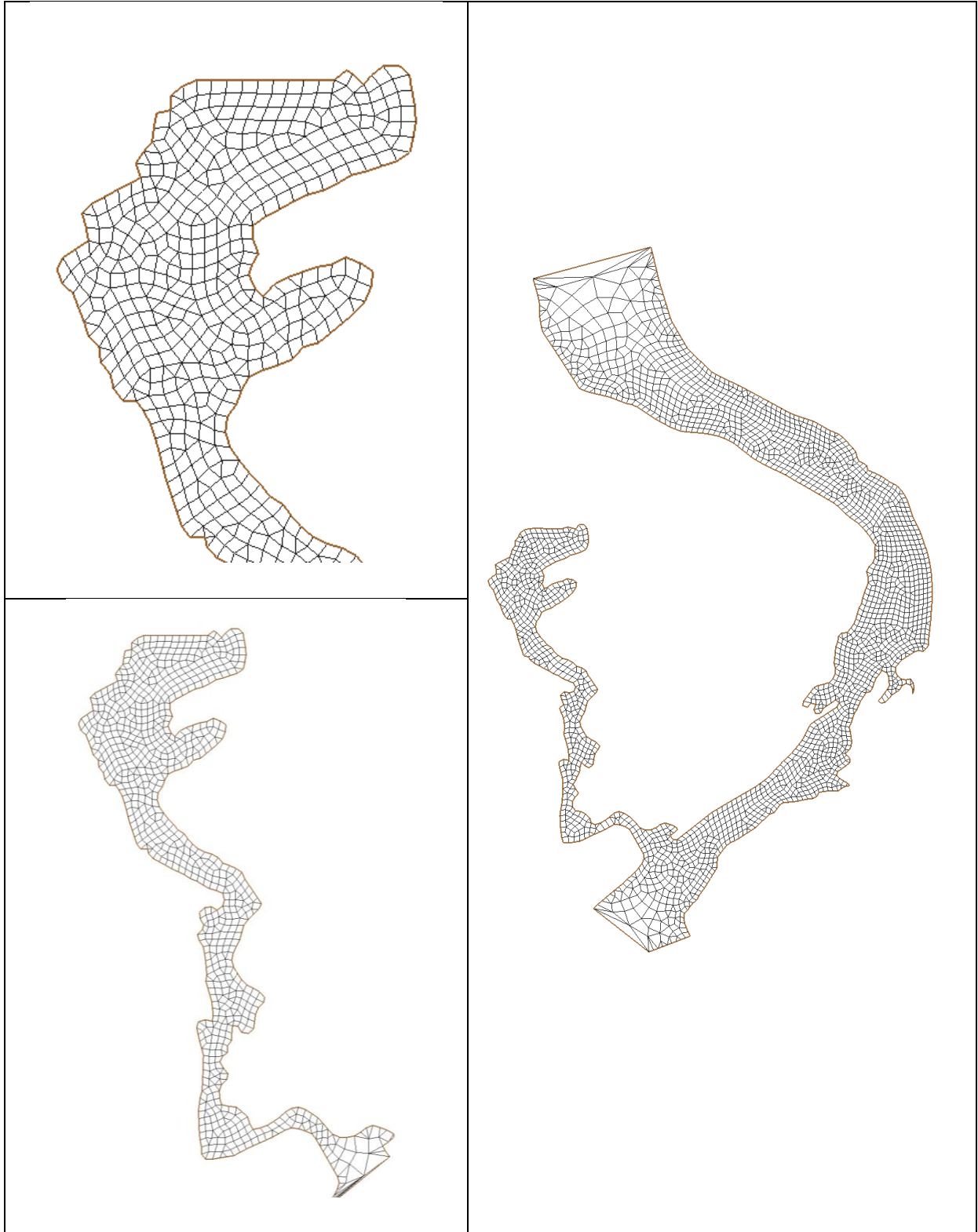


Figura 6-21: Discretización de la Malla en Elementos Finitos – Escenario 2

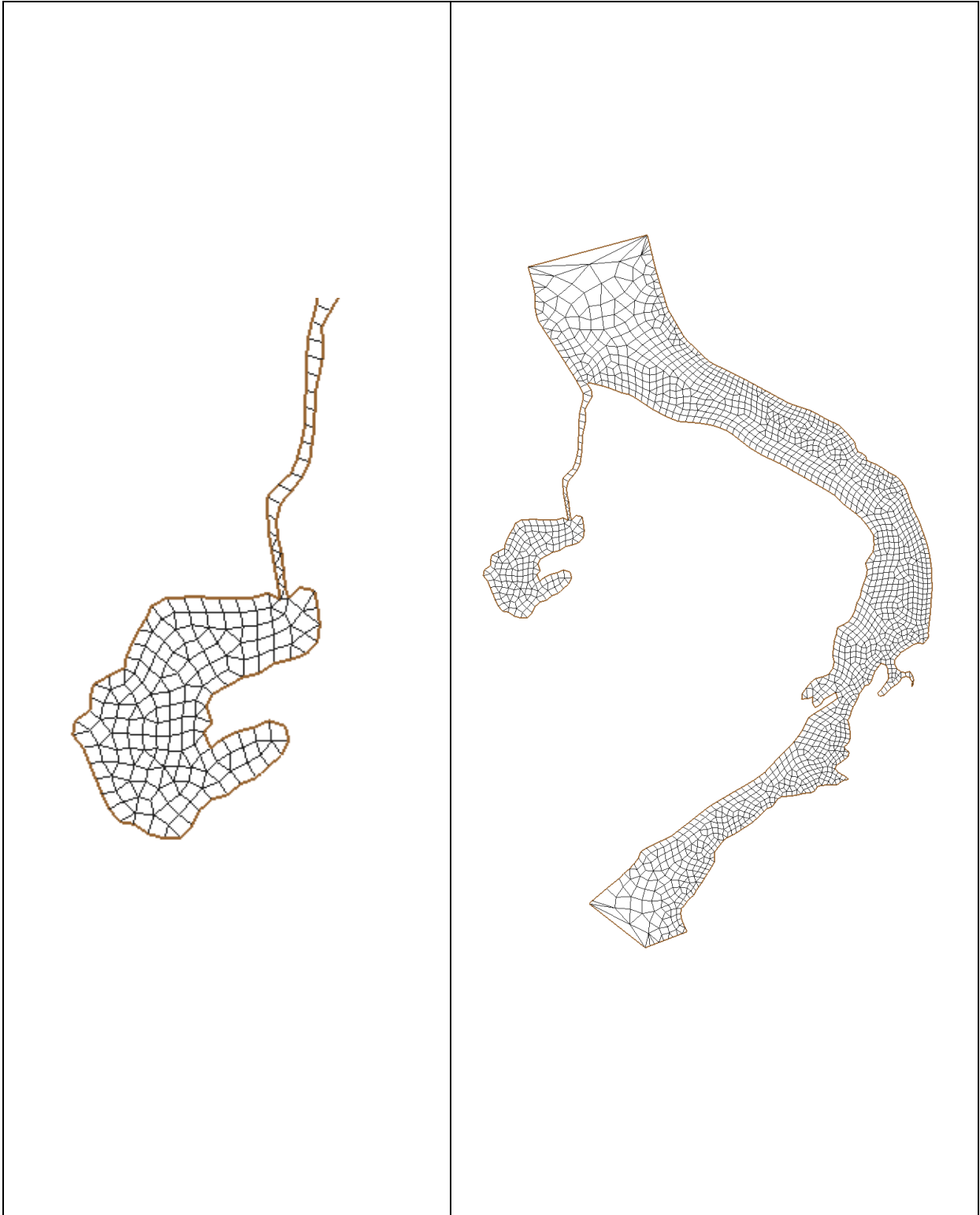


Figura 6-22: Discretización de la Malla en Elementos Finitos – Escenario 3

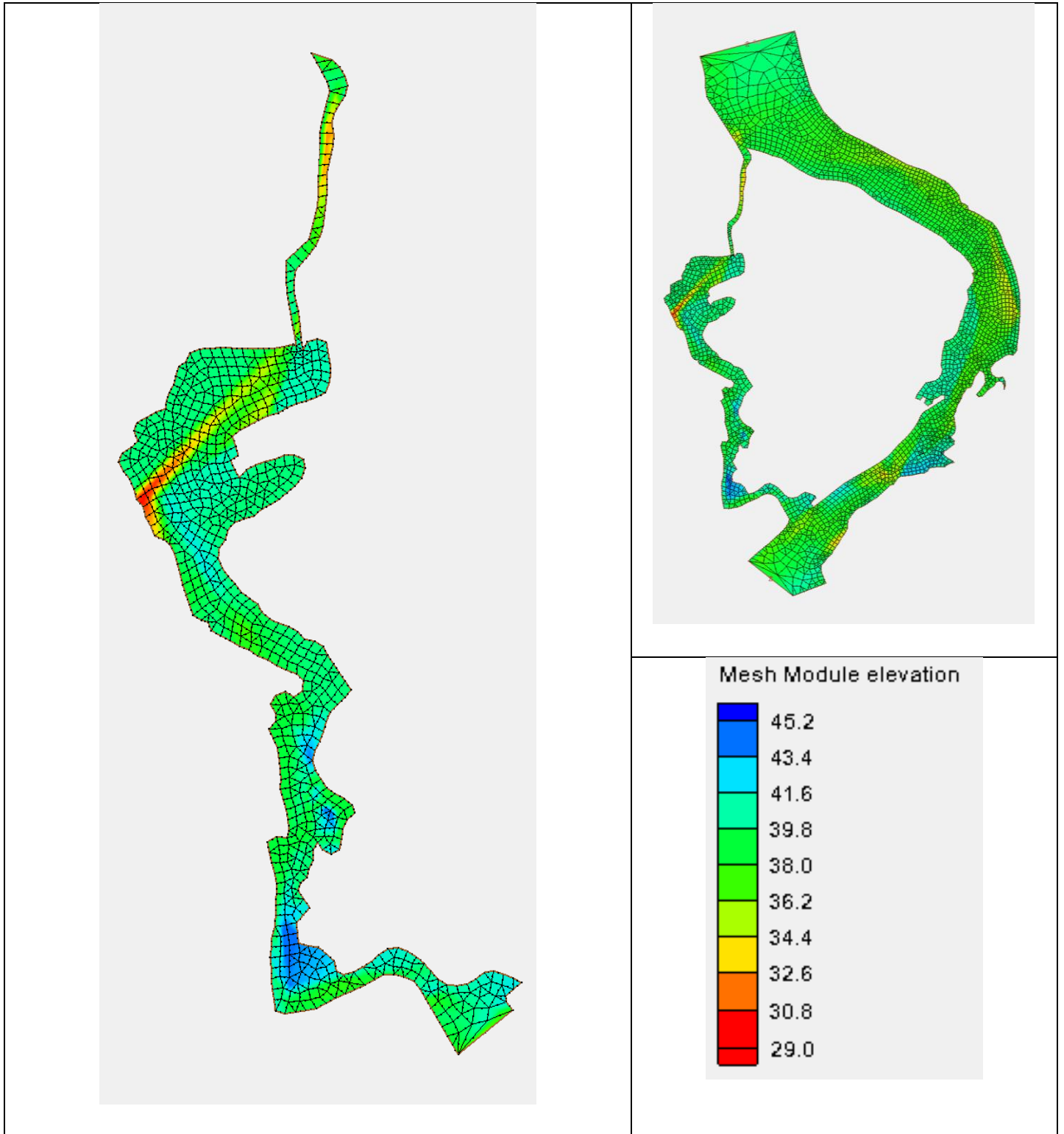


Figura 6-23: Batimetría Inicial – Escenario 1

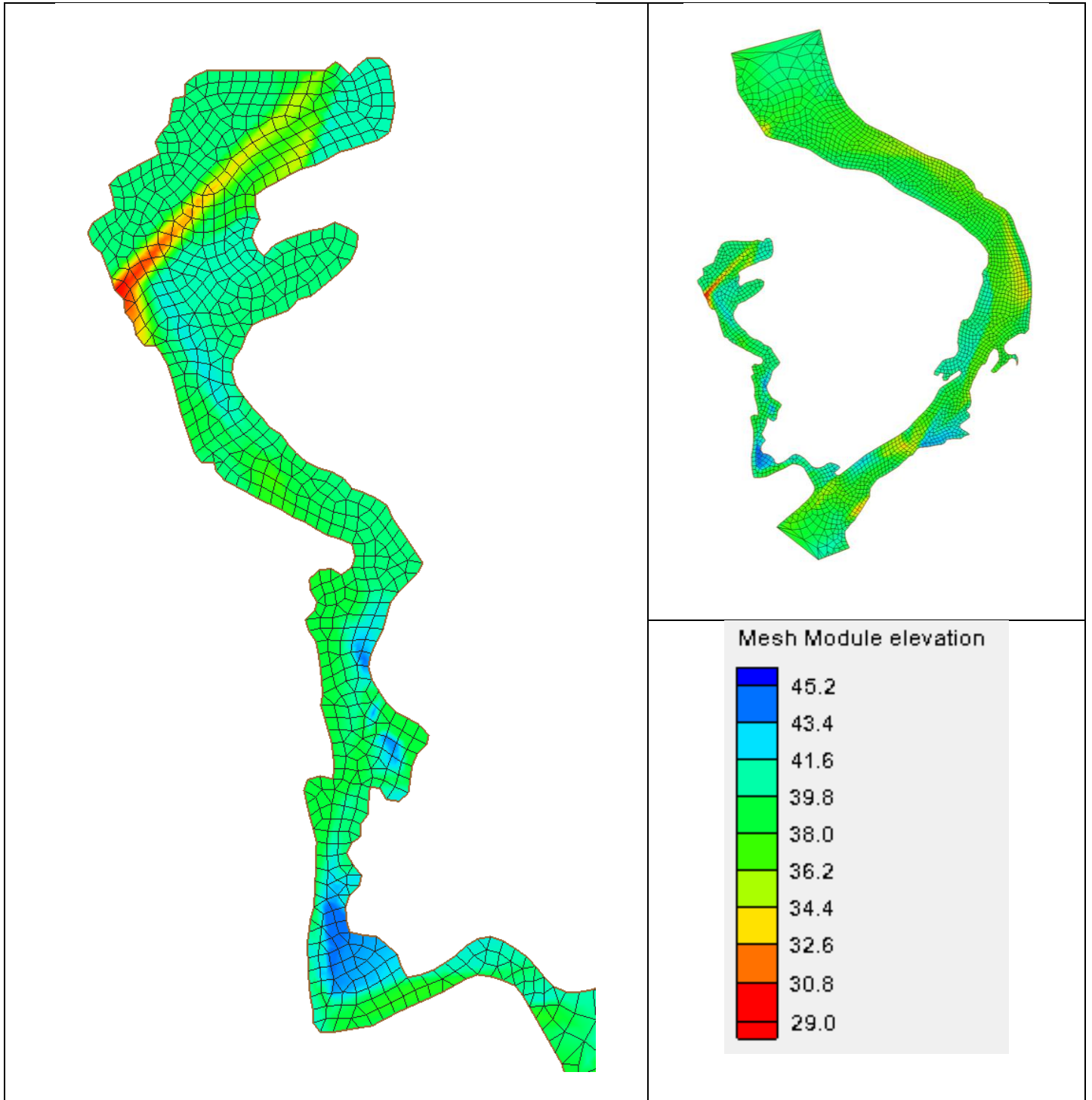


Figura 6-24: Batimetría Inicial – Escenario 2

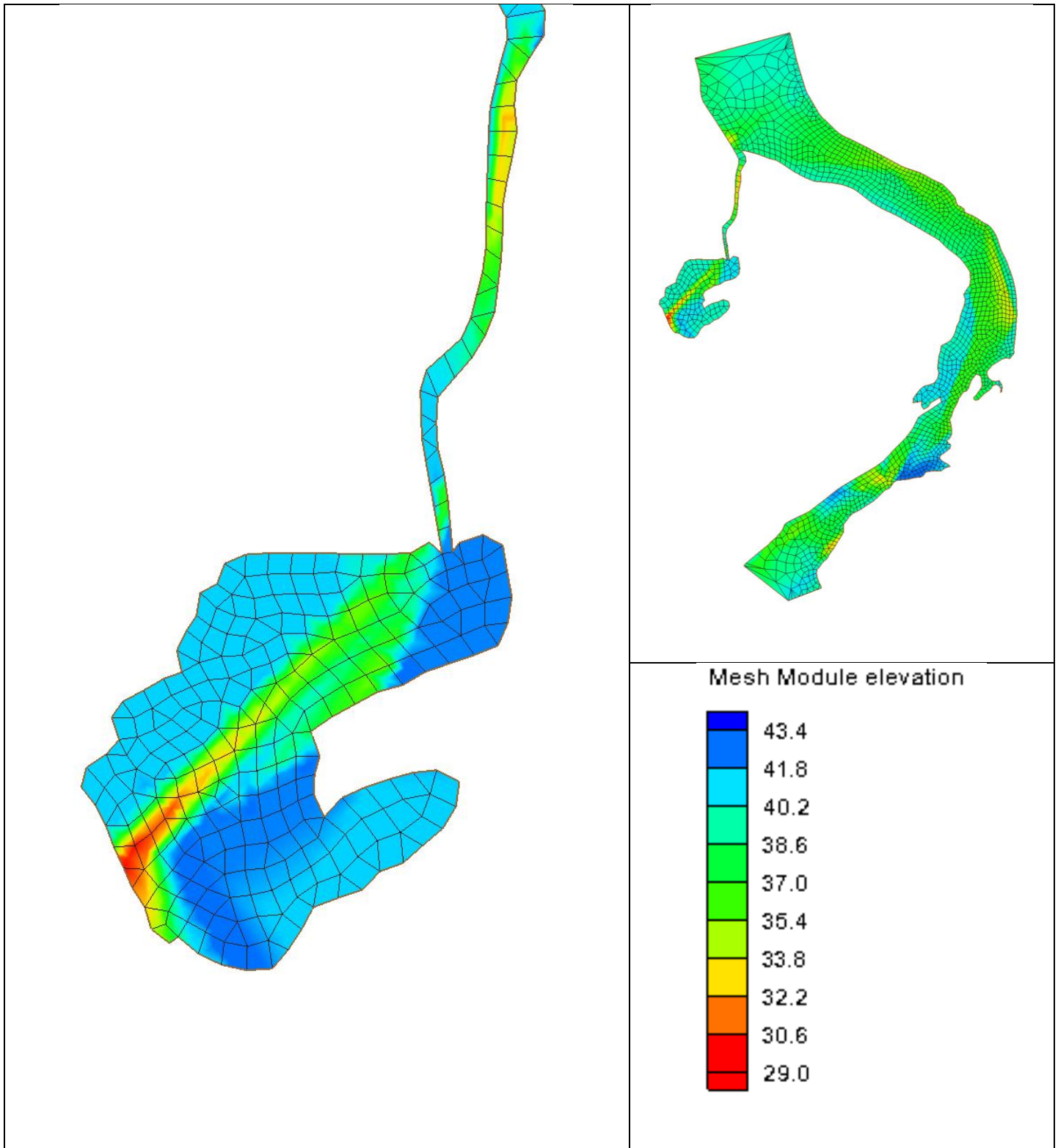


Figura 6-25: Batimetría Inicial – Escenario 3

Los datos de entrada consisten en un mapa de contornos y unas condiciones de borde, el mapa de contornos es la delimitación del área por la que el agua fluye, que en nuestro caso corresponde a la llanura de inundación obtenida para el nivel del caudal medio; las condiciones de borde están definidas por los caudales de entrada al tramo de estudio y el nivel del agua aguas abajo del tramo. Debe tenerse en cuenta en el modelo que el programa trabaja con la ecuación de conservación de masa, por lo cual, la suma de los caudales de entrada debe coincidir con el caudal que se defina para la sección de salida del tramo.

- **Condiciones de Borde: Simulación Hidrodinámica**

El modelamiento se realizó bajo las siguientes condiciones de frontera:

- Régimen de flujo subcrítico. La selección de este régimen en la modelación obedece a que por las bajas pendientes del cauce es dicho régimen el que gobierna el comportamiento hidráulico del flujo en la zona evaluada.
- Rugosidades: Se tomó un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,028 para los canales y la poza y para los taludes una rugosidad de 0,040 (Chow, 1982), correspondiente a cauces excavados o dragados en tierra, en planicies de inundación y con pasto corto y algunas malezas.
- Condición de borde aguas arriba: Caudales medios mensuales, obtenidos de la serie histórica de la Estación La Esperanza, la cual cuenta con un registro histórico desde 1965 hasta 2009. **Figura 6-3.**
- Condición de borde aguas abajo: Se consideraron los niveles del tramo de río en la sección aguas abajo, obtenidos de la modelación hidráulica unidimensional.

- **Hipótesis Asumidas y Condiciones de Borde: Simulación de Sedimentos**

La simulación de sedimentos está basada en el siguiente modelo conceptual:

- Los procesos básicos de sedimentación están agrupados en: erosión, transporte y depositación.

- Los caudales tienen el potencial de erodar, entrar y transportar sedimentos donde haya o no partículas de sedimentos presentes.
- Los sedimentos en el lecho se consideran inamovibles solo cuando la energía del flujo es menor que el esfuerzo cortante crítico que causa erosión.
- Cuando las partículas de arena se vuelven móviles, no se presentan cambios netos en la elevación de la superficie del lecho. Un cambio neto solo resulta cuando el cambio de erosión es diferente que el de depositación. Los dos procesos son continuos e independientes.
- Los sedimentos cohesivos en transporte estará en suspensión, hasta que el valor del esfuerzo crítico del lecho exceda el valor crítico de depositación. En general, la erosión y la depositación de los sedimentos cohesivos no ocurren simultáneamente.
- La extensión FST2DH, no simula elevaciones de la superficie del agua o velocidades, estos datos son un parámetro de entrada para los cálculos. Para ello se usan los resultados obtenidos del modelo FESWMS del SMS.
- Se tomó como concentración de los sedimentos un valor de 500 mg/l, el cual fue obtenido de los aforos sólidos realizados en campo.

- **Calibración del Modelo**

El modelo trabaja con una serie de parámetros, algunos de ellos deben ser definidos por el usuario, tales como la densidad del fluido, las condiciones de borde, el número de iteraciones de las corridas, etc.; de los parámetros que más influyen en la convergencia del modelo son la viscosidad del Eddy (parámetro que representa los efectos de la turbulencia en términos de las ecuaciones de Reynolds, que en el SMS es considerado para la convergencia de la simulación más que para la representación de la turbulencia) y el coeficiente de rugosidad cuando no se cuenta con un valor conocido, para la calibración del modelo se consideraron los valores de nivel obtenidos del modelo hidráulico unidimensional.

La convergencia y la introducción de las condiciones de contorno son los mayores inconvenientes encontrados al usar el modelo SMS en la extensión FESWMS. La experiencia dice que debe verificarse que el resultado del cálculo es independiente de los

parámetros de control de la convergencia y que es sensible a los cambios en las condiciones de contorno. Para solucionar dicho inconveniente se determinó un número de 30 iteraciones, un factor de 0.005 que multiplica al incremento de las variables entre una iteración y la siguiente de tal manera que se evite la inestabilidad del cálculo, pero cuando el número de iteraciones es menor y el factor mayor, el riesgo de inestabilidad es mayor, además el modelo puede dar un resultado que todavía no haya convergido, es decir erróneo.

6.3.2 Modelo Hidrodinámico y de Sedimentos – Escenario 1

En el presente escenario, se realizó la modelación de la poza considerando que tiene conexión al río con el canal de entrada y salida. En las **Figuras 6-26 y 6-27** se muestran la velocidad y profundidad media obtenida en el Escenario 1 simulado. El dominio espacial considerado en este modelo numérico tiene una longitud de 2,8 km, y un ancho promedio de 130m en el canal de entrada, 270m al interior de la poza y 25m en el canal de salida, cubriendo una superficie de 0,28 km². La discretización espacial se realiza mediante una malla no estructurada, compuesta por 2378 nodos de cálculo.

En el canal de entrada se observa que las velocidades medias son relativamente bajas con valores entre 0,05 y 0,18 m/s, estas velocidades son bajas debido al ancho que tiene el canal, haciendo que el flujo se distribuya a lo largo del ancho, se observa que la velocidad que adquiere el flujo al interior de la poza 0,05 m/s, mostrando claramente el movimiento lento del agua, una vez el flujo sale de la poza, se observa un incremento de la velocidad por el canal de salida, la cual varía entre 0,15 y 0,40 m/s. En cuanto a la profundidad se puede ver que al interior de la poza estas varían entre 5,00 y 14,00 m en la zona más profunda.

Figura 6-26: Variación de la Velocidad para el Escenario 1

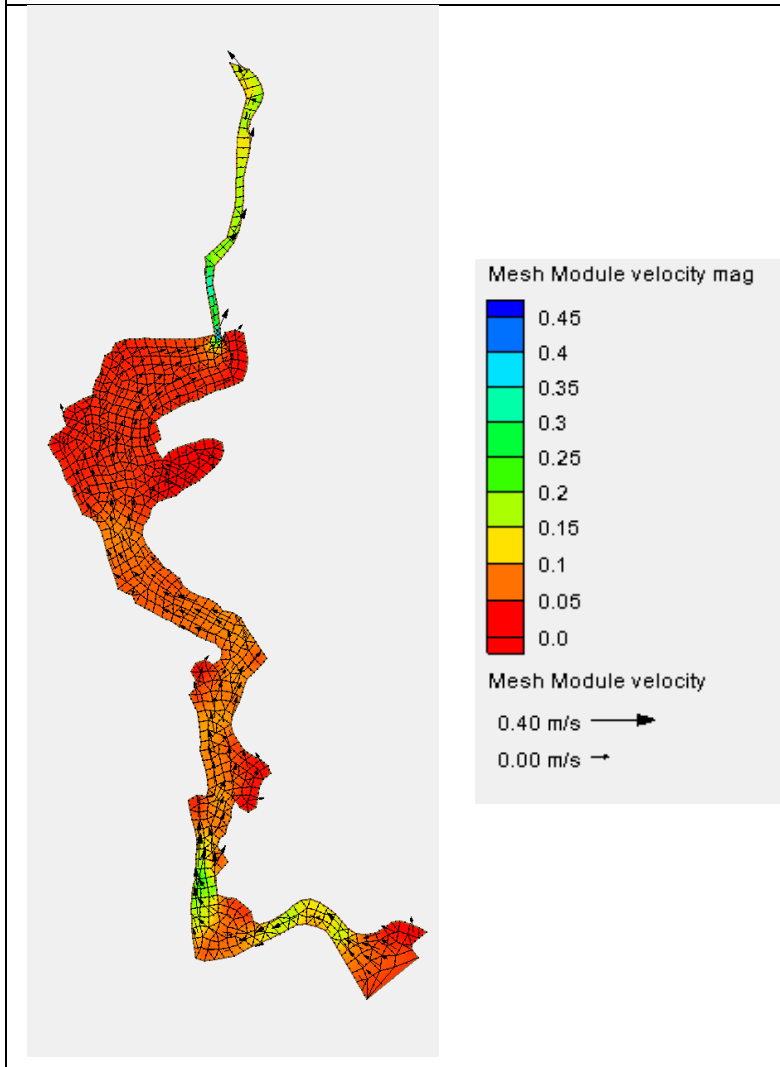
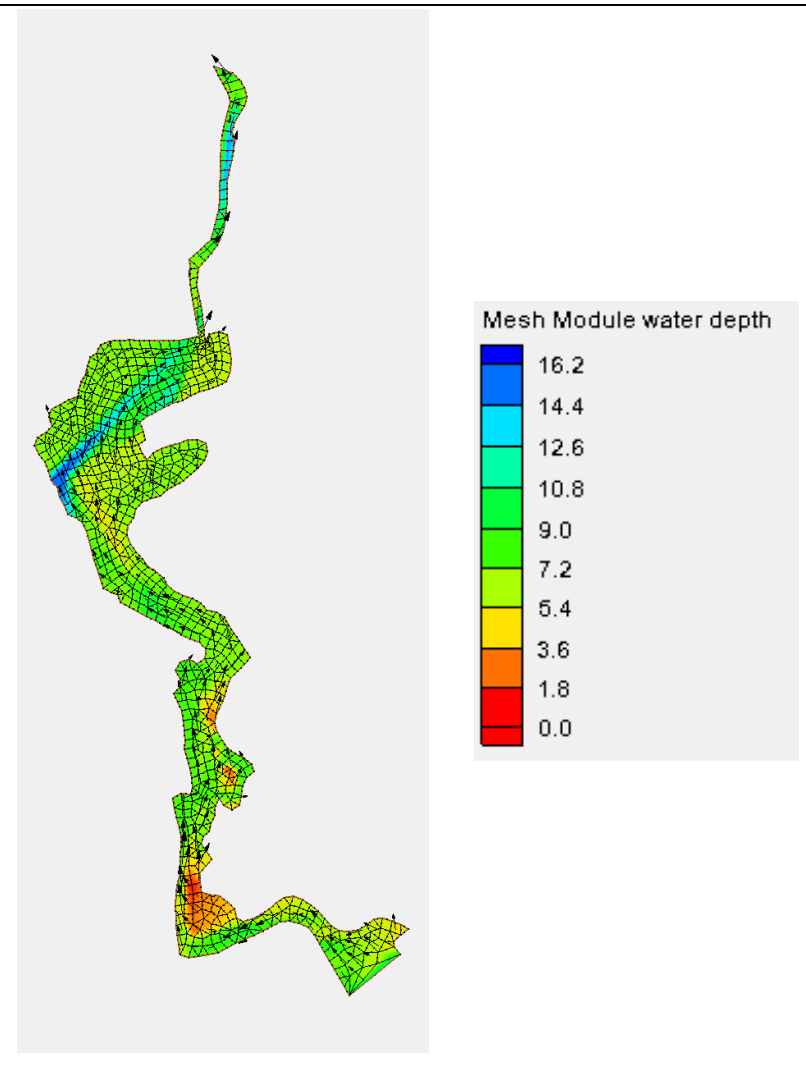


Figura 6-27: Variación de la Profundidad para el Escenario 1



El comportamiento de flujo al interior de la poza demostró que el modelo matemático representa la hidrodinámica de las líneas de corriente en todo el área evaluada. Las simulaciones realizadas han permitido resaltar la forma en que las velocidades dentro de la poza de dragado disminuyen debido a que el flujo debe distribuirse en toda el área y en toda la profundidad de la poza, se puede inferir que la poza de dragado funciona como un sedimentador, ya que las velocidades al ser tan bajas limitan la capacidad de transporte de sedimentos.

A continuación se muestra la evaluación en el comportamiento de los sedimentos evidenciando los cambios morfológicos que adquiere la poza con el tiempo y así evaluar si hay erosión o sedimentación en el área. Éste análisis es de gran importancia, puesto que a partir de él se establece cuál de los escenarios es óptimo para una restauración a largo plazo. Para ello, se tomó como batimetría inicial la mostrada en la **Figura 6-23** y en las **Figuras 6-28** y **6-29** se dan los resultados obtenidos en la modelación de transporte de sedimentos; para lo cual se consideraron dos periodos de tiempo importantes. El primero consiste en una evaluación al 1 año de estar en fase de restauración y la segunda evaluación es observar los cambios a los 5 años siguientes.

Se puede ver de las **Figuras 6-28** y **6-29** que este escenario evaluado presenta problemas de sedimentación en los 5 años de evaluación, el tener una entrada directa con el río, representa una entrada continua de sedimentos, lo que implica que la poza se colmate y pierda su eficiencia hidráulica, y pierda todas las características de una posible ciénaga. Por lo que este escenario morfológico no es óptimo para considerarse en una restauración futura.

Figura 6-28: Cambios Morfológicos en el 1 Año de Restauración

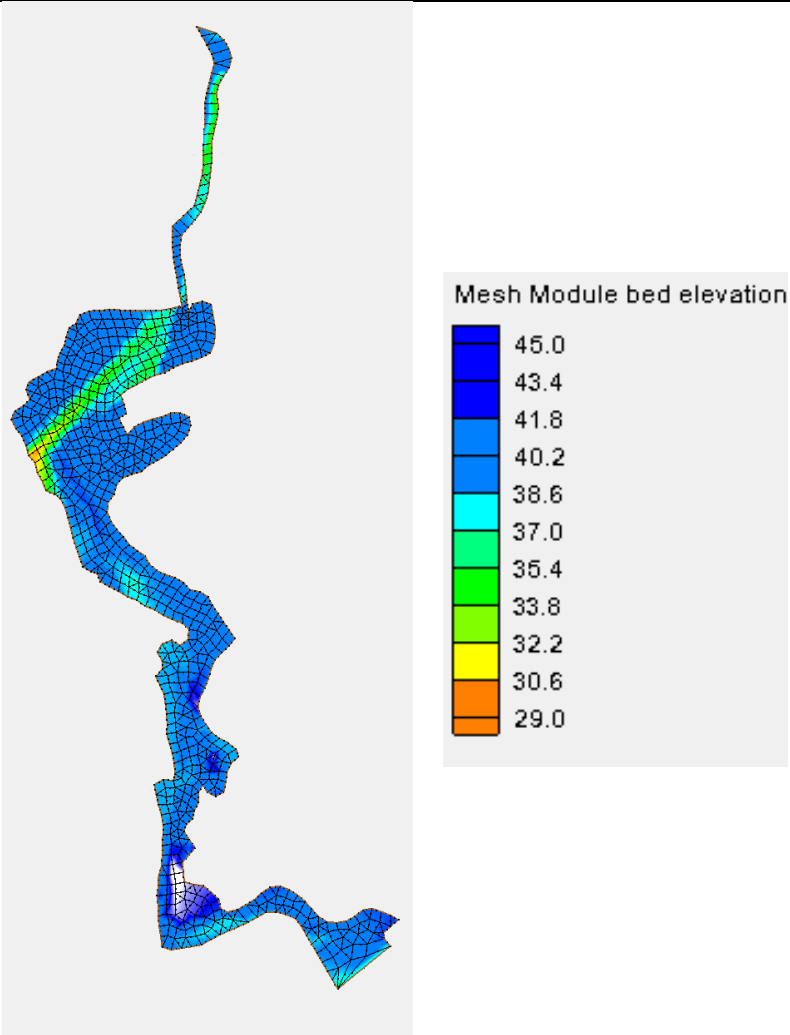
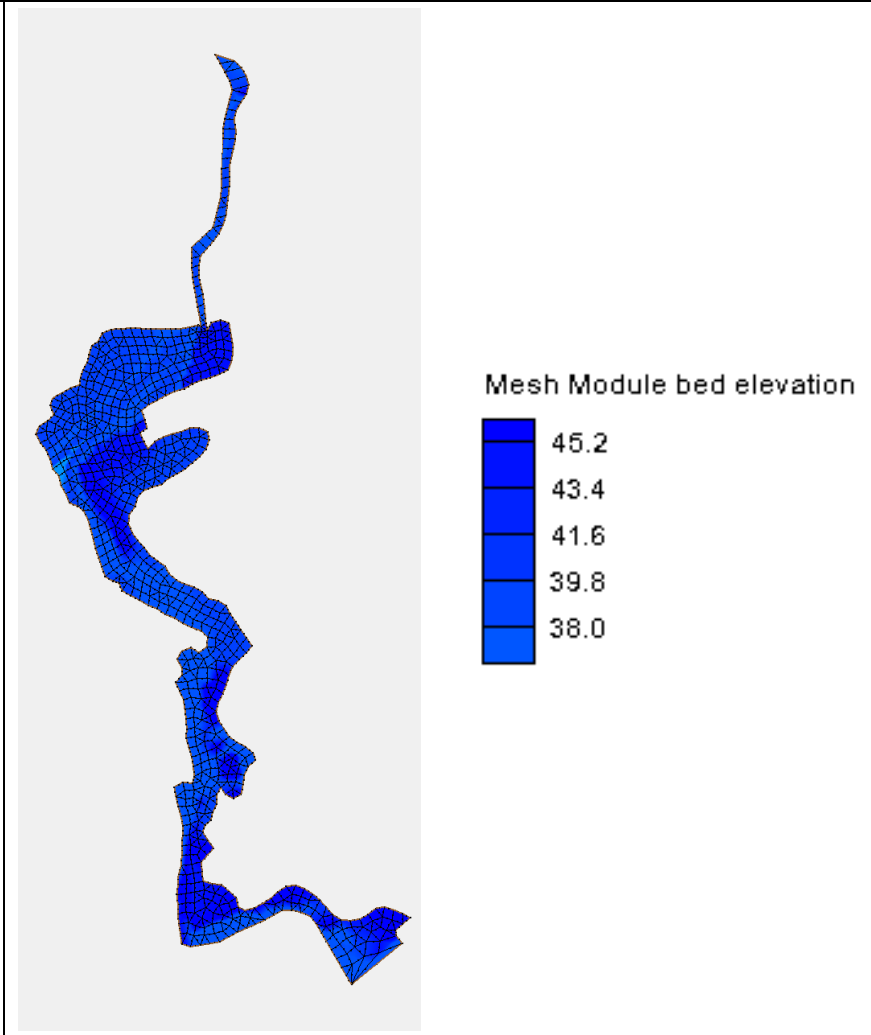


Figura 6-29: Cambios Morfológicos en el 5 Año de Restauración



6.3.3 Modelo Hidrodinámico y de Sedimentos – Escenario 2

En este escenario se realizó la modelación de la poza considerando una conexión al río por el canal de entrada. Dicho escenario pretende evaluar si el tener una sola entrada mejoraría el comportamiento de la poza especialmente en cuanto al tema de sedimentos se refiere, a continuación en las **Figuras 6-30** y **6-31** se muestran la velocidad y profundidad media obtenidas a lo largo del área evaluada. El dominio espacial considerado en este modelo numérico tiene una longitud de 2,05 km, y un ancho promedio de 130m en el canal de entrada y 270m al interior de la poza, cubriendo una superficie de 0,26 km². La discretización espacial se realiza mediante una malla no estructurada, compuesta por 2666 nodos de cálculo.

En el canal de entrada se observa que las velocidades medias son relativamente bajas con valores entre 0,05 y 0,21 m/s, estas velocidades son bajas debido al ancho que tiene el canal, haciendo que el flujo se distribuya a lo largo del ancho, la simulación de este escenario, permite resaltar las velocidades dentro de la poza de dragado observando que están alcanzan un estado de quietud al interior de la poza, ya que las velocidades alcanzan a tener valores de 0,00 m/s a 0,035 m/s.

Figura 6-30: Variación de la Velocidad para el Escenario 2

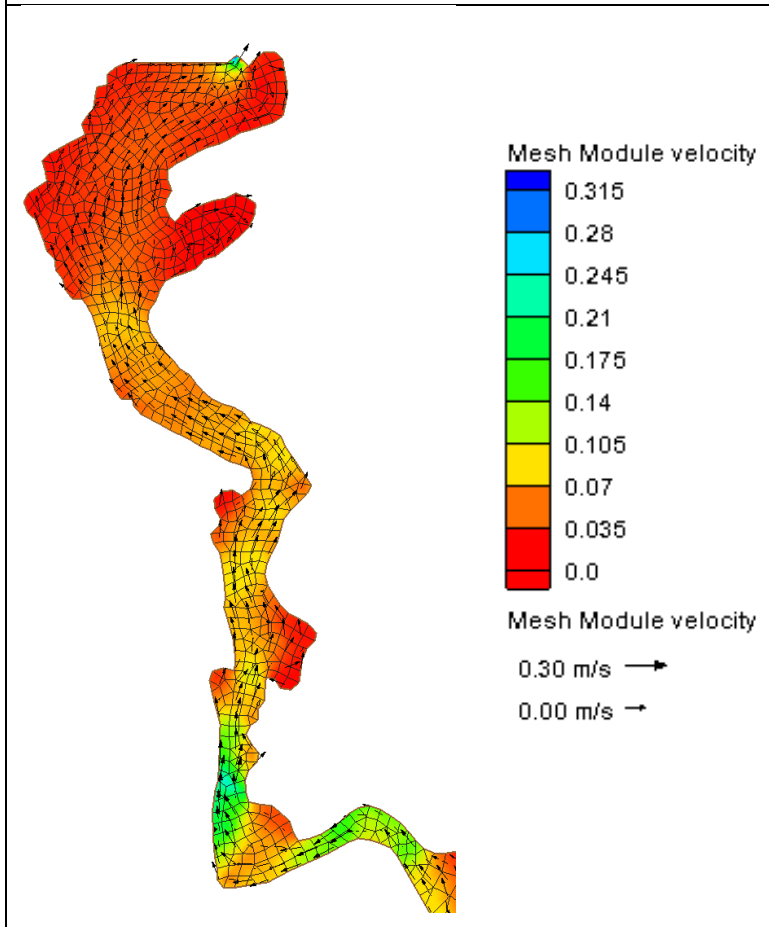
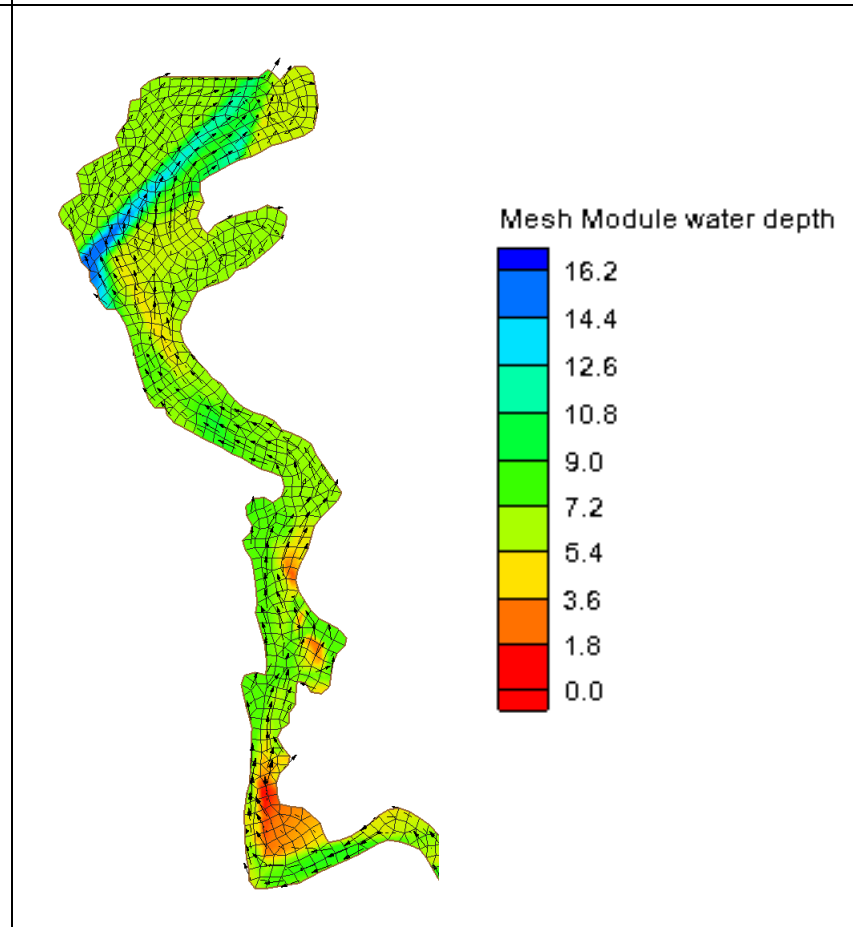


Figura 6-31: Variación de la Profundidad para el Escenario 2



A continuación se hace la evaluación en el comportamiento de los sedimentos mostrando los cambios morfológicos que adquiere este escenario de poza con el tiempo. Se consideró inicialmente la batimetría mostrada en la **Figura 6-24** y en las **Figuras 6-32 y 6-33** se muestran los resultados obtenidos en la modelación de transporte de sedimentos; considerando los mismos periodos de tiempo evaluados en el escenario 1.

Las **Figuras 6-32 y 6-33** indican que el escenario evaluado presenta problemas de sedimentación al igual que en el escenario 1 al tener una entrada directa en el sentido de la corriente, lo cual representa una entrada continua de sedimentos, que conlleva a que la poza se colmate y pierda su eficiencia hidráulica. Se concluye, entonces, que este escenario tampoco es óptimo para considerarse en una restauración futura.

Figura 6-32: Cambios Morfológicos en el 1 Año de Restauración

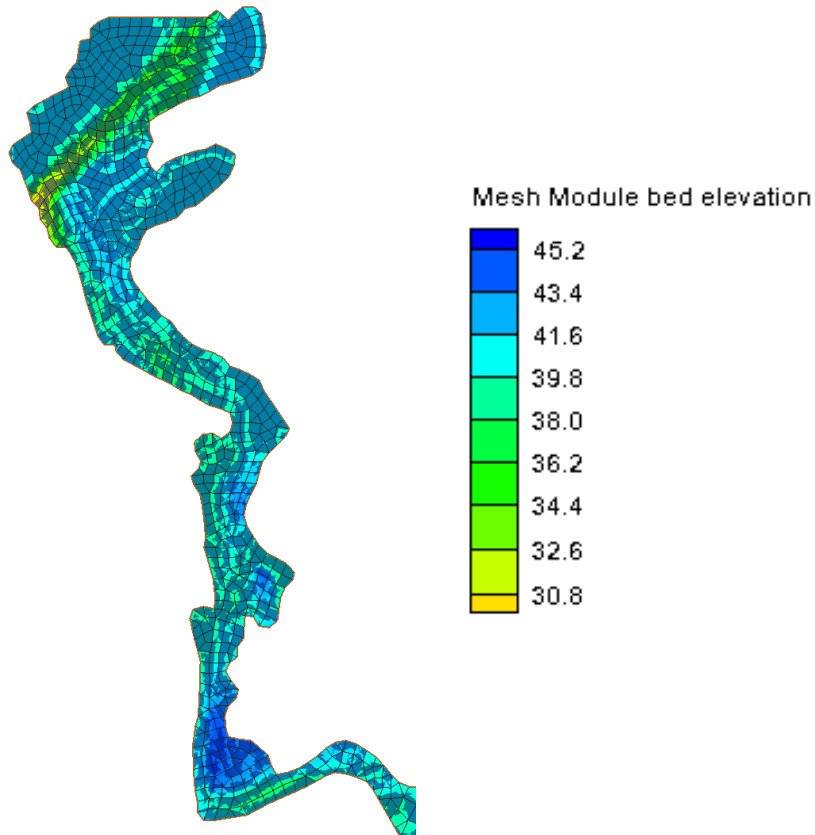
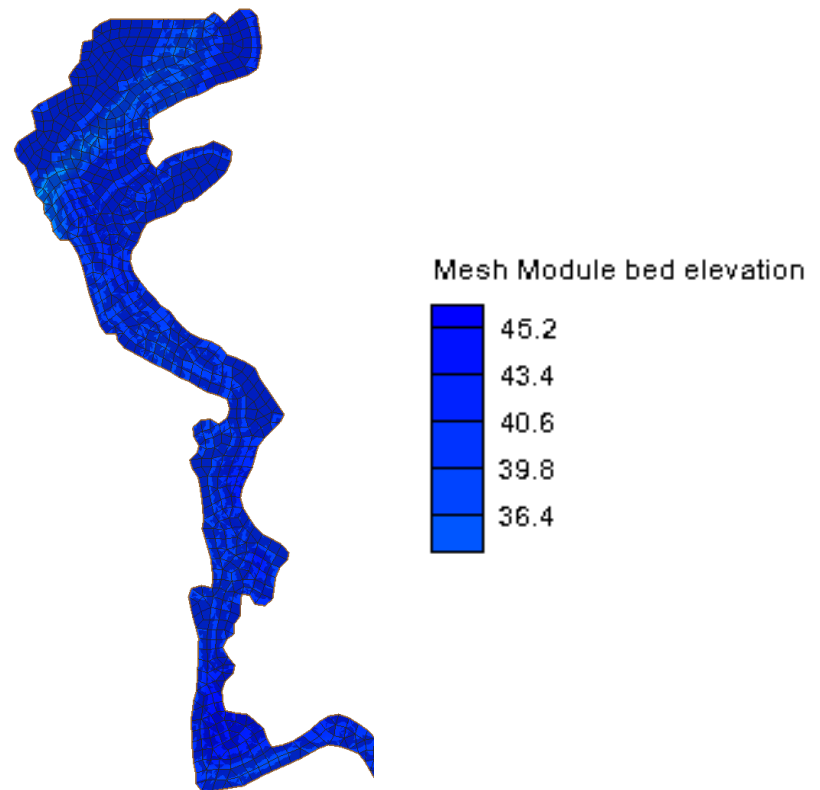


Figura 6-33: Cambios Morfológicos en el 5 Año de Restauración



6.3.4 Modelo Hidrodinámico y de Sedimentos – Escenario 3

Dentro de este escenario se da la modelación de la poza considerando que tiene conexión al río con el canal de salida únicamente. Éste es el que se realiza actualmente en la zona de explotación por parte de Mineros S.A. Las **Figuras 6-34** y **6-35** indican la velocidad y profundidad media obtenida en el Escenario 3 simulado. El dominio espacial considerado en este modelo numérico tiene una longitud de 1,25 km, y un ancho promedio de 270m al interior de la poza y 25m en el canal de salida, cubriendo una superficie de 0,14 km². La discretización espacial se realiza mediante una malla no estructurada, compuesta por 914 nodos de cálculo.

De las **Figuras 6-34** y **6-35** se puede apreciar que en el canal de salida se observan velocidades medias son relativamente bajas con valores entre 0,00 y 0,13 m/s al interior de la poza y de 0,26 a 1,17 m/s en el canal de salida que comunica al río con la poza, estas velocidades son relativamente bajas al interior de la poza, mostrando claramente el movimiento lento del agua, se puede observar que la velocidad es mayor en el canal de salida, esto implica que la tasa de sedimentación sería mayor ya que aumenta el transporte de sedimentos desde el canal de salida al ser la entrada del flujo.

Figura 6-34: Variación de la Velocidad para el Escenario 3

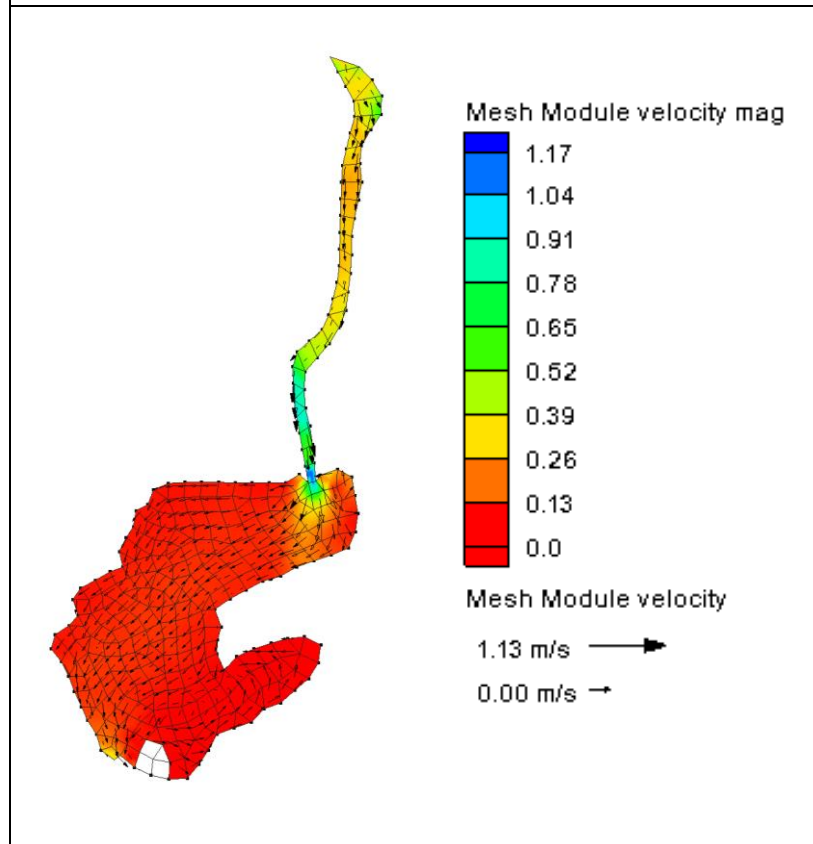
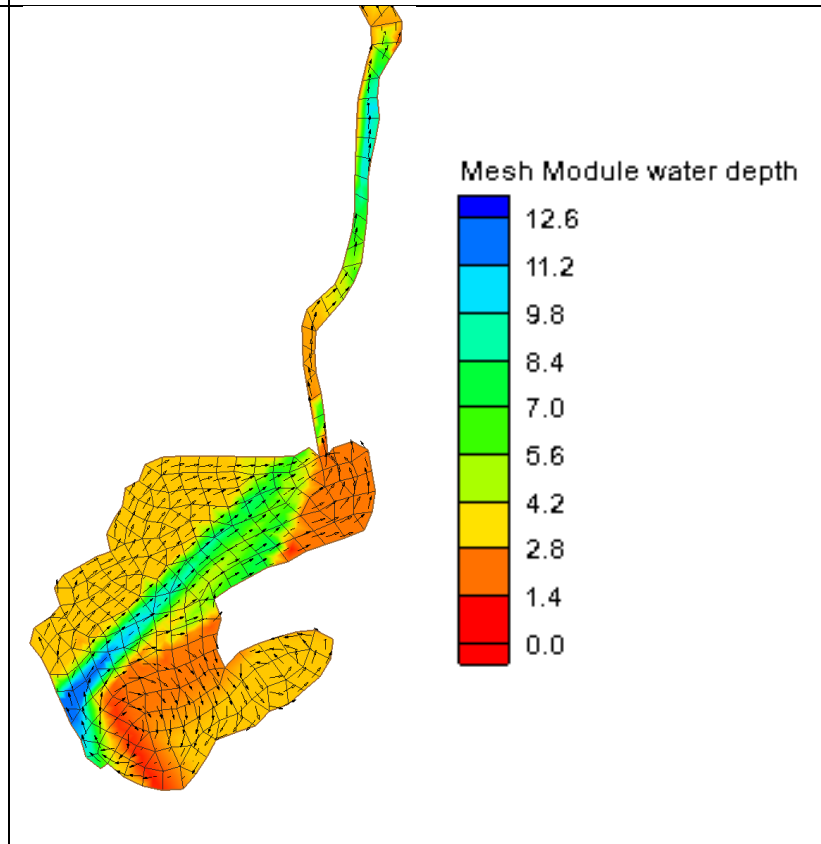


Figura 6-35: Variación de la Profundidad para el Escenario 3



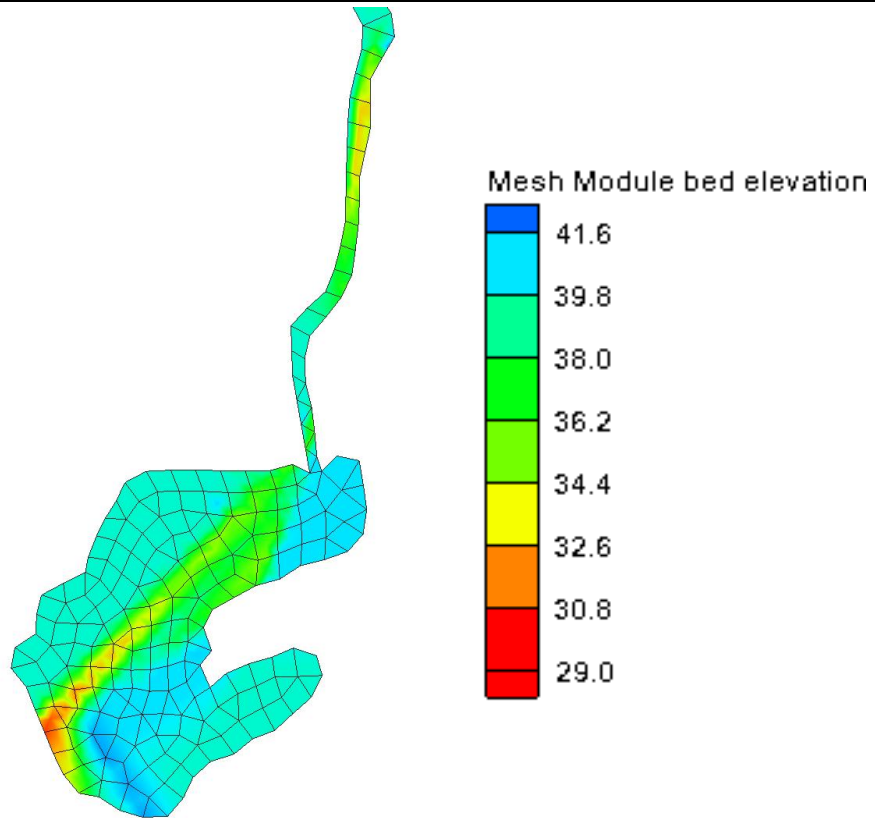
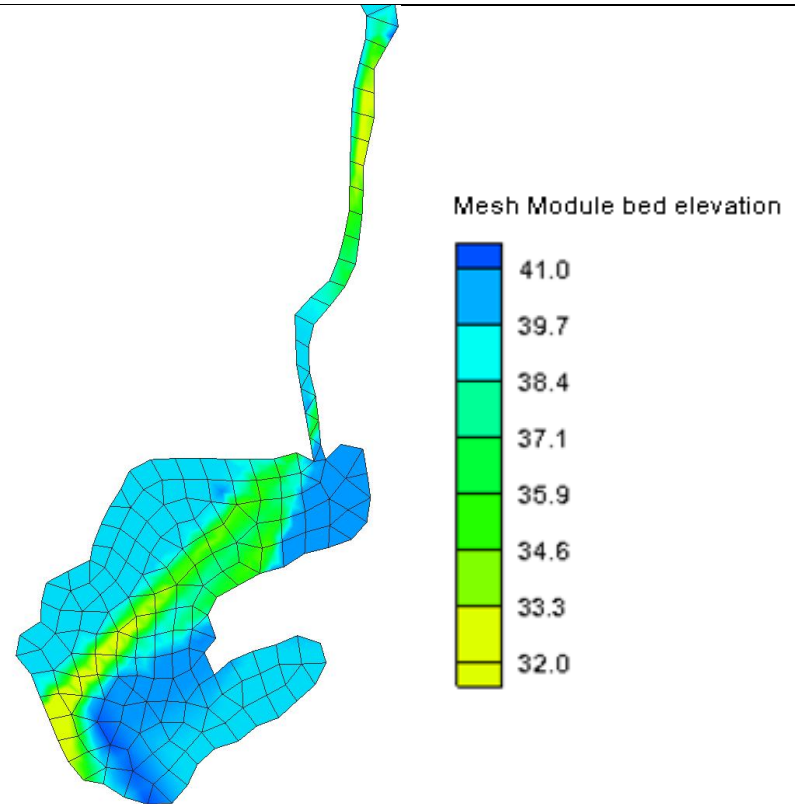
Se puede inferir que la poza funciona como un sedimentador aun cuando se tiene solo conexión con el río mediante el canal de salida.

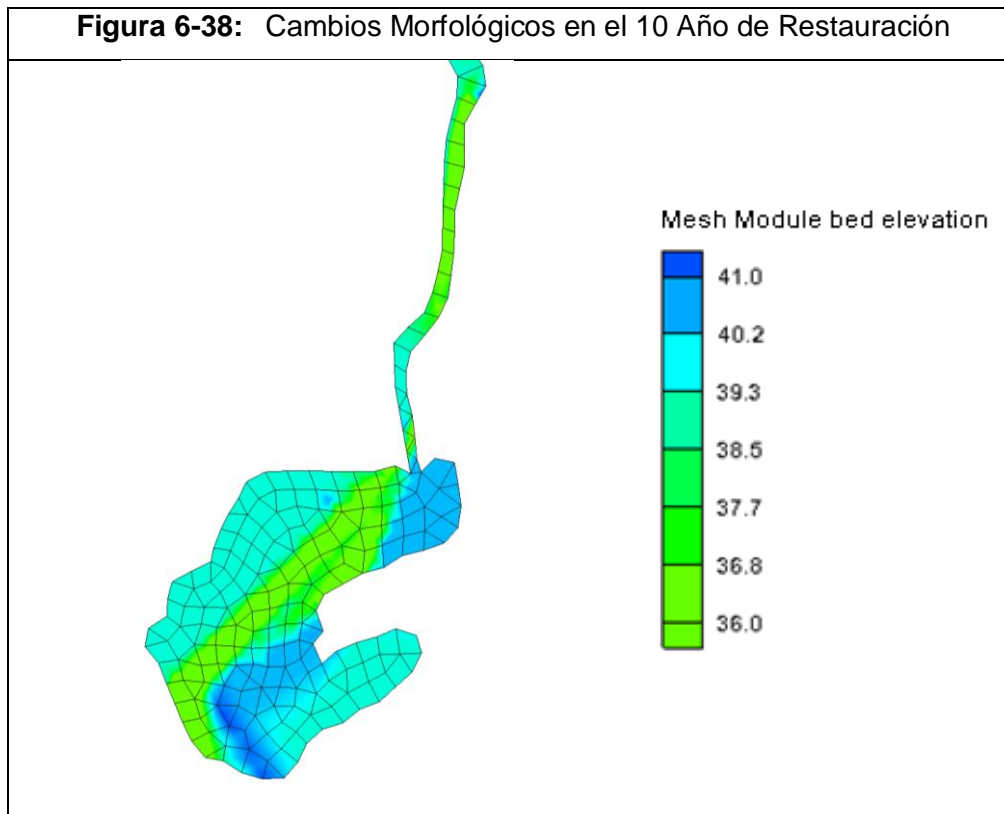
La evaluación en el comportamiento de los sedimentos muestra los cambios morfológicos que adquiere este escenario de poza con el tiempo. Éste análisis permitirá establecer si la poza al ser restaurada y tener las propiedades de una ciénaga natural permitirá ser autosostenible. Para ello se tomó como batimetría inicial en la **Figura 6-25**, y en las **Figuras 6-36** y **6-37** se indican los resultados obtenidos en la modelación de transporte de sedimentos considerando los períodos de tiempo establecidos en los escenarios anteriores.

Se puede ver de las **Figuras 6-36** y **6-37** que la poza evaluada tiene un comportamiento similar entre el año 1 y el año 5, ya que el llenado de la poza tiene una dinámica muy diferente a la de los dos primeros escenarios, por lo que se evaluó esta poza a un periodo de tiempo de 10 años para así conocer el comportamiento de este cuerpo de agua en un lapso mayor de tiempo (**Figura 6-38**).

En las **Figuras 6-38** se evidencia que la poza de dragado muestra una similitud en los cambios del lecho con respecto al obtenido a los 5 años de evaluación. Esto indica que la poza permanece estable con el tiempo, pues al no mostrar gradientes de profundidad que permitan que los sedimentos se depositen, estos recirculan y siguen su trayecto en el río,

En conclusión, la poza no cambiaría sus funciones ecosistémicas y tendría las mismas funciones de una ciénaga, por lo tanto este escenario se considera óptimo para la restauración de una poza de dragado, siendo sostenible a largo plazo. Es importante resaltar que las pozas no tienen una forma definida, la forma de estos cuerpos de agua es la que se obtiene una vez se termina la explotación en el bloque.

Figura 6-36: Cambios Morfológicos en el 1 Año de Restauración**Figura 6-37:** Cambios Morfológicos en el 5 Año de Restauración



Uno de los planeamientos que se tiene en la División de Ingeniería de Mineros S.A., es establecer en la fase de operación, cual es el mejor esquema de explotación a utilizar; actualmente Mineros S.A., tiene en su fase de operación el establecer la poza de dragado conectada al río con el canal de entrada y salida, si se consideran los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios evaluados, se puede decir que desde el punto de vista hidráulico el escenario óptimo para la recuperación de la poza es mantener en operación solamente el canal de salida a contraflujo. Esto implica estudiar la alimentación desde el río para que se tengan caudales suficientes para la flotación de la draga en épocas de verano.

En cuanto a los sedimentos en suspensión que entran a la poza por el canal de salida, se puede decir que no afectarían el trabajo de explotación, al contrario los sedimentos se depositarían al interior de la poza y luego serían removidos por la draga de succión o de cucharas, y disponiéndolos en lugares específicos, de esta manera la poza en fase de explotación no se colmataría.

6.4 EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS ACUATICAS (MACROFITAS)

Una vez evaluado comparativamente el comportamiento de los parámetros de calidad de agua y la eficiencia hidráulica de las pozas, tanto en la etapa de explotación como en la de restauración, quedan por evaluar los parámetros biológicos, que en este caso corresponde a la variación de las macrófitas, para ello se realizó un análisis integrado del crecimiento de las plantas acuáticas, de manera tal que arroje luces sobre el comportamiento y funcionalidad del ecosistema.

La cobertura de macrófitas por comunidad dominante ha sido estimada cada año a partir de los datos obtenidos de cada campaña. Se contó con un registro desde el año 2005 al 2009, adicionalmente se calcularon los índices de Shannon & Weaver, el índice de Simpson y el valor de riqueza específica. Es importante tener en cuenta que para que el crecimiento de las plantas macrófitas sea adecuado, es esencial que el lecho ya sea de grava o de suelo, permanezca saturado de agua durante todo el año, lo anterior se cumple, ya que las pozas artificiales al encontrarse en la llanura de inundación, tienen una conexión superficial y sub-superficial con el río Nechí.

En la **Tabla 6-7**, se muestra el listado de las especies de macrófitas con sus respectivos porcentajes de cobertura estimada para la ciénaga Pujador. Para las diferentes épocas de muestreo se encontraron un máximo de 18 especies para Marzo de 2007 y un mínimo de 11 especies para Marzo de 2005.

Para la ciénaga artificial Pujador se encontraron un total de 23 especies, siendo la planta acuática más representativa la *Oxycarium cubense* (34,31%), seguida por la *Ludwigia octovalvis* (23,34%) y *Eichhornia azurea* (13,76%). A continuación en la **Figura 6-39**, se muestran los promedios del porcentaje de cobertura de las especies de macrófitas más abundantes encontradas en la ciénaga artificial Pujador.

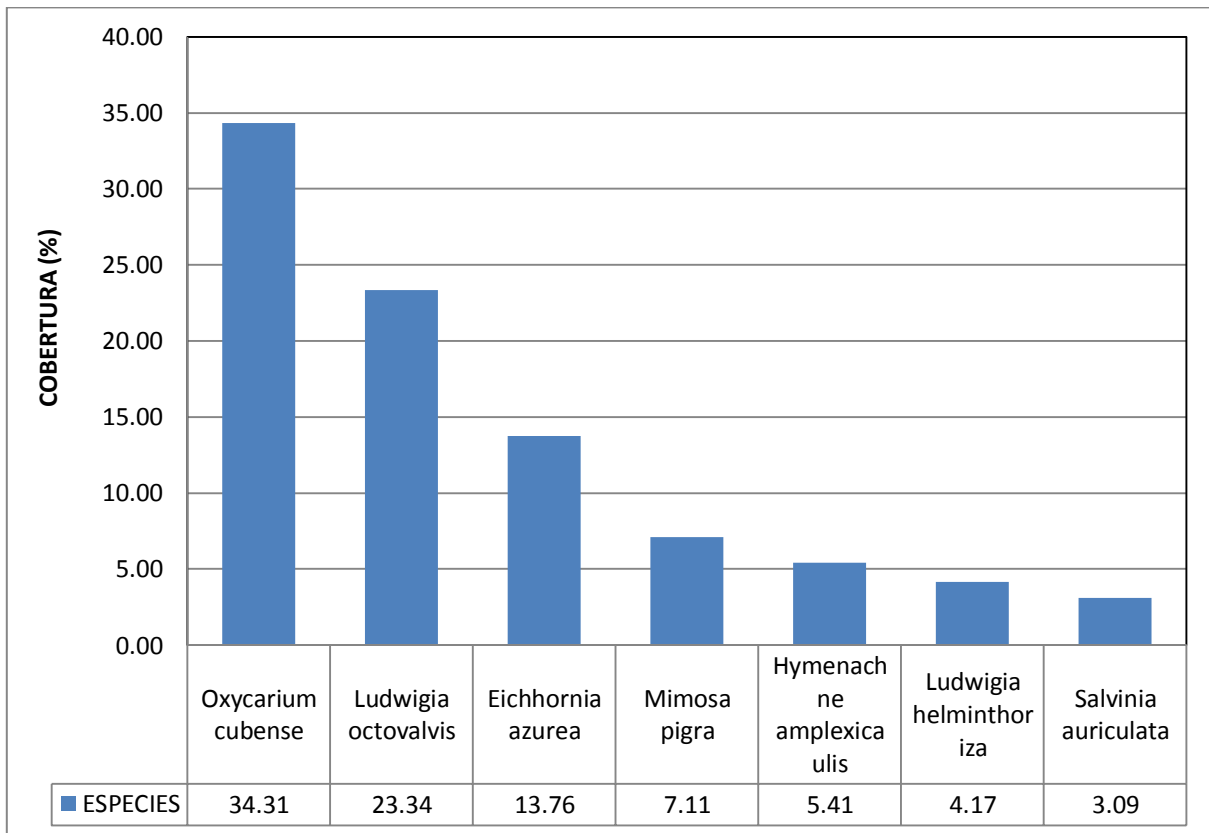


Figura 6-39: Cobertura Estimada en Porcentaje de las Macrófitas más Abundantes en la Ciénaga Artificial Pujador

La **Figura 6-40** muestra la variación del porcentaje de cobertura de macrófitas para los años de registro, ahí se puede evidenciar gráficamente, los porcentajes de cobertura anual de la ciénaga Pujador, evidenciando el crecimiento y la dominancia de algunas especies a colonizar.

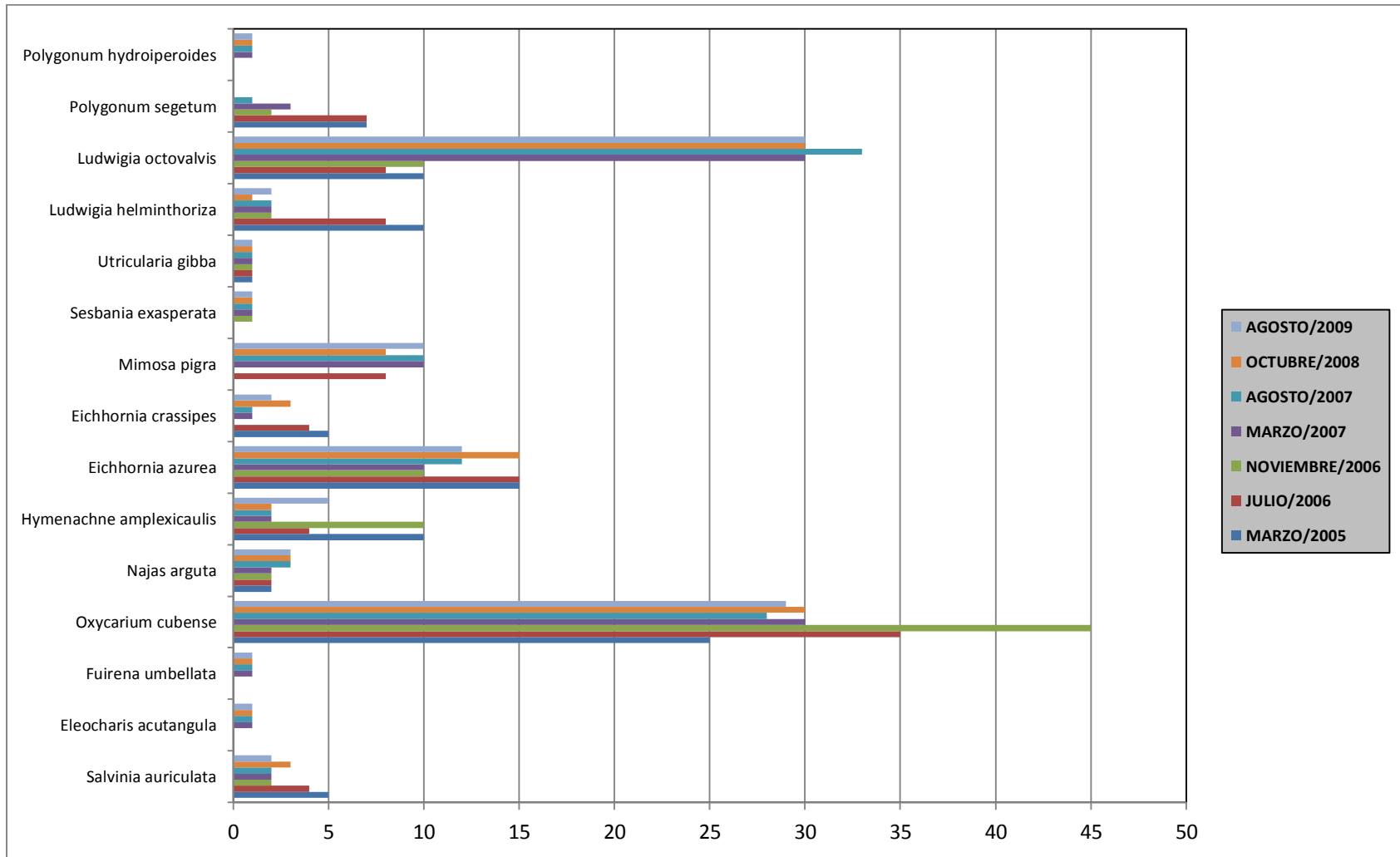


Figura 6-40: Variación del Porcentaje de Cobertura de Macrófitas para los Años de Registro

En relación a los índices ecológicos, se encontró que el índice de diversidad de Shannon & Weaver presenta una variación entre 1,88 y 2,16, lo que demuestra que la ciénaga artificial presenta lugares de mayor riqueza de especies, adicionalmente la tendencia muestra que estas comunidades se establecen y muestran un crecimiento lento.

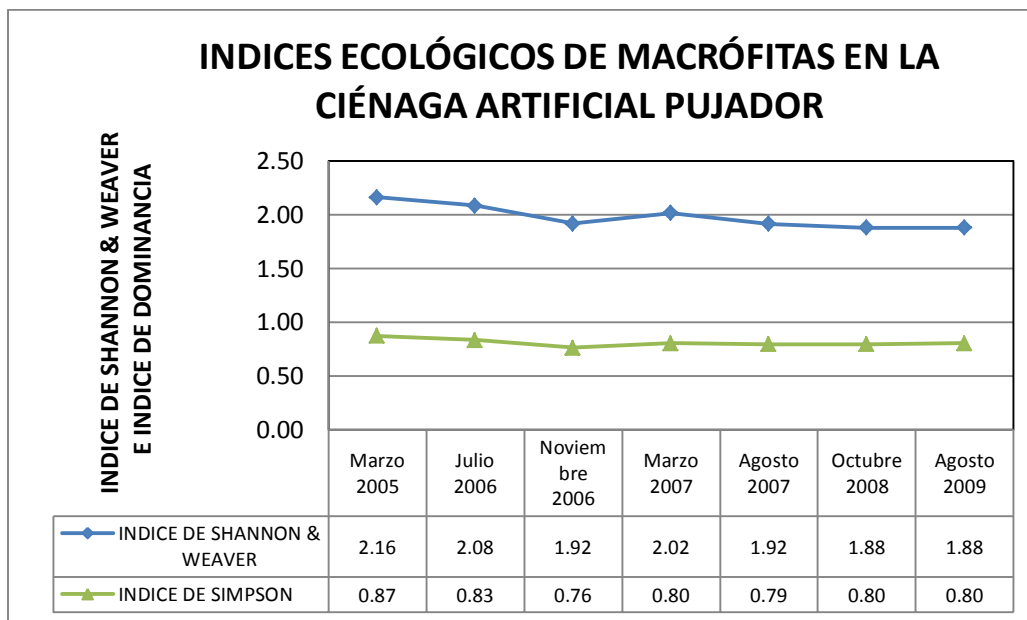


Figura 6-41: Variación de los Índices Ecológicos en la Ciénaga Pujador

En cuanto al índice de Dominancia, este varía entre 0,7628 y 0,8733, mostrando que hay lugares con mayor probabilidad de que haya condiciones específicas que favorezcan el establecimiento de una especie, esto se puede inferir al ver la **Figura 6-41**, donde se evidencian especies con mayor dominancia e incremento de la comunidad.

Se encontró que hubo un aumento de la comunidad macrófita debido a la disminución del nivel de la superficie del agua (mes de marzo) y una disminución de la cobertura en algunos meses, debido a las aguas altas donde se puede estar presentando desplazamiento y remoción de algunas de estas plantas. Sin embargo, la tendencia de esta poza es a aumentar su comunidad lentamente, ya que el ambiente es propicio y está en buen estado ecológico para el establecimiento de estas especies. Este análisis es de gran importancia en un modelo de restauración, ya que cualquier cambio en las variables básicas y en este tipo de comunidades pueden indicarnos que impactos pueden llegar a existir a futuro una vez se haya recuperado la ciénaga producto de la explotación aluvial.

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

7. DISCUSIÓN

7.1 EFICIENCIA HIDRÁULICA Y POSIBLES IMPACTOS QUE PUEDAN DARSE POR LA SEDIMENTACIÓN DE LA POZA

Las simulaciones realizadas han permitido resaltar la forma en que las velocidades dentro de la poza de explotación disminuyen debido a que el flujo debe distribuirse en toda el área y en toda la profundidad de la poza, se puede resaltar nuevamente que la poza de dragado funciona como un sedimentador, ya que el flujo no es capaz de transportar los sedimentos que lleva la corriente y los sedimentos que vierte la draga de cucharas al momento de extracción del material, si se considera que aún se encuentra operando.

Se realizó una modelación bidimensional del flujo, los resultados obtenidos permiten ver la caracterización de velocidades, profundidades y cambios en la elevación del tramo de estudio, además permiten inferir la formación de macro vórtices en las pozas de explotación, lo que caracteriza a priori regiones de gran movimiento y recambio, encontrando que las mayores velocidades se generan en el canal de entrada, causadas por la contracción del flujo en dichas secciones.

De los escenarios evaluados se concluye que la mejor alternativa para realizar un proceso de restauración de una poza de dragado es comunicar la poza mediante un canal de salida con el río principal, de esa manera se garantiza que la entrada de sedimentos sea equilibrada y se vuelva estable a largo plazo, permitiendo así el buen funcionamiento de la futura ciénaga y facilitando que las condiciones biológicas sean similares o mejores a las de una ciénaga natural.

7.2 COMPARACIÓN ENTRE LA ETAPA DE EXPLOTACIÓN Y LA ETAPA DE RECUPERACIÓN

A pesar del alto grado de deterioro al que han sido sometidos los ecosistemas de ciénagas, el tema de la restauración ecológica es reciente y sus aplicaciones aún escasas y poco documentadas, este trabajo se enfocó en evaluar la variación de la información sobre la calidad fisicoquímica del agua y las macrófitas entre la etapa de explotación y la etapa de recuperación, con el fin de contribuir la definición de parámetros que permitan orientar, evaluar y ajustar futuras intervenciones de este tipo a partir de un seguimiento y monitoreo riguroso que permita evaluar los efectos en el corto y largo plazo sobre estas variables como consecuencia de la restauración hidrogeomorfológica.

Se encontró que los parámetros fisicoquímicos (oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, fosfatos, nitratos y demanda química de oxígeno) mejoran luego del proceso de restauración. Lo que resalta la importancia de tener en cuenta los parámetros de calidad del agua al momento de realizar la planeación y el diseño de un proceso de restauración.

7.3 COMPARACIÓN FISICOQUÍMICA DE LA CIÉNAGA ARTIFICIAL EN RESTAURACIÓN CON UNA CIÉNAGA NATURAL

En el desarrollo de esta discusión se hará la comparación de los resultados obtenidos en la ciénaga artificial Pujador con los parámetros obtenidos en la ciénaga natural Carreto, localizada en la misma área de explotación de Mineros S.A , esta poza está localizada geográficamente en las coordenadas (7° 49' 10" N y 74° 48' 31" W) (**Figura 7-1**) perteneciente al municipio de Nechí y se encuentra a una altura aproximada de 35 msnm, es un cuerpo de agua natural rodeado de rastrojo alto y bosque secundario. Se encuentra aparentemente en buen estado de conservación ecológica, además es usado para pesca por los pobladores de la zona. (Ver **Figura 7-2**).

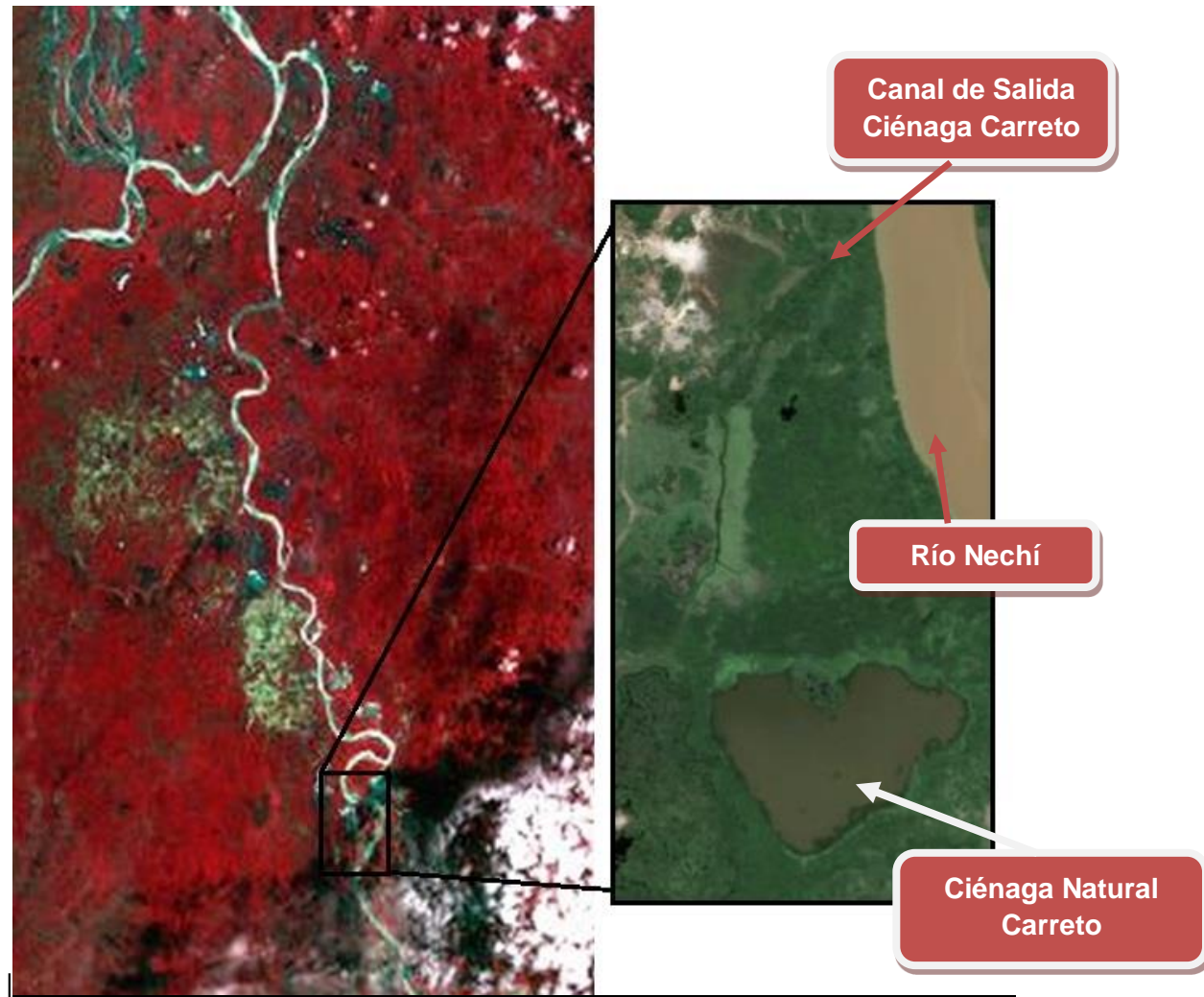


Figura 7-1: Localización de la Ciénaga Natural Carreto
(Imagen Satelital del SPOT 2011 y GeoEye 2010)



Figura 7-2: Aspecto General de la Ciénaga Natural Carreto

Este numeral pretende comparar los parámetros fisicoquímicos medidos en la ciénaga artificial Pujador con los parámetros medidos en una ciénaga natural, que para este caso corresponde a la ciénaga Carreto, la cual se encuentra localizada en la misma zona de estudio, los registros históricos que se tienen de esta ciénaga abarcan desde el año 2005 al 2008. En la **Tabla 7-1** se muestra un resumen de los parámetros fisicoquímicos en la ciénaga natural Carreto, y en las **Figuras 7-3 a 7-9** se muestra la variabilidad de los parámetros de importancia, permitiendo así indicar la similitud entre un cuerpo de agua artificial que se encuentra en restauración con un cuerpo natural de la zona.

Tabla 7-1: Resumen de los Parámetros Fisicoquímicos en la Ciénaga Natural Carreto

Ciénaga	pH (Unidades de pH)	Temperatura (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Conductividad Eléctrica (us/cm.)
Carreto	6,17 ± 0,57	29,48 ± 2,50	3,74 ± 0,81	56,43 ± 10,95
Ciénaga	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	DBO5 (mg O2/L)	Fósforo Total (mg P/L)	
Carreto	11,57 ± 4,93	5,69 ± 1,43	0,12 ± 0,07	

Figura 7-3: Variación del pH para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto

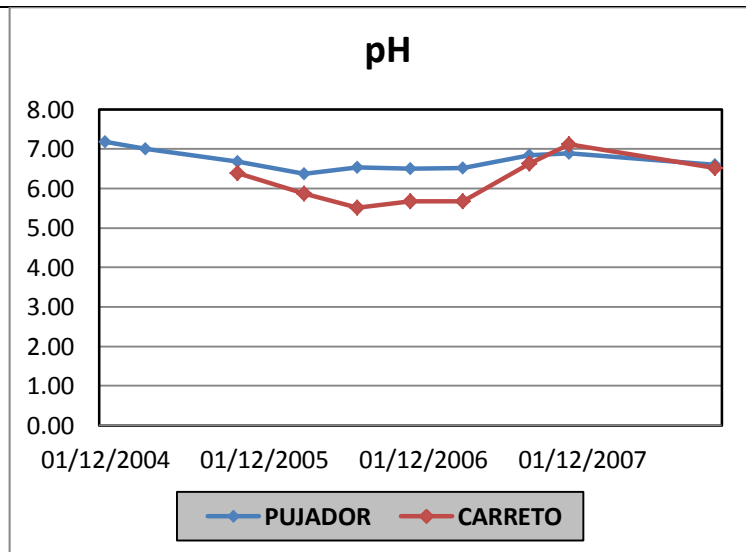


Figura 7-4: Variación de la Temperatura para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto

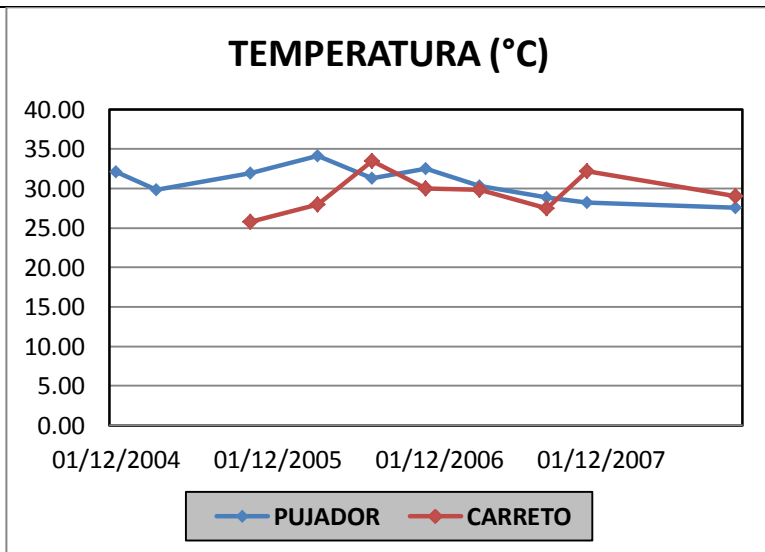


Figura 7-5: Variación del Oxígeno Disuelto para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto

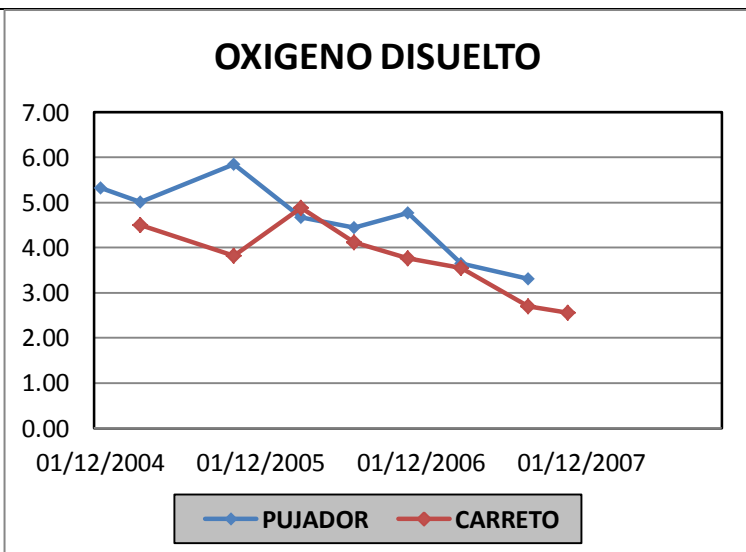
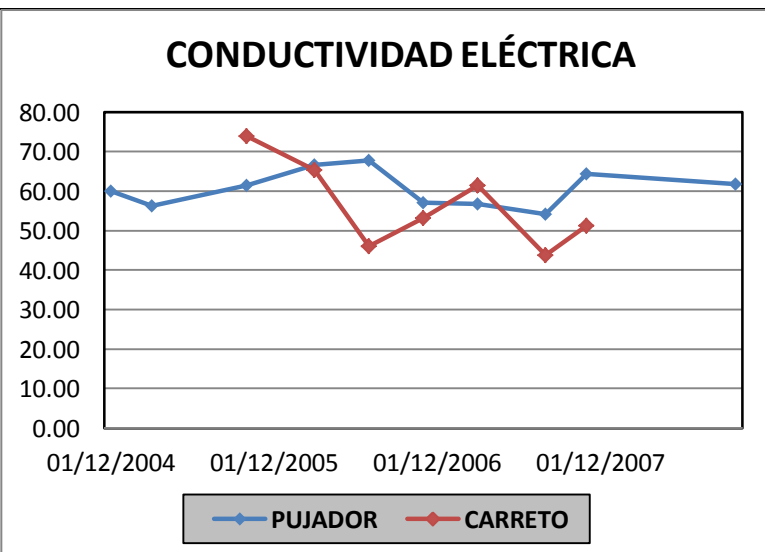


Figura 7-6: Variación de la Conductividad Eléctrica para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto



Se puede ver de la **Figura 7-1** y **Figura 7-2** que el pH, la temperatura superficial y la conductividad eléctrica no muestran diferencias significativas en la tendencia, en términos generales se observa una similitud en el orden de magnitud entre ambas ciénagas.

En cuanto a las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) se puede observar que los valores decrecen en los meses de verano. Se puede ver de la **Figura 7-3**, que los valores del oxígeno disuelto para la ciénaga artificial tienden a disminuir llegando a ser similares a los de la ciénaga natural.

Figura 7-7: Variación de los SST para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

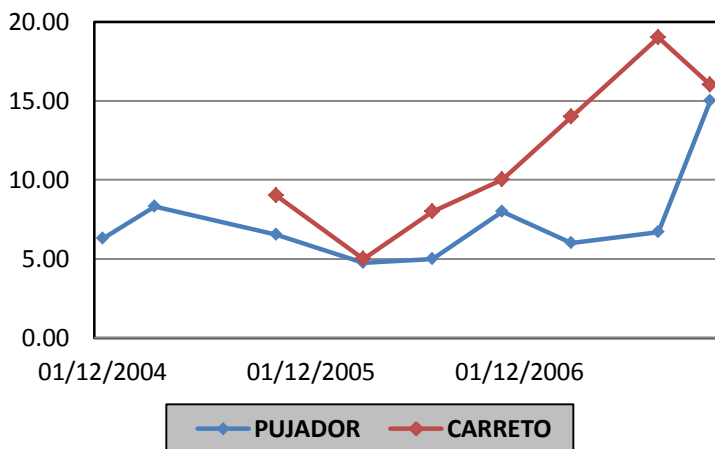


Figura 7-8: Variación del DBO₅ para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto

DBO₅

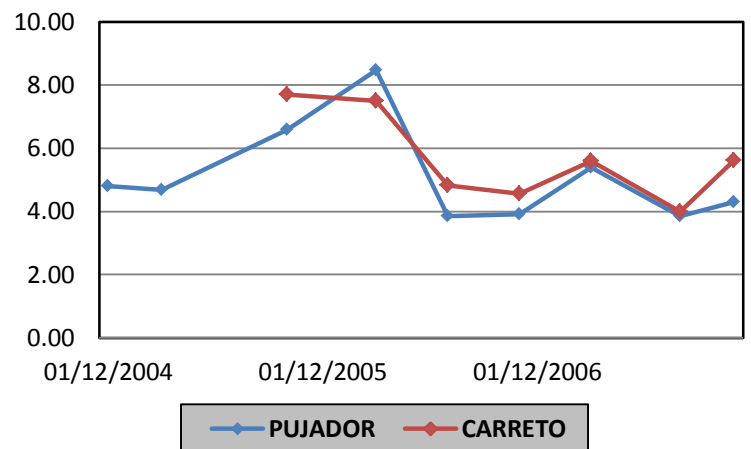
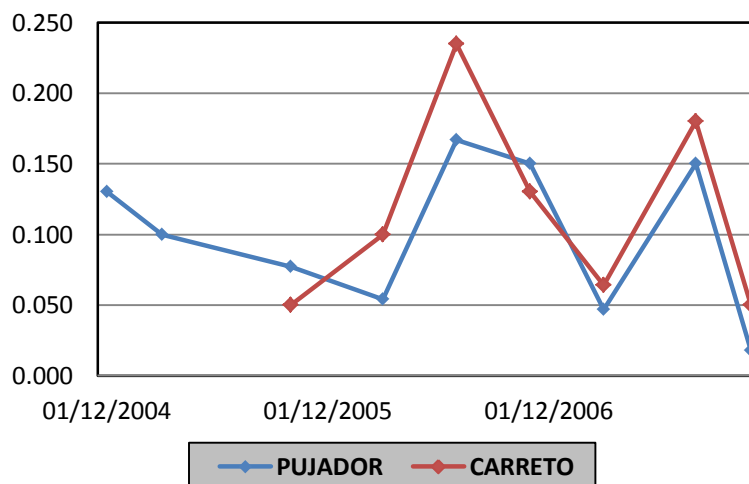


Figura 7-9: Variación del Fósforo Total para la Ciénaga Pujador y la Ciénaga Carreto

FOSFORO TOTAL



De la **Figura 7-7** se puede ver que los sólidos suspendidos totales obtenidos en la ciénaga natural son mayores a los obtenidos en la ciénaga artificial, este aumento o disminución que pueda darse en la ciénaga es particular de cada una, ya que depende de la morfología del canal de conexión con el río y del caudal entrante a la ciénaga. Sin embargo se puede observar que los sólidos suspendidos totales que entran a la ciénaga artificial tienen un orden de magnitud bajo, permitiendo así que la poza no tenga forma de colmatarse.

Por otro lado, la demanda biológica de oxígeno encontrada en la poza muestra una similitud con valores superiores a 5 mg/l, que corresponde al valor mínimo para que haya desarrollo de fauna y flora. El valor medio para la ciénaga natural es igual a 5,69 mg/l mientras que para la ciénaga artificial Pujador la DBO₅ es igual a 5,10 mg/l. En cuanto al fósforo total se puede ver de la **Figura 7-9** que el comportamiento es similar, encontrándose un estado de eutrofización de ambos ecosistemas.

Se puede concluir en forma general que todos los parámetros fisicoquímicos medidos en la ciénaga artificial en proceso de restauración adquieren con el tiempo la misma similitud en los parámetros de una ciénaga natural de la misma zona. De acuerdo a lo anterior los resultados muestran una optimización de las variables, permitiendo así tenerlos siempre en cuenta en la planeación, diseño y monitoreo de una futura restauración de una poza de dragado.

7.4 COMPARACIÓN BIOLÓGICA (MACROFITAS) DE LA CIÉNAGA ARTIFICIAL EN RESTAURACIÓN CON UNA CIÉNAGA NATURAL

Esta comparación pretende evaluar la similitud entre la ciénaga que se encuentra en fase de restauración y una ciénaga natural, a partir de los porcentajes de cobertura y de los índices ecológicos de mayor importancia, de manera tal que se pretenda conocer si estos cuerpos de agua artificiales, llegan a ser sostenibles a largo plazo. Los índices ecológicos utilizados para esta comparación son los mismos que se muestran en el **Numeral 5.2**.

A continuación en la **Tabla 7-2**, se muestra el listado de las especies de macrófitas con sus respectivos porcentajes de cobertura estimada para la ciénaga Carreto.

Se encontró para las diferentes épocas de muestreos un máximo de 8 especies para Marzo de 2007, Octubre de 2008 y Agosto de 2009 y un mínimo de 4 especies para Marzo de 2005.

Para la ciénaga natural Carreto se encontraron un total de 18 especies, siendo la planta acuática más representativa la *Eleocharis acutangula* (83,33%), seguida por la *Poaceae sp1* (3,67%). A continuación en la **Figura 7-10**, se muestran los promedios del porcentaje de cobertura de las especies de macrófitas más abundantes encontradas en la ciénaga natural Carreto.

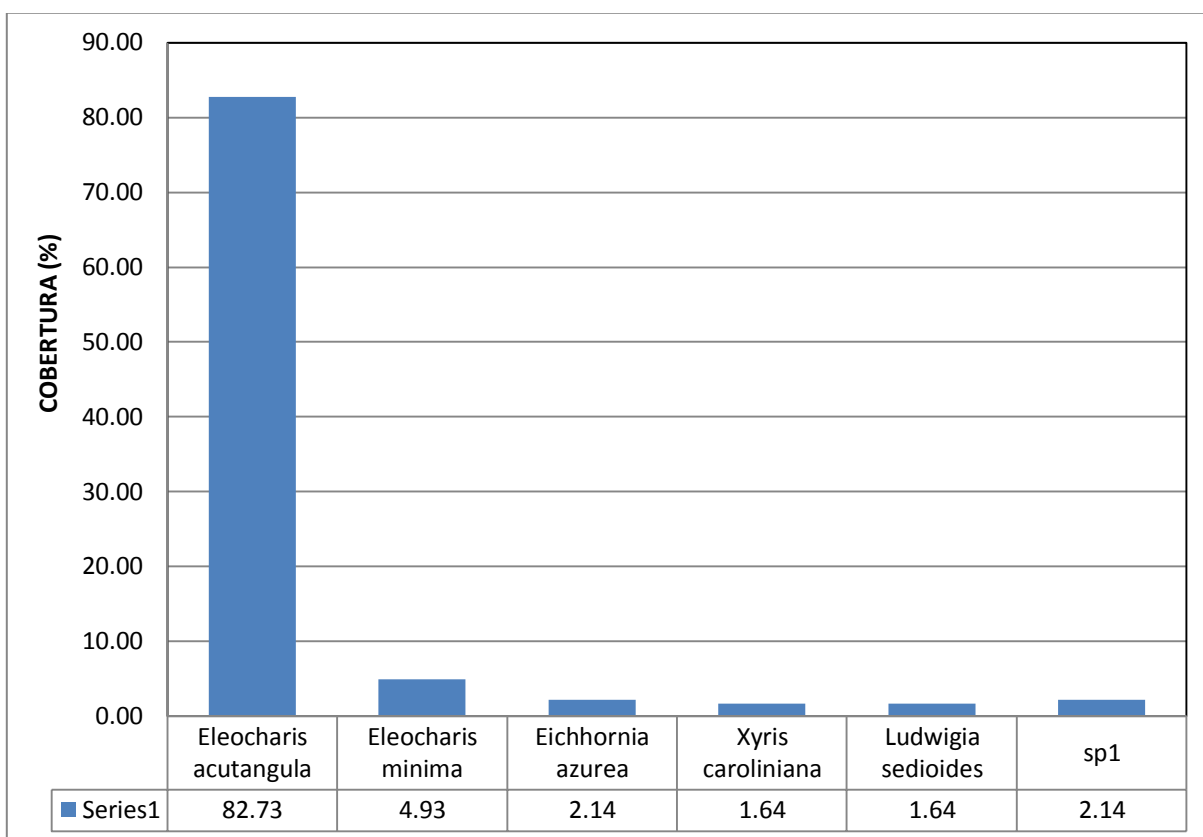


Figura 7-10: Cobertura Estimada en Porcentaje de las Macrófitas más Abundantes en la Ciénaga Natural Carreto

En relación a los índices ecológicos, el índice de diversidad de Shannon & Weaver presenta una variación entre 0,42 y 0,78, lo que demuestra que la ciénaga natural presenta lugares de menor riqueza de especies, comparándolo con los índices obtenidos

para la poza artificial Pujador; se observa además que la tendencia muestra un crecimiento muy lento de las especies en la ciénaga natural.

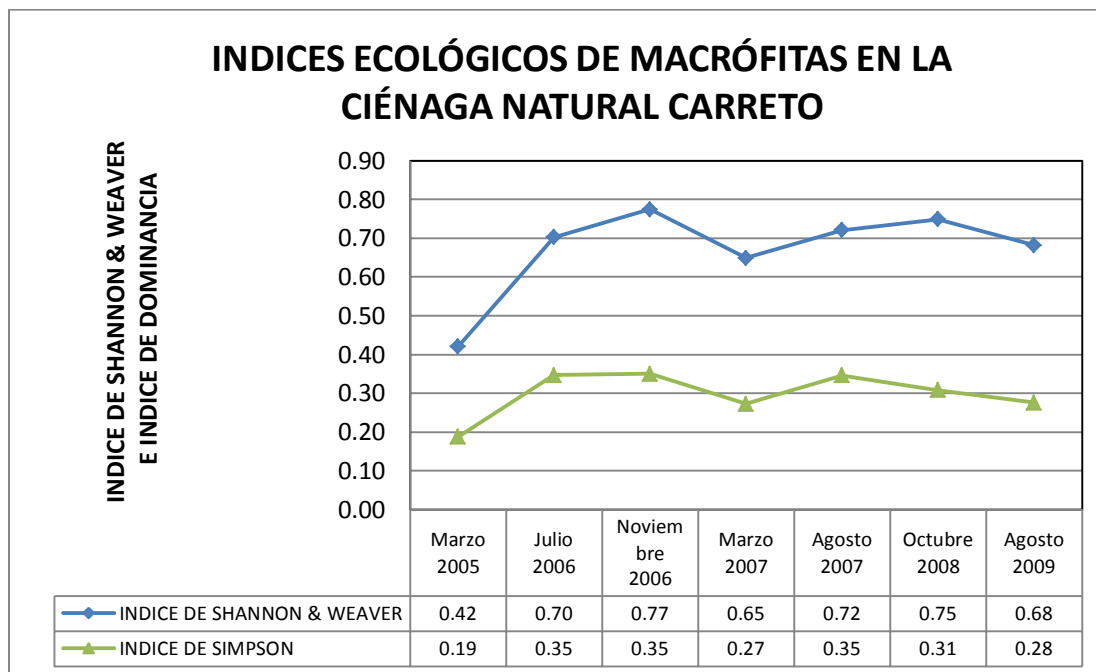


Figura 7-11: Variación de los Índices Ecológicos en la Ciénaga Carreto

Se puede notar de la **Figura 7-11** que existe un aumento de la comunidad macrófita en los meses de julio y agosto, y una disminución de la cobertura en el mes de marzo, lo cual es acorde con los valores de fósforo total obtenidos para los meses de verano. Sin embargo, la variabilidad de las macrófitas en esta poza, es la de establecerse en la ciénaga, ya que no hay un incremento significativo en las especies.

Se puede concluir que en los humedales excavados las comunidades de macrófitas crecen más rápidamente que en una ciénaga natural.

En la **Figura 7-12** se muestra la composición de especies similares en las dos ciénagas (ciénaga de restauración y ciénaga natural), donde se observa que para la ciénaga natural, las plantas que presentaron el mayor porcentaje de cobertura fue la *Eleocharis acutangula* (95.16%), mientras que para la ciénaga artificial Pujador la especie dominante es *Eichhornia azurea* (71,15%).

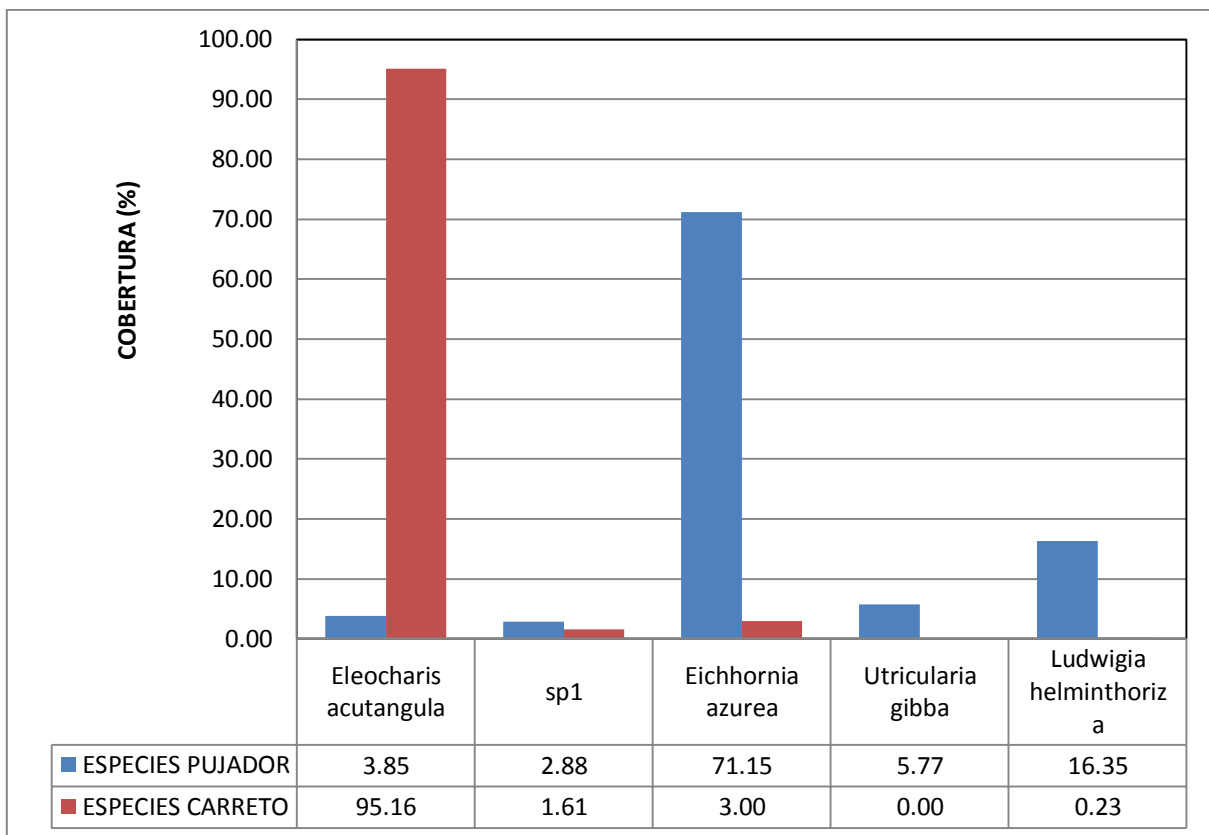


Figura 7-12: Abundancia de la Cobertura

Hay que anotar que la ciénaga natural y la ciénaga artificial están conformadas en su mayoría por la misma cobertura. De todas formas se puede afirmar que para el aspecto biótico acuático las ciénagas artificiales presentan buenas condiciones ecológicas para el establecimiento de estos organismos, siendo más productivas que las ciénagas naturales. A continuación en las **Figuras 7-13 a 7-16** se muestran algunas de las especies de macrófitas más representativas en los cuerpos de agua.

Figura 7-13: Eleocharis Acutangula**Figura 7-14:** Eichornia Azurea**Figura 7-15:** Oxycarium Cubense**Figura 7-16:** Ludwigia sp1

En la **Tabla 7-3** se presentan los valores máximos y mínimos obtenidos de los índices ecológicos, principalmente la riqueza de especies y la diversidad para la ciénaga natural y la artificial.

Tabla 7-3: Resumen de los Índices Ecológicos en la Ciénaga Artificial y la Ciénaga Natural en Estudio

Índices Ecológicos	Ciénaga Artificial Pujador		Ciénaga Natural Carreto	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Riqueza de Especies (S')	11	18	4	8
Dominancia de Simpson (D')	0,76	0,87	0,19	0,35
Diversidad de Shannon (H')	1,88	2,16	0,42	0,77

De la **Tabla 7-3**, se puede afirmar que los valores de Riqueza de especies y Diversidad fueron mayores en la ciénaga artificial que en la ciénaga natural, mostrando con ello que esta comunidad refleja mejor la diferencia entre estas ciénagas, pues su establecimiento y permanencia se debe a las exigencias fisicoquímicas y ecológicas de cada cuerpo de agua, jugando un papel importante en la ecología y dinámica de estos cuerpos de agua.

Del análisis entre la ciénaga artificial en proceso de restauración y la ciénaga natural, se encontró que los procesos de restauración favorecen el incremento de la diversidad de familias de macrófitas como consecuencia del mejoramiento de la calidad y de las condiciones del cuerpo de agua, incrementando la diversidad de hábitats y la oferta alimenticia. Es así como un sistema restaurado es capaz de sostenerse así mismo, resistiendo invasiones por nuevas especies, llegando a ser tan productivo como el original y con interacciones bióticas similares.

7.5 RESTAURACIÓN DE LA ZONA DE EXPLOTACIÓN

La Sociedad para la Restauración Ecológica (SER, 2002), define restauración como el proceso asistido a la recuperación de un ecosistema que ha sido dañado o destruido. Sus principios se basan en los de la sucesión ecológica y resulta por lo tanto valioso considerar la dinámica intrínseca del sistema y su posición del paisaje.

En esta investigación se evaluó el efecto de la restauración hidrogeomorfológica sobre los parámetros fisicoquímicos medidos desde la fase inicial de explotación hasta la fase de

restauración, además se realizó un análisis sobre las plantas acuáticas superiores o macrófitas acuáticas que son importantes componentes ecológicos, ya que al ser productoras primarias proveen hábitat para invertebrados, peces y una gran diversidad de otros organismos, y constituyen un recurso que hasta la fecha ha sido casi o totalmente subutilizado, estas poseen propiedades que las hacen indispensables en la creación y restauración de ciénagas. (Brix, 1994).

Actualmente, la mayoría de los proyectos de restauración de ciénagas han ignorado por completo las características hidrogeomorfológicas y ecológicas, así como el contexto socioeconómico, esto debido a la falta de base científica, por tal motivo, se hace importante estudiar la variabilidad de las macrófitas en la etapa de recuperación de las pozas.

La mayoría de los impactos más severos en ciénagas, ha sido la homogenización del terreno, con el impacto subsecuente en la biodiversidad, la degradación del suelo, y usualmente asociado a materia orgánica. Los servicios ambientales (calidad de agua, recreación, etc.) en ciénagas, han estado mayormente evaluados, y el número de proyectos de creación y restauración a lo largo del mundo han incrementado anualmente.

Las teorías y metodologías de restauración y rehabilitación de ciénagas y su efectividad han sido puntos clave en el campo de investigación de la ecología de ciénagas. (Zedler, 2000).

En vista de lo anterior, el presente capítulo va encaminado a dar la metodología a implementar en los proyectos que parten de una explotación minera aluvial, prestando gran atención a cada uno de los componentes de estudio de la presente tesis. Para ello y con el objetivo de mejorar el rendimiento ecológico se consideran tres escenarios, que permiten evaluar cual resulta óptimo en el tema de sedimentos, ya que este parámetro causa los impactos más severos en las ciénagas naturales y artificiales.

Para una escala de implementación óptima donde se obtenga éxito en los objetivos de restauración, se debe tener en cuenta el siguiente esquema propuesto por el Biólogo Orlando Vargas (**Figura 7-17**)

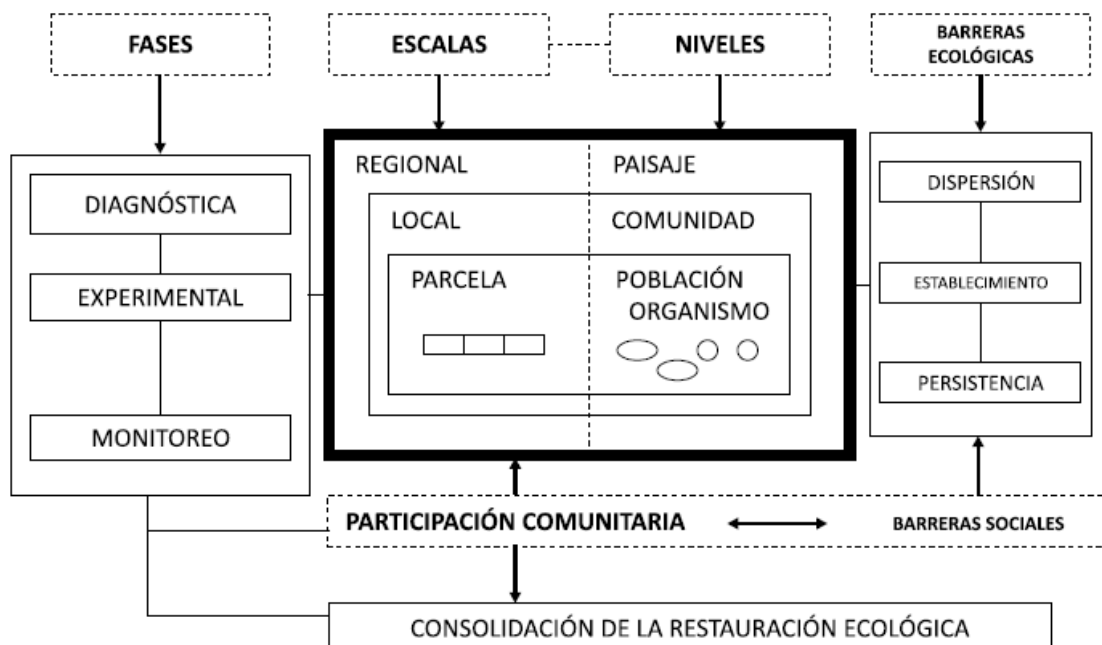


Figura 7-17: Relación de Categorías y sus Divisiones (Vargas, Orlando)

Estas escalas están dadas según el objetivo a considerar, para nuestro interés se requiere gran atención al manejo integrado de todas las variables. En el esquema anterior la influencia humana y la participación comunitaria se pueden entender como una escala social que permea todas las escalas y niveles, y se relaciona con todas las fases y barreras a la restauración.

En el proceso de tomar la decisión de cómo crear o restaurar satisfactoriamente las funciones del humedal, son necesarios cuatro pasos básicos recomendados.

- Determinar las necesidades locales y las limitaciones que el humedal necesita.
- Definir la escala y definir si es para creación o restauración.
- Estudiar los conflictos y compatibilidades.
- Y desarrollar la estrategia de construir el humedal bajo las condiciones tomadas anteriormente.

Los objetivos primordiales son diseñar medidas de manejo para la restauración de pozas artificiales y canales creados como consecuencia del desplazamiento y operación de las

dragas; con la idea de mejorar sus condiciones bióticas, dada la importancia que cobran los ecosistemas acuáticos. Con esta medida, se pretende propiciar la calidad física, química y biótica, considerando la productividad de estos cuerpos de agua de manera que se integren a su entorno y cuyo comportamiento sea similar al de los ecosistemas originales, tanto en estructura como en funcionalidad, de manera tal, que ofrezcan aprovechamientos potenciales para la comunidad de la región.

Para realizar un diseño de un programa de monitoreo efectivo para la restauración de las zonas abandonadas por la explotación minero aluvial, es importante tener en cuenta las siguientes medidas de manejo:

- Definir los objetivos del programa de monitoreo de tal manera que sean acordes con los objetivos propuestos para la restauración.
- Este monitoreo debe empezar desde la etapa de explotación, de tal forma que se puedan observar los cambios obtenidos inicialmente con los obtenidos en la etapa de restauración.
- La escala temporal de medición debe ser de manera frecuente en la etapa de explotación, para lo cual se propone un monitoreo constante de cada 2 meses, ya que el sistema de dragas tiene avances de 10000 a 20000 m² de área por mes; para la etapa de recuperación se propone un monitoreo cada 3 meses con un mínimo de 5 años, tal y como lo definen Desmond et al.(2002) donde citan que un monitoreo menor a 5 años es muy corto para analizar el desarrollo de los importantes atributos ecosistémicos.
- Estos monitoreos permiten evaluar el comportamiento con el tiempo y garantizar la funcionalidad adecuada del ecosistema al mejorar la calidad del agua. Un monitoreo efectivo acompaña al proceso de restauración desde el diagnóstico del estado existente del ecosistema, y continúa durante la implementación y desarrollo de los procedimientos, terminando en el momento en que se considera que el ecosistema ha recuperado su integridad.
- Se debe hacer selección de las variables más importantes a medir y los indicadores adecuados para su desempeño.
- Una vez inicie el proyecto de restauración, este debe estar encaminado a incluir y mantener la integridad de los ecosistemas recuperando la composición y

estructura de la biodiversidad nativa y los procesos ecológicos y evolutivos que crean y mantienen la biodiversidad.

- Es importante tener en cuenta que para la fase de explotación se pueden tener en cuenta cualquiera de los tres escenarios desarrollados en el presente estudio, que aunque estuvieran encaminados en la fase de restauración, pueden ser aplicados a la fase inicial, debido a que en esta no hay problemas por el exceso de sedimentos a la poza, ya que nunca se colmatará debido al dragado continuo.
- Sin embargo, es importante mencionar que para la fase de restauración, el mejor escenario obtenido es el *Escenario 3*, que considera una poza semi-abierta conectada al río por el canal de salida. Ya que la conexión no se da en el sentido del flujo del río principal sino en contracorriente, lo que permite que la entrada de sedimentos sea menor, haciendo que la poza no se colmate rápidamente, como sucede en los *Escenarios 1 y 2*, de esa manera se garantiza que a largo plazo, la profundidad se estabilice.
- Los resultados obtenidos en la optimización de la calidad de agua, y de la eficiencia hidráulica de la poza, permiten que las plantas acuáticas tengan la posibilidad de ser altamente productivas en la poza artificial.
- Es importante que en el desarrollo del escenario óptimo se considere la participación comunitaria, permitiendo que estas pozas adquieran una oferta de servicios sostenibles para la región.

La restauración busca la compensación de los impactos ambientales significativos generados en el proceso de explotación, de tal manera que la oferta de servicios ambientales luego de este proceso iguale o mejore aquella existente antes de la operación, en términos de calidad y cantidad.

Actualmente Mineros S.A., desarrolla un proceso de restauración muy particular en el sentido de que se realiza de manera continua, es decir, en la medida en que avanza la explotación, la restauración se va desarrollando atrás de ésta. Luego de que las dragas van avanzando en el bloque productivo, permanentemente se va realizando la restauración ambiental sobre los sustratos que se van generando en tierra y agua (en los cargueros, rellenos y humedales creados), y en los que queda como producto final un

paisaje con mayor variedad altimétrica y un sistema hidráulico abierto, potenciando grandes beneficios en términos de la oferta de servicios ambientales; tales como:

- Mayor volumen para la regulación hídrica (por la gran cantidad de humedales creados),
- Mayor área o llanura de desborde (por la densificación de la red de drenaje),
- Remoción de sedimentos en el sistema (por las pozas profundas que se construyen durante la operación),
- Algunas zonas altas no inundables y productivas (por los cargueros dejados, en los que se establecen las Parcelas Agroforestales),
- Y el impulso de una gran oportunidad para que este proceso de Restauración Ambiental impulse la biodiversidad y el desarrollo rural sostenible de la región.

Una vez se termina la explotación, en los bloques se tienen tres elementos en los que se basa la restauración: Los cargueros, compuestos por gravas de diámetros variados y bajos porcentajes de arcillas y limos; los rellenos hidráulicos, compuestos por arenas, limos y arcillas, ubicados entre cargueros y los humedales artificiales o pozas de explotación aledañas al área.

El programa consiste entonces en la restitución del paisaje mediante el perfilamiento de las descargas o cargueros dejados por la explotación de las dragas, de tal forma que los terrenos adquieran una estabilidad morfológica y paisajística para su posterior recuperación integral. Los rellenos hidráulicos de materiales arcillosos, producto del descapote hecho por las dragas de succión, elevan la superficie del terreno un metro o más, con lo cual mejoran apreciablemente, la condición de drenaje del lugar, al punto que pueden ser utilizados como tierra cultivable.

Luego de restituida la superficie de terreno, se inician las actividades de establecimiento de coberturas y plantaciones forestales sobre las áreas explotadas, cargueros y rellenos hidráulicos. Contempla el establecimiento de bosque protector – productor con diferentes especies, en su gran mayoría nativas, de rápido crecimiento y buen comportamiento en condiciones de áreas degradadas y suelos de baja fertilidad. En la **Figura 7-18** se

encuentra la secuencia de restauración de las zonas degradadas empleada por Mineros S.A.

De las conclusiones obtenidas de cada uno de los temas estudiados, se considera que un ecosistema se ha restaurado cuando contiene suficientes recursos bióticos y abióticos como para continuar su desarrollo sin subsidio o sin ayuda adicional, así puede mantenerse tanto estructural como funcionalmente y puede mostrar capacidad de restauración dentro de los límites normales de estrés y alteración ambiental.



Figura 7-18: Secuencia de la Restauración de Cargueros (Explotación, Restitución Morfológica y Reforestación)

Finalmente es importante mencionar que un ecosistema está restaurado cuando presenta los siguientes atributos (Society for Ecological Restoration, 2004):

- Contiene un conjunto característico de especies del ecosistema de referencia y proveen una estructura apropiada a la comunidad.
- En su composición se encuentran especies nativas hasta un grado máximo factible.
- Todos los grupos funcionales necesarios para el desarrollo y/o estabilidad continua del ecosistema restaurado se encuentran representados, de lo contrario los grupos faltantes tienen la posibilidad de colonizar por medios naturales.
- El ambiente físico del ecosistema restaurado tiene la capacidad de sostener poblaciones reproductivas de las especies necesarias para su continua estabilidad o desarrollo a lo largo de la trayectoria deseada (que es la que conduciría hacia el ecosistema de referencia)
- Se han eliminado o reducido de manera significativa los factores limitantes.
- Tiene suficiente capacidad de recuperación como para aguantar los acontecimientos estresantes periódicos y normales del ambiente local.
- Es autosostenible al mismo grado que su ecosistema de referencia y tiene el potencial de persistir indefinidamente bajo las condiciones ambientales existentes. No obstante, los aspectos de su biodiversidad, estructura y funcionamiento podrían cambiar como parte del desarrollo normal del ecosistema y podrían fluctuar en respuesta a acontecimientos normales y periódicos aislados de estrés y de alteración de mayor trascendencia. Como con cualquier ecosistema intacto, la composición de las especies y otros atributos de un ecosistema restaurado podrían evolucionar a medida que cambian las condiciones ambientales.

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

8. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

8.1 CONCLUSIONES

Inicialmente se tenía la concepción de que las zonas abandonadas por la explotación aluvial en pozas, no tenían las características aptas para ser zonas altamente productivas a futuro. En este estudio se logró establecer que mediante un sistema de explotación adecuado se optimiza el trabajo hidráulico de la ciénaga de tal forma que una vez concluye la explotación la geo-forma remanente puede tener un comportamiento ecológico similar al de una ciénaga natural. Se llegó a esta conclusión a partir de la comparación entre una poza en explotación y una en recuperación que fue producto de explotaciones anteriores.

A continuación se evaluará cada uno de los aspectos analizados dentro de la presente investigación.

8.1.1 CALIDAD DE AGUA

En este estudio se describen los patrones de variación de los parámetros físico-químicos de mayor importancia tanto en la poza que se encontraba en fase de operación, como en la poza en restauración, con el fin de tener un mejor entendimiento de cómo funcionan estos cuerpos de agua. Específicamente, los patrones de variación de la temperatura superficial del agua, del oxígeno disuelto, turbiedad, pH, entre otros. Posteriormente se comparan la variación obtenida en la fase de explotación con la fase de restauración, y

luego se verifica que los resultados obtenidos en esta última son similares a los existentes en una ciénaga natural.

Del comparativo de los parámetros fisicoquímicos entre la poza en operación y la poza en restauración, se encuentra que en una misma época se presenta un patrón similar de comportamiento, mostrando una eficiencia hidráulicas de las pozas, por su parte para la fase de restauración se observa como las variables indican una disminución de los parámetros fisicoquímicos con respecto a la fase operativa, donde los valores se encuentran cercanos a los sugeridos para un ecosistema natural, validando la optimización de los procesos de calidad de agua desde la fase de explotación hasta la fase de restauración. (Tabla 8-1 y Tabla 8-2)

Tabla 8-1: Resumen de los Parámetros Fisicoquímicos en los Canales de Entrada y Salida – Fase en Operación

Canal	pH (Unidades de pH)	Temperatura (°C)	Turbiedad (NTU)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
Entrada	7,10 ± 0,44	26,00 ± 0,79	495,95 ± 327,28	7,87 ± 0,73
Salida	6,98 ± 0,39	25,86 ± 0,68	359,82 ± 248,88	7,51 ± 0,73
Canal	Conductividad Eléctrica (us/cm.)	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	DBO5 (mg O2/l)	
Entrada	54,63 ± 14,56	429,59 ± 278,11	3,71 ± 1,83	
Salida	53,69 ± 13,60	326,27 ± 143,41	3,60 ± 1,66	

Tabla 8-2: Resumen de los Parámetros Fisicoquímicos en la Ciénaga Artificial Pujador – Fase en Restauración

Ciénaga	pH (Unidades de pH)	Temperatura (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Conductividad Eléctrica (us/cm.)
Pujador	6,71 ± 0,26	30,68 ± 2,07	4,62 ± 0,84	60,63 ± 4,60
Ciénaga	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	DBO5 (mg O2/L)	Fósforo Total (mg P/L)	
Pujador	7,4 ± 3,09	5,1 ± 1,55	0,1 ± 0,05	

8.1.2 HIDROGEOMORFOLÓGICO Y SEDIMENTOLÓGICOS

La problemática descrita y el desarrollo de la investigación iniciado, muestran un ejemplo muy particular, en el que los estudios hidrogeomorfológicos están siendo determinantes

para evaluar un posible impacto ambiental severo a darse a largo plazo sobre un espacio que fue degradado producto de la explotación minera aluvial.

Un modelo bidimensional hidrodinámico del flujo se crea en la poza en explotación UP-2, con el fin de evaluar los cambios del flujo (velocidades, profundidades y cambios en el lecho producto de la depositación o erosión) para diferentes escenarios propuestos, y así finalmente determinar cuál de las propuestas permiten que una poza que se encontraba en fase de explotación sea restaurada y sostenible a largo plazo, sin que se presenten impactos significativos por la entrada de sedimentos. La calibración y verificación del modelo hidrodinámico en cada uno de los escenarios muestra buenos resultados.

Se analizaron tres escenarios durante la época de operación, los cuales se describen a continuación:

- *Escenario 1:* Consiste en dejar la poza que estuvo en proceso de explotación con la conexión al río mediante los canales artificiales de entrada y salida.
- *Escenario 2:* Consiste en dejar la poza con una sola conexión con el río mediante el canal de entrada.
- *Escenario 3:* Consiste en dejar la poza con una sola conexión con el río mediante el canal de salida.

Se pudo verificar que la poza con conexión al río mediante el canal de salida, y que hace las veces de entrada y salida del agua, es la más eficiente en el tema de atrapamiento de sedimentos; para este escenario se evaluó el modelo realizando simulaciones para 5 y 10 años a partir de la información de los aforos realizados en campo. Se observó como para el escenario 3 el comportamiento de la poza y los canales se estabilizan entre los 5 y 10 años, sin llegar a la colmatación. Para los escenarios restantes las pozas se agradaban sucesivamente llegando a la colmatación total antes de los 5 años.

En la fase operativa se encontró que los sólidos en suspensión que entran del río a la poza son retenidos por ésta, de lo cual se infiere que el dragado que se da en la poza no llega a afectar la dinámica del río principal, debido a que no se evidencia un aumento en los sólidos suspendidos totales en el canal de salida. Además se puede decir que ambas

pozas muestran una disminución efectiva de los nutrientes y demás parámetros de importancia considerados, especialmente durante el inicio del verano.

8.1.3 CRECIMIENTO DE PLANTAS ACUÁTICAS

Las plantas acuáticas tienen un profundo efecto sobre las funciones ecosistémicas de la ciénaga creada. Dándose una mayor colonización de especies en las ciénagas artificiales que en las ciénagas naturales de la zona.

8.1.4 GENERALES

Las ciénagas pueden ser creadas si se tienen las condiciones hidrológicas aceptables. Con una adecuada condición hidrológica se puede desarrollar una biota apropiada, como es el caso de las plantas acuáticas, y un desarrollo fisicoquímico relativamente rápido sin la necesidad de plantar.

El manejo de las pozas artificiales debe considerar un desarrollo a múltiples escalas, introduciendo un contexto más amplio, que incluya otras ciénagas intercomunicadas en el área, y determine las correlaciones entre sí para un adecuado manejo sostenible de la zona.

Un enfoque con múltiples lineamientos, requiere la incorporación de datos suficientes, realizando un monitoreo de mayor frecuencia, y considerando información de otras fuentes como información de aguas subterráneas o conexiones por los paleocanales.

Las pozas en restauración rehabilitan las funciones naturales del río y del ecosistema, siendo beneficiosas al tener las mismas propiedades de una ciénaga natural. Actualmente Mineros S.A. tiene varios proyectos de restauración, los cuales se encuentran en monitoreo permanente para determinar la efectividad de estos sistemas, y para darle un valor agregado a la región.

Estas pozas adquieren las mismas propiedades de las ciénagas naturales, dentro de la importancia ecológica que adquieren y que es resaltada por Arias (1985), son las siguientes:

- Sirven como zonas de amortiguación de niveles de agua durante los procesos de inundación.
- La acción inundante-bajante de las aguas de las ciénagas hace de estas un pulmón de purificación, especialmente re-oxigenación.
- Son áreas de alta productividad biológica.
- Son zonas de reproducción, alimentación y crecimiento de poblaciones de peces y demás fauna acuática.
- La vegetación acuática asociada representa un papel importante en la absorción de sustancias químicas y tóxicas, purificándola.
- Los planos inundables y áreas anexas son zonas de alta productividad por deposición de nutrientes durante épocas de altos niveles de agua.
- Participan en el balance hídrico del ecosistema y en su ciclo hidrológico.

Tras la restauración, las pozas son importantes por tener valiosas funciones en calidad de agua, sirviendo como pozo de caída de nutrientes y sólidos, además ayuda en el crecimiento de macrófitas. Esto está acorde con lo que mencionan Mitsch et al., (2005), indicando que los cambios son el resultado inmediato y directo de la cobertura de macrófitas y del metabolismo acuático, otros cambios ocurren debido a la acumulación del sedimento.

Se propone que los procesos de restauración en zonas que fueron dedicadas a la minería aluvial, deben estar encaminados a:

- Mejorar la calidad del agua.
- Optimizar las propiedades hidrológicas.
- Restaurar los servicios ecosistémicos.
- Controlar los procesos de sedimentación y fluctuaciones hidrológicas.
-

La propuesta metodológica aporta criterios para la toma de decisiones sobre el aprovechamiento sostenible de los recursos minero aluviales, ya que resulta de un análisis integral donde se evaluaron la efectividad hidrológica, la eficiencia hidráulica y la facilitación y optimización de los procesos de calidad de agua.

La validación de la metodología mediante su aplicación en un caso de evaluación a largo plazo, muestra que puede ser utilizada como herramienta de planificación y diseño de un modelo de explotación en otras zonas similares. Sin embargo, se pueden realizar aplicaciones de tipo regional que permitan ajustarla a esta nueva escala.

8.2 RECOMENDACIONES

- Logrando entender la importancia que tienen los parámetros fisicoquímicos y biológicos dentro de un programa de restauración, se pueden considerar a largo plazo más sitios para desarrollar dicho proceso; para cumplir con ello se recomienda mantener un control permanente con monitoreos de mayor frecuencia, con al menos 4 mediciones al año, permitiendo un mejor entendimiento de la variación de estos parámetros en las pozas en la escala climática de la zona.
- Los sistemas de información geográfica (SIG), pueden ser usados para caracterizar los regímenes hidrológicos y geomorfológicos, antes de realizar una restauración hidrogeomorfológica con el objetivo de evaluar la distribución de especies y su éxito en términos reproductivos, para así estimar su sostenibilidad a largo plazo, la cual es condicionada por la calidad del hábitat.
- Se recomienda ampliar la investigación biótica involucrando la fauna de especies macro-invertebradas e invertebradas.
- Se recomienda ampliar la investigación utilizando fotografías aéreas con el fin de determinar la conexión espacial de las nuevas ciénagas y así obtener el conocimiento de corredores bióticos existentes antes y después de la restauración.

- Se recomienda integrar a la investigación los aspectos de aprovechamiento económico de las ciénagas recuperadas y su influencia en el desarrollo social de la zona.

8.3 FUTURAS INVESTIGACIONES

Como futuras investigaciones se pueden establecer las siguientes, de manera tal que encaminen a un mejor entendimiento de la sostenibilidad futura de los cuerpos de agua restaurados luego del proceso de explotación aluvial.

- Es importante mencionar que dentro de esta tesis no se tuvo en cuenta los efectos causados por la explotación artesanal e ilegal, ya que estos son de gran magnitud, y pueden generar cambios desde el punto de vista morfológico, y de sostenibilidad futura. Por lo que sus efectos podrían ser considerados en una nueva investigación.
- La evaluación de varias formas de explotación no fue tomada en cuenta, se tiene una consideración preliminar desde el punto de vista hidráulico, en el cual se puede aplicar cualquiera de los escenarios evaluados; sin embargo, se debe realizar una investigación en la que se logre observar si las demás componentes que intervienen en un proceso de explotación (química, ambiental y sanitaria) son compatibles.
- Se debe hacer una investigación que evalúe la posibilidad de analizar el beneficio que se obtiene al realizar el retrolleado posterior de la poza y compararlo con el resultado obtenido en este estudio.
- Se recomienda una investigación que englobe el análisis de sostenibilidad de la minería considerando otros frentes tales como: la recuperación de zonas producto de minería a cielo abierto y de minería en socavón.

A. ANEXO: ARCHIVOS DE LA SIMULACIÓN BIDIMENSIONAL DEL SMS 10.1

Este anexo contiene todos los archivos utilizados en la simulación bidimensional en elementos finitos del software SMS 10.1, para cada uno de los escenarios desarrollados en la tesis.

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

9. BIBLIOGRAFÍA

ARIAS, P. 1985. Las Ciénagas en Colombia. Revista Divulgación Pesquera Inderena. 22, 39-70.

BAHRE, C.J., WITHLOW, T.H., 1982. Floristic and vegetation patterns in a California dredge field. J. Biogeogr. 9, 79-90.

BARENDREGT, Aat, BIO, Ana M.F., 2003. Relevant Variables to Predict Macrophyte Communities in Running Water. Ecological Modelling 160, 205–217.

BENJUMEA HOYOS C. A., WILLS TORO A.. 2007. Evaluación de la estratificación térmica y su relación con el oxígeno disuelto del agua en la ciénaga Cachimbero, municipio de Cimitarra, Santander. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. No. 41. pp. 48-65. Septiembre de 2007.

BRADSHAW, A.D., HÜTTL, R.F., 2001. Future minesite restoration involves a broader approach. Ecol. Eng. 17, 87–90.

BRIX, Hans. 1994. Functions of macrophytes in constructed wetlands. Wat. Sci. Tech. Vol. 29, No.4, pp 71-78.

CHANDRA et al. 2010. Monitoring Water Quality of Coimbatore Wetlands - Tamil Nadu India. Environ Monit Assess (2010) 169: 671-676

CONDE, D., BONILLA, S., AUBRIOT, L., de León, R., & W. Pintos, 1999. Comparison of the areal amount of chlorophyll a of planktonic and attached microalgae in a shallow coastal lagoon. *Hidrobiología* 408/409: 285-291.

CHAUDHRY. M. HANIF.1993. Open Channel Flow. pp. 381

CUHACIYAN, C. 2008. Hydrogeomorphic characterization and classification of Pacific Northwest mountain streams for biomonitoring. Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado State University.

DESMOND, J. S., D. H. DEUTSCHMAN, J. B. ZEDLER. 2002. Spatial and temporal variation in estuarine fish and invertebrate assemblages: analysis of an 11-year data set. *Estuaries* 24:552–569.

DIRECCIÓN DE PLANEACIÓN ESTRATÉGICA INTEGRAL. 2009. Perfil de la Subregión del Bajo Cauca. Gobernación de Antioquia.

DUCHARMÉ, A. 1975. Informe técnico de Biología Pesquera (Limnología) INDERENA – FAO 4: 1-42.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA), 2002. User's Manual for FESWMS FST2DH. U.S. Department of Transportation. Publication No. FHWA-RD-03-053.

FENNESY et al. 1994. Sediment deposition patterns in restored freshwater wetlands using sediment tramps. *Ecological Engineering*, Vol. 3. Issue 4. Pages 409-428

FROELICH, Dave. C., 1989. Finite Element Surface Water Modeling System (FESWMS) – User's manual for FESWMS FST2DH – Two Dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model.

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA, Trabajo Escrito, Facultad de Contaduría Pública , Bogotá, 2004

GÓMEZ, Eliana. 2011. Influencia de Factores Ecológicos en la Distribución, Abundancia y Asociaciones de Foraminíferos Bénticos Recientes en Ecosistemas de Manglar en el Golfo de Urabá. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

GUTIÉRREZ, Karla Lorena. 2000. Potencial de la Planta Acuática Lemna gibba en la Alimentación de Cerdos. Tesis de Maestría. Universidad de Colima.

JENKINS G.A., 2003. Modelling the Hydraulic Characteristics of Artificial Wetlands, School of Environmental Engineering.

LI et al. 2010. Modeling the scenarios of wetland restoration in Hengshui Lake National Nature Reserve. Procedia Environmental Sciences 2. pp 1279 – 1289.

LÓPEZ, Nicolás. (2009) Aluviones Auríferos en Colombia, Geología e Historia de su Exploración y Producción. Mineros S.A.

Environmental Impacts of Mining. "What's the Problem? Environmental Impacts of Mining." Montana State University Bozeman. Web. 27 Nov. 2010.

<<http://ecorestoration.montana.edu/mineland/guide/problem/impacts/default.htm>> [En línea: Consultado en Febrero/2011]

MINING JOURNAL, 2000. Lasting impressions; Mining Journal, 17, v. 335. Pág. 386

MITSCH et al. 2005. Creating riverine wetlands: Ecological succession nutrient retention, and pulsing effects. Ecological Engineering 25, 510-527

MITSCH, W.J., GOSSELINK, J.G., 2007. Wetlands. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

MONTGOMERY, J. A., EAMES, J. 2008. Prairie Wolf Slough Wetlands Demonstration Project: A Case Study Illustrating the Need for Incorporating Soil and Water Quality Assessment in Wetland Restoration Planning, Design and Monitoring. Restoration Ecology. Vol. 16, No.4, pp. 618-628

MORENO-MATEOS, D., & COMIN, F.A., 2010. Integrating objectives and scales for planning and implementing wetland restoration and creation in agricultural landscapes. *Journal of Environmental Management*. 91, 2087-2095

NARANJO, L; ANDRADE, G. & PONCE De LÉON, E. 1999. Humedales interiores de Colombia: Bases Técnicas para su Conservación y Uso Sostenible. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos. Alexander Von Humboldt y Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá. Colombia.

ORTEGA, Diana Alejandra. 2006. La Minería y el Ordenamiento Territorial. Estudio de Caso. Área Minera, Empresa Mineros S.A., El Bagre. Tesis de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

PERSSON et al. 1999. Hydraulics Efficiency of Constructed Wetlands and Ponds. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 40. No. 3, pp. 291-300. 1999

PORTAL MINERO COLOMBIA. [En línea]. [15 de Febrero de 2011] disponible en: <http://www.imcportal.com/contenido.php?option=shownews&newsid=4884&render=page>

POSTEL, S., and CARPENTER, S.R. 1997. Freshwater ecosystem services. Pages 195-214 in G. Daily , editor. *Nature's services*. Island Press, Washington, D.C., USA. Postel y Carpenter.

PRYSTAY, W. 1998. Assessment of Constructed Wetlands for the Reduction of Nitrogen and Phosphorus. *Proceedings 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Brasil.

RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT, 2007. River basin management: Integrating wetland conservation and wise use into river basin management. *Ramsar handbooks for the wise use of wetlands*, 3rd edition, vol. 7. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland.

RAMSAR CONVENTION ON WETLANDS. [En línea]. [20 de Marzo de 2011] disponible en: www.ramsar.org

RIDDELL et al. 2010. A geophysical analysis of hydro-geomorphic controls within a headwater wetland in a granitic landscape, through ERI and IP. *Hydrology and Earth Systems Sciences*. 14, 1697-1713.

ROCA et al. 2009. Modelling a torrential event in a river confluence. *Journal of Hydrology*. 364. pp. 207-215.

ROLDÁN, G, RAMÍREZ, John Jairo. 2008. *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín. Colombia.

SIMMONS, M.; VENHAUS, H. and WINDHAGER, S. 2007. Exploiting the attributes of regional ecosystems for landscape design: The role of ecological restoration in ecological engineering. *Ecological Engineering*, 30: 201 – 205.

SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION. 2004. *Assembly Rules and Restoration Ecology*. Island Press.

TREPEL, M. 2007. Wetland restoration at the Society for Ecological Restoration International Conference in Zaragoza, Spain. *Ecological Engineering*. 30: 91 – 92.

VARGAS, Orlando. *Los Pasos Fundamentales en la Restauración Ecológica*. Grupo de Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.

WARDROP & BROOKS 1998. The Occurrence and Impact of Sedimentation in Central Pennsylvania Wetlands. *Environmental Monitoring and Assessment*. 51: 119-130

WYCHERA, U., ZOUFAL, R. CHRISTOF-DIRRY, P. y JANAUER, G. A. 1993. Structure and Environmental Factors in Macrophytes Stands. *J. Aquat. Plant Manage*, 31, 118-122

ZEDLER, J.B. 2000. Progress in wetland restoration ecology. *Trends Ecol. Evol.* 15, 402-407.

ZEDLER and KERCHER, 2005. Wetland Resources: Status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annu. Rev. Environmental. Resources* 30, 39-74

ZHOU et al. 2008. Integrated ecological assessment of biophysical wetland habitat in water catchments - Linking hydro-ecological modelling with geo-information techniques. *Ecological Modelling*. 214, 411-420.