

PROCEDIMIENTO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS MENOS AFECTADAS POR  
EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN LA PERFORACIÓN  
DE POZOS PETROLEROS, LLANOS - 58, PUERTO LÓPEZ - META

LIRYAN LISSTTE CABALLERO RODRÍGUEZ  
ÁNGELA CRISTINA GARCÍA BUSTAMANTE

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ, D. C.  
2012

PROCEDIMIENTO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS MENOS AFECTADAS POR  
EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN LA PERFORACIÓN  
DE POZOS PETROLEROS, LLANOS - 58, PUERTO LÓPEZ - META

LIRYAN LISSTTE CABALLERO RODRÍGUEZ  
ÁNGELA CRISTINA GARCÍA BUSTAMANTE

Proyecto, para optar el  
Título de INGENIERA AMBIENTAL

Director  
Alberto García  
Geólogo MSc

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ, D. C.  
2012

Nota de aceptación:

---

---

---

---

Firma del Presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, 28 de noviembre de 2012.

## DEDICATORIA

*Hoy nuevamente enrostro una sonrisa de satisfacción...  
Entiendo al fin el valor de esos momentos de abrazos que cambiamos por las aulas de  
clase... solo espero entonces mi amada hija, que en el futuro no exista nada que nos robe  
las noches de cosquillas, besos y cuentos...*

*Mi hermosa niña desde esa primera inocente y tierna mirada, mi vida entera es para ti.*

*Angela Cristina García Bustamante*

## DEDICATORIA

*A mi familia, gracias a ellos he culminado una etapa importante en mi vida por su amor, comprensión, dedicación y apoyo, este logro que hoy se cumple es un éxito mas, y a mis amigos que compartieron a mi lado este proceso y que siempre han estado ahí, dándome fuerza en los momentos difíciles, enseñándome que la vida esta llena de adversidades las cuales soy capaz de afrontar*

*Liryan Lissste Caballero Rodriguez*

## **AGRADECIMIENTOS**

Hoy al culminar una de las etapas más significativas en nuestra vida laboral y personal, hacemos un alto en el camino y nos damos cuenta que fueron muchas las personas que hicieron éste recorrido un poco más fácil, agradecemos a la ECCL por brindarnos el apoyo y las herramientas necesarias para llevar a cabo nuestras actividades, a los profesores que a lo largo de éste proceso nos aportaron sus conocimientos, igualmente al Geólogo MSC Alberto García Bolívar por la dirección y orientación del trabajo, y a los jurados por sus aportes y revisiones realizadas.

A nuestros compañeros de estudio y especialmente a nuestros compañeros de trabajo, los Ingenieros Forestales Gilmer Gualberto Beltrán, María Angélica Beltrán, Freddy Valcárcel, al Ingeniero Agrícola Mauricio Rozo, al administrador ambiental Nelson Castillo y a muchos otros profesionales amigos que desde su experiencia y conocimiento nos brindaron las herramientas necesarias para el análisis y la construcción metodológica del presente trabajo.

A nuestras familias y a nuestro amigo y compañero Fredy Gutiérrez por su incondicional apoyo, la paciencia, los consejos, las palabras de aliento y la motivación para seguir adelante, seguramente sin su ayuda no estaríamos abrazando este nuevo logro. Hoy más que nunca entendemos la importancia que tienen en nuestras vidas y lo irremplazable que es su amor y cariño para nosotras.

## CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	16
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
3. OBJETIVOS .....	17
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4. JUSTIFICACIÓN .....	18
4.1 MARCO TEÓRICO .....	23
4.1.1 Los suelos en Colombia.....	23
4.1.2 Los hidrocarburos y su presencia en Colombia.....	25
4.1.3 Vertimientos generados en actividades de exploración y producción.....	29
4.1.4 Sistema de manejo de aguas.....	31
4.1.5 Lodos de perforación .....	34
4.1.6 Geoestadística .....	35
4.1.7 Modelo de Simulación Hydrus.....	36
4.1.8 Sistemas de Información Geográfica .....	37
4.2 MARCO LEGAL.....	38
4.3 DESCRIPCIÓN ÁREA DE ESTUDIO.....	40
4.3.1 Localización Llanos 58.....	40
4.3.2 Descripción de suelos .....	42
4.3.3 Clasificación edafológica.....	42
4.3.4 Caracterización física, química y biológica de las unidades de suelos .....	60
5. METODOLOGÍA.....	69
5.1 ESTRUCTURACIÓN METODOLÓGICA .....	69
5.1.1 Etapa 1. Elaboración de trabajo de campo.....	70
5.1.2 Etapa 2. Simulación comportamiento del vertimiento .....	73
5.1.3 Etapa 3. Aplicación de métodos geoestadísticos para la espacialización de datos.....	84
5.1.4 Etapa 4. Zonificación para la determinación de áreas menos afectadas en el riego por aspersión de aguas residuales industriales en sector de hidrocarburos.....	92
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	96
7. CONCLUSIONES.....	97
8. RECOMENDACIONES.....	98
9. BIBLIOGRAFÍA.....	99

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Producción por cuenca y su participación en la producción total nacional.....	21
Tabla 2. Límites de concentración de residuos peligrosos .....	39
Tabla 3. Localización del área de perforación exploratoria LLA-58 .....	41
Tabla 4. Características del perfil de la unidad de suelos AVAab1 .....	45
Tabla 5. Características del perfil de la unidad de suelos LVAdc2 – TypicHapludults .....	48
Tabla 6. Características del perfil de la unidad de suelos LVAdc2– PetroferricHapludox .....	50
Tabla 7. Características del perfil de la unidad de suelos LVAdc1 .....	53
Tabla 8. Características del perfil de la unidad de suelos VVAaz.....	56
Tabla 9. Características del perfil de la unidad de suelos VVBaz.....	59
Tabla 10. Clasificación densidad aparente .....	61
Tabla 11. Caracterización física de los suelos del área de influencia.....	62
Tabla 12. Caracterización química de los suelos del área de influencia.....	67
Tabla 13. Presencia de edafofauna .....	68
Tabla 14. Datos arrojados en la simulación del comportamiento del flujo. Hydrus1D.....	83
Tabla 15. Valoración de vulnerabilidad de la capacidad de infiltración del suelo.....	93
Tabla 16. Valoración de vulnerabilidad del componente suelos .....	94
Tabla 17. Ponderación de valoración por vulnerabilidad .....	95



## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Áreas asignadas para exploración y producción de hidrocarburos en Colombia .....	19
Figura 2. Esquema de perforación de pozos petroleros.....	29
Figura 2. Localización regional del área de estudio .....	41
Figura 3. Suelos AVAab1.....	43
Figura 4. Suelos de lomas redondeadas denudadas .....	46
Figura 5. Suelos de lomas redondeadas y/o planas.....	49
Figura 6. Suelos de relieve ondulado.....	51
Figura 7. Suelos de valles en planos de inundación VVAaz.....	54
Figura 8. Suelos de valles aluvialesVVBaz .....	57
Figura 9. Porcentaje de distribución de la granulometría para cada una de las unidades de suelos.....	60
Figura 10. Densidad aparente de las unidades de suelos.....	61
Figura 11. Porcentaje de distribución de la materia orgánica para cada una de las unidades de suelos.....	63
Figura 12. Porcentaje de saturación de bases totales para cada una de las unidades de suelos.....	64
Figura 13. Cantidad de Grasas y aceites por unidad de suelos .....	65
Figura 14. Cantidad de Hidrocarburos totales por unidad de suelos.....	65
Figura 15. Cantidad de metales pesados por unidad de suelos .....	66
Figura 16. Cantidad de cadmio, plomo y mercurio por unidad de suelos.....	66
Figura 17. Fase de levantamiento de suelos.....	70
Figura 18. Vista lateral de la calicata .....	72
Figura 19. Diagrama de variables a utilizar.....	92
Figura 20. Categorías vulnerabilidad .....	95

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	pág.
Fotografía 1. Cuneta perimetral en tierra. ....	32
Fotografía 2. Caja en concreto para la instalación del Skimmer.....	32
Fotografía 3. Skimmer Metálico Típico.....	33
Fotografía 4. Tanques Australianos. ....	33
Fotografía 5. Calicata en campo. ....	44
Fotografía 6. Suelos de lomas redondeadas denudadas, en clima cálido húmedo, sobre laderas inclinadas, pendiente de 7-25% y erosión ligera a moderada.....	47
Fotografía 7. Izquierda: Suelos de lomas redondeadas y/o planas, en clima cálido húmedo, en terrenos de ondulados a quebrados, pendiente de 12-25% y erosión ligera a moderada.....	49
Fotografía 8. Suelos de relieve ondulado, con pendientes entre 3% y el 12%, se aprecia al fondo las cimas redondeadas, pastos arbolados con la especie chaparro curatella americana .....	52
Fotografía 9. Suelos de valles en planos de inundación VVAaz.....	55
Fotografía 10. Valle aluvial del caño los marranos, vereda Alto Melúa .....	57
Fotografía 11. Observaciones de identificación (cajuelas) .....	71
Fotografía 12. Observaciones de comprobación (barrenadas).....	71
Fotografía 13. Observaciones de descripción (calicatas) .....	72

## GLOSARIO

Realizar la investigación y posterior aplicación metodológica, requiere tener los conocimientos apropiados y básicos para identificar las diferentes necesidades que se presentan a lo largo de su elaboración. Para tener una idea clara de lo que conlleva la realización del proyecto PROCEDIMIENTO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS MENOS AFECTADAS POR EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN LA PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS, LLANOS - 58, PUERTO LÓPEZ – META . Se presentan a continuación conceptos y definiciones básicas para un mayor manejo y entendimiento de la información.

**CONSOCIACIÓN DE SUELOS:** unidad cartográfica constituida por un solo taxón o un área miscelánea y suelos similares.<sup>1</sup>

**CORTE DE PERFORACIÓN:** son los volúmenes de residuos generados en las actividades de perforación. Los cortes pueden ser en base a aceite o agua.

**DISPOSICIÓN FINAL:** es el proceso de aislar y confinar los residuos o desechos peligrosos, en especial los no aprovechables, en lugares especialmente seleccionados, diseñados y debidamente autorizados, para evitar la contaminación y los daños o riesgos a la salud humana y al ambiente.<sup>2</sup>

**ESCORRENTÍA:** agua que no se infiltra en el suelo, corre y llega a formar parte de los ríos, lagos y ciénagas, para finalmente llegar al mar.<sup>3</sup>

**GRUPOS INDIFERENCIADOS:** consisten de dos o más componentes que no están consistentemente asociados geográficamente y que por lo tanto no siempre se encuentran juntos en la misma unidad cartográfica. Estas taxa son incluidas en la misma unidad cartográfica por que el uso y el manejo son muy similares. Generalmente son incluidas juntas porque tienen algunos rasgos comunes como la pendiente, pedregosidad o inundaciones. Un ejemplo puede ser Tierra escabrosa quebrada.<sup>4</sup>

**NIVEL FREÁTICO:** lámina de agua libre que satura transitoria o permanentemente todos los poros del suelo en una sección determinad.<sup>5</sup>

**LA PERFORACIÓN:** es un proceso que consiste en realizar en el subsuelo un orificio vertical, inclinado u “horizontal muy profundo hasta llega a *estructuras*, “*trampas*” o *formaciones*, que pueden contener hidrocarburos (crudo, gas, condensados o una mezcla de estos)”. El hueco puede tener hasta 12 km de profundidad y se conoce con el nombre de “*Pozo petrolero*.”<sup>6</sup>

---

<sup>1</sup> Instituto Geográfico Agustín Codazzi, <http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/Glosario>

<sup>2</sup> MADS, Decreto 4741, 2005

<sup>3</sup> MADS, Decreto 2820, 2010.

<sup>4</sup> [www.edafologia.com.ar](http://www.edafologia.com.ar)

<sup>5</sup> Instituto Geográfico Agustín Codazzi, <http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/Glosario>

<sup>6</sup> <http://oilwatchpanama.tripod.com/documentos/id4.html>

**LICENCIA AMBIENTAL:** es la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de un proyecto, obra o actividad, que se acuerdo con la ley y los reglamentos pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje; la cual sujeta a beneficiario de esta, al cumplimiento de los requisitos , términos, condiciones y obligaciones que la misma establezca en relación con la prevención mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada.<sup>7</sup>

**SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA - SIG:** en general un Sistema de Información Geográfica se puede definir como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente en la captura, almacenamiento, análisis, transformación y presentación de toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos. Los SIG son una tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial, que surgen como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato. Los SIG hacen posible la visualización, exploración, almacenamiento eficaz, recuperación rápida y visualización interactiva de las formas correspondientes a conjuntos de datos geográficos.

**RESIDUO O DESECHO:** es cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, cuyo generador descarta, rechaza o entrega porque sus propiedades no permiten usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la legislación o la normatividad vigente así lo estipula.<sup>8</sup>

**TERRAZAS:** corresponde a los remanentes de anteriores niveles de sedimentación, en los cuales se ha incisado la corriente como consecuencia de rejuvenecimientos del paisaje. Los niveles más altos son los más antiguos y normalmente contienen los suelos más evolucionados. Cada nivel de terraza está separado de otros por escarpes verticales a subverticales (talud de terraza) en los que afloran las capas de sedimentación. No obstante, cuando esos escarpes son cubiertos con material de desplomes y de erosión del plano superior, su pendiente se reduce considerablemente, permitiendo la formación de suelos.<sup>9</sup>

**TRATAMIENTO:** Es el conjunto de operaciones, procesos o técnicas mediante los cuales se modifican las características de los residuos o desechos peligrosos, teniendo en cuenta el riesgo y grado de peligrosidad de los mismos, para incrementar sus posibilidades de aprovechamiento y/o valorización o para minimizar los riesgos para la salud humana y el ambiente.<sup>10</sup>

**VERTIMIENTO LÍQUIDO:** es cualquier descarga líquida hecha a un cuerpo de agua o a un alcantarillado.<sup>11</sup>

---

<sup>7</sup> MADS, Decreto 2820, 2010.

<sup>8</sup> Manual para el Manejo Integral de Residuos en el Valle del Cauca, 2002.

<sup>9</sup> IGAC, Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras, 1991.

<sup>10</sup> Levantamiento de Información Gestion integral de residuos peligrosos en laboratorios, 2004.

<sup>11</sup> MADS, Decreto 1594, 1984.

## RESUMEN

La actividad petrolera en Colombia ha venido adquiriendo una creciente importancia, debido entre otros factores a su alta participación en las exportaciones y a la representación en tema fiscal para el gobierno nacional y regional, por lo cual el Estado ha implementado medidas que buscan que el desarrollo de éste sector de la economía sea un proceso auto sostenible y se minimicen los impactos que se generan en cada de sus etapas. El suelo es uno de los recursos más afectados, pues es el principal receptor de los impactos de actividades industriales agrícolas y humanas, en ésta vía la presente investigación buscó indagar por diferentes herramientas que permitieran una mejor planeación de la distribución espacial de actividades, específicamente del vertimiento de aguas residuales industriales derivadas de la perforación de pozos petroleros, encontrando la integración de herramientas de simulación de comportamiento de fluidos en el suelo (HYDRUS 1D) y de análisis espacial (MÓDULO DE GEOESTADÍSTICA ARCGIS), generando superficies que puedan ser relacionadas con otras capas temáticas.

Se logra través de la investigación elaborar un procedimiento que pueda ayudar a determinar las áreas menos afectadas para la realización del vertimiento de las aguas residuales industriales, el cual contempla incluso la etapa de campo para la descripción de las características físicas del suelo, hasta la elaboración de la zonificación de áreas vulnerables, que permite la integración de diferentes capas temáticas que influyen en la afectación del suelo en el desarrollo de ésta actividad.

Este procedimiento deja ver las ventajas de la espacialización de la información recolectada en un estudio de impacto ambiental, el cual se pretende sea una guía en el desarrollo de los mismos, y sea alimentada por los diferentes expertos de acuerdo a las características propias de cada proyecto.

## ABSTRACT

The oil industry in Colombia has been becoming increasingly important, due among other factors to the high share of exports and representation in tax matters for national and regional government. For this reason, the State has implemented measures that seek to develop this sector of the economy as a self-sustaining process and minimize the impacts generated at each of its stages. Soil is one of the most affected resources, as it is the main recipient of the impacts of agricultural and industrial activities, thus, the present study sought to investigate different tools that allow for better planning of the spatial distribution of activities, specifically discharges of industrial wastewater resulting from oil drilling, finding the integration of simulation tools for fluid behavior in soil (HYDRUS 1D) and spatial analysis (ARCGIS geostatistical MODULE) generating surfaces that may be related to other layers.

through research it is to developed a procedure that can help determine the least affected areas to carry out the discharges of industrial waste water, which includes also the field stage for the description of the physical characteristics of the soil, until the development of a zoning for vulnerable areas, which allows the integration of different thematic layers that influence soil involvement in the development of this activity.

This procedure reveals the advantages of the spatial information collected in an environmental impact assessment study, which is intended to be a guide in the development of it, and is fed by different experts according to the characteristics of each project.

## 1. INTRODUCCIÓN

La explotación de hidrocarburos ha venido adquiriendo peso en la economía del País, aportando mayores ingresos para el Estado Colombiano y para la sociedad en general, por lo cual se considera un sector estratégico para el desarrollo. El incremento de la actividad genera cambios importantes a nivel ambiental, social, económico y cultural, que en ocasiones, solo se hacen visibles varios años después de la intervención, por lo cual el aparente beneficio obtenido, no compensa los impactos causados a largo plazo.

En este sentido, se han venido fortaleciendo las políticas relacionadas con el sector minero-energético, con el aumento de los requisitos para licenciamiento ambiental, e impuestos, en el entendido que la es la industria de los hidrocarburos la generadora de importantes impactos ambientales que pueden expresarse en términos de costos y beneficios.

En la actualidad aunque los procesos de licenciamiento ambiental y de seguimiento se realizan de una manera responsable y profesional por parte de las autoridades competentes, basándose en los términos de referencia impartidos por la autoridad competente, es claro que hay impactos que pueden presentarse, sobre los diferentes recursos ambientales, los cuales no están contemplados por la legislación o bien se presentan en niveles considerados como permitidos, pero que de igual forma son potencialmente perjudiciales.

La afectación que se puede causar al recurso suelo, a mediano y largo plazo, específicamente por la disposición de aguas residuales industriales derivadas del proceso de perforación, es un factor importante, que está tomando mayor peso en el otorgamiento de las licencias. Estas aguas contienen componentes contaminantes, que son depositados en el suelo, lo que puede a futuro, alterar sus propiedades químicas, físicas y biológicas de manera puntual.

Este eventual daño puede ser significativo o irrelevante según las características de la zona sobre la cual se haga la disposición, sin embargo, en la actualidad no existe un procedimiento que permita la integración de herramientas tecnológicas que faciliten la toma de decisiones acertadas, y que además minimicen los impactos generados.

La presente investigación busca integrar dentro de los estudios ambientales que se presentan para el licenciamiento de actividades petroleras, un procedimiento que interrelacione diferentes criterios para seleccionar el área en la que se realizará la disposición de las aguas residuales industriales, derivadas de la perforación de pozos petroleros, la cual se propone sea incorporada como un factor de análisis en la zonificación ambiental, realizada éste tipo de estudio.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Uno de los recursos naturales que más recibe impactos por la actividad humana es el suelo, el cual es afectado por una gran cantidad de contaminantes entre los que se encuentran los excesos de fertilizantes en las actividades agrícolas, los desechos inorgánicos de las comunidades, y en general los residuos generados por industrias como la de hidrocarburos y la explotación minera.

En la industria de los hidrocarburos, es común la disposición de las aguas residuales derivadas de los lodos de perforación en sectores específicos generalmente aledaños a los pozos. A estos fluidos se les añaden aditivos para mejorar sus capacidades lubricantes y de estabilidad, logrando una mayor eficiencia en el proceso de perforación. Entre estos se encuentran montmorillonita sódica (o bentonita), atapulgita, goma xántica (XCD), poliacrilamidas (PHPA), hidroxietilCelulosa (HEC), lignosulfonatos, lignitos, surfactantes, almidones, carboximetil celulosa (CMC), celulosa polianiónica (PAC), poliacrilatos KCl, glicol, polímeros encapsuladores dextrinas, poliacrilaminas, supresores de hidratación, barita, hematita, carbonato de calcio, entre otros.

Estos fluidos son tratados por medio de procesos físicos y químicos para garantizar que la disposición se haga cumpliendo con la normatividad vigente, la cual exige una concentración máxima de los componentes activos de estos aditivos.

Sin embargo, es claro que aunque usualmente se cumplen los estándares exigidos y que existe un proceso riguroso de vigilancia y control por parte de las autoridades ambientales, con cada disposición de este tipo de material, el suelo recibe una carga de elementos contaminantes, que pueden causar un impacto acumulativo dependiendo del tipo de suelo sobre el que se hace la disposición.

### **2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Dentro de los estudios ambientales, aunque se cuenta con información temática no se realiza un análisis detallado de las áreas en donde se va a realizar la disposición de las aguas residuales industriales, éstas son definidas de acuerdo el sitio en donde se ubica la locación, sin tener en cuenta las características ambientales de la zona, que puedan limitar la afectación por ésta actividad. Sin embargo cada estudio cuenta con los elementos necesarios para la elaboración de un concepto técnico respecto a éste tema.



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Elaborar un procedimiento para la identificación de áreas menos afectadas por el vertimiento de aguas residuales industriales.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Revisar de acuerdo a la información secundaria, el proceso realizado para la disposición de aguas residuales industriales derivadas de la perforación de pozos petroleros.
- Identificar y describir la estructura y características del suelo que hacen parte del área de estudio.
- Simular el comportamiento del vertimiento en las unidades de suelo identificadas.
- Analizar y predecir el comportamiento del vertimiento mediante la aplicación de geoestadística.
- Realizar una valoración y ponderación de diferentes temáticas geográficas para determinar las áreas con menor grado de afectación.

## 4. JUSTIFICACIÓN

Para sustentar con suficiencia la relevancia del presente trabajo de grado, la justificación se ha enfocado desde varios componentes que son explicados seguidamente y que además se interrelacionan y complementan.

### **Importancia del sector hidrocarburos:**

La explotación de hidrocarburos es un sector estratégico para la economía nacional, día por día la tendencia del crecimiento se hace de manera sostenida, evidenciándose en que Ecopetrol, la estatal petrolera es la empresa más grande del país registrando utilidades netas de \$15,4 billones en el 2011. Es importante resaltar que este sector, contribuye a la mitad de las exportaciones, dos terceras partes de la inversión extranjera directa y lo más importante, es que contribuye de manera insustituible en la generación de recursos para inversión social y productiva.<sup>12</sup>

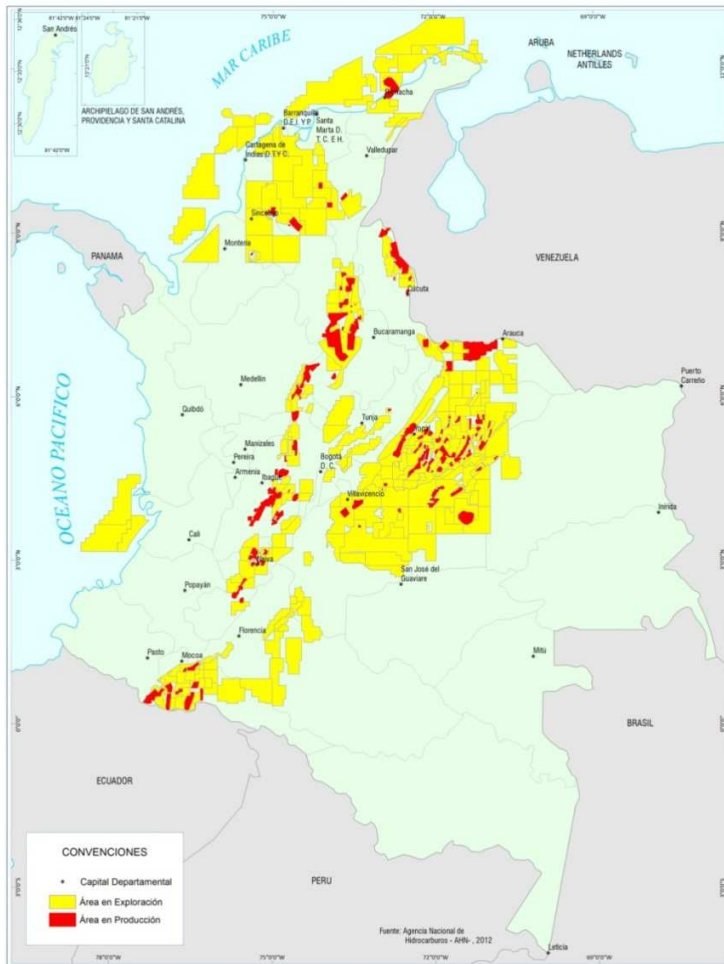
El actual plan de desarrollo define al sector minero-energético como una de las “locomotoras” para el crecimiento y la generación de empleo, lo que deriva en un impulso económico sostenido a través del Estado para ésta actividad productiva, el cual se ha venido traduciendo en la adjudicación de nuevas áreas para la exploración petrolera, que en total y de acuerdo con Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, 2012) alcanza las 81.072.737 ha en el área continental. (ver Figura 1).

Lo anteriormente expuesto hace que la atención sea orientada hoy más que nunca hacía la investigación, en especial desde la academia, para que este crecimiento industrial y auge económico, no vaya en contravía de la preservación de los recursos y desde luego la conservación del ambiente, es decir que es necesario explorar alternativas que ayuden a mitigar los impactos, colocando de manera balanceada los intereses económicos del país con la urgente necesidad también de garantizar la sostenibilidad a la actual y las futuras generaciones.

---

<sup>12</sup> Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014

Figura 1. Áreas asignadas para exploración y producción de hidrocarburos en Colombia



Fuente: Autores, 2012.

### **Impactos de la exploración de hidrocarburos sobre el recurso suelo:**

A pesar de los grandes beneficios económicos, es claro que el desarrollo de la actividad exploratoria trae consigo importantes impactos ambientales y sociales dentro del área donde se desarrollan; entre los impactos más frecuentemente asociados a esta actividad se encuentran la deforestación, el taponamiento de los cursos de agua para la construcción de terraplenes, carreteras, sitios de perforación y campamentos, el ruido y la emisión de material particulado, entre otros, lo cual altera los flujos naturales de agua, afectando los ecosistemas y los ritmos biológicos en las áreas cercanas.

De la misma manera se presentan impactos sobre las aguas, tanto superficiales como subterráneas, debido al vertimiento de aguas usadas en la actividad directamente sobre las fuentes hídricas, muchas veces con temperaturas que exceden los 40 ° C,

produciendo la muerte de la fauna íctica, además de la disminución del contenido de oxígeno, aporte de sólidos y de sustancias orgánicas e inorgánicas.<sup>13</sup>

En las aguas subterráneas también se presentan efectos asociados con el aumento de la salinidad, debido a la contaminación con las aguas de producción de petróleo de alto contenido salino, no obstante el presente trabajo, se enfoca en el impacto sobre el recurso suelo, como receptor de sustancias potencialmente contaminantes, específicamente las provenientes de las aguas residuales industriales derivadas del proceso de perforación. Esta contaminación es relevante por cuanto la misma se constituye como un peligro potencial para la salud, toda vez que el suelo actúa como paso intermedio entre la atmosfera y la hidrosfera con lo que una afectación a este recurso producirá eventualmente un desequilibrio en el recurso agua.<sup>14</sup>

Aunque se parte de la premisa de que estas aguas, una vez tratadas por procesos físicos y químicos, cumplen los parámetros determinados por la el Decreto 1594 de 1984, derogado por el Decreto 3930 de 2010, y que los estudios realizados al componente suelo, presentados en los estudios de impacto ambiental, requeridos para que el Ministerio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), viabilizando el proyecto a través de una licencia ambiental, es claro que toda adición de elementos o compuestos en concentraciones que alteren la composición originaria del suelo, son susceptibles de generar contaminación.<sup>15</sup>

En razón a lo anterior, es necesario contar con nuevas y mejores herramienta que permitan tomar decisiones acertadas sobre la disposición de estas sustancias en un tipo de suelo u otro, toda vez que dependiendo de las características del mismo, este va a absorber o mitigar en mayor o menor medida el impacto generado, ya que, el comportamiento de los contaminantes en el suelo “es función de sus características físicas y químicas (densidad, solubilidad, polaridad) de las características físicas, químicas y biológicas del suelo (permeabilidad, estructura, contenido de materia orgánica, microflora y microfauna), así como de factores climatológicos (temperatura, precipitación pluvial)”.<sup>16</sup>

### **Toma de decisiones con base en herramientas metodológicas, conceptuales y tecnológicas adecuadas:**

En la actualidad la industria y el estado, a nivel mundial, utilizan los Sistemas de Información geográfica (SIG) para resolver y prever los diferentes problemas que afectan la calidad de vida. Los SIG tienen aplicación en las diferentes actividades y sectores productivos y de conservación del ambiente, como por ejemplo la planificación de la utilización del suelo, el manejo de los recursos hídricos, el control y administración de los diferentes factores que afectan e intervienen en el medio natural, entre otros. Su aplicabilidad en la proyección o modelamiento de impactos ambientales, es sobresaliente,

---

13

[http://www.articulo.org/articulo/11698/tratamiento\\_de\\_los\\_residuos\\_derivados\\_de\\_\\_\\_la\\_extraccion\\_de\\_los\\_\\_hidrocarburos\\_gasto\\_o\\_inversion.html](http://www.articulo.org/articulo/11698/tratamiento_de_los_residuos_derivados_de___la_extraccion_de_los__hidrocarburos_gasto_o_inversion.html)

<sup>14</sup> Extracción de hidrocarburos en suelos contaminados mediante el acoplamiento del lavado de suelos implementando un sistema de columna. XVI verano de la investigación científica, 82, 2006

<sup>15</sup> Contaminación y salud del suelo

<sup>16</sup> Principios básicos de contaminación ambiental, 2003

ya que constituyen una herramienta eficaz para la prevención de riesgos de diversos tipos (amenazas volcánicas, inundaciones, sismos, avalanchas, depósito de materiales peligrosos, contaminación de suelos, etc.).

En sintonía con lo anterior, el MADS en el año 2010 mediante la resolución 1503, estableció la Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales, a través de la cual se expresan los requisitos necesarios y parámetros definidos para su presentación, con el fin de cumplir los propósitos, objetivos y políticas de calidad de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLAS) en los procesos de evaluación y seguimiento ambiental. En esta se exige el uso de los SIG, con objeto de garantizar una gestión completa de datos geográficos referenciados, así como el cumplimiento de los estándares vigentes para obtención, procesamiento y presentación de información de campo establecidos por otras entidades como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Consecuente con lo anterior, la investigación planteada precisamente permite materializar las potencialidades de las herramientas informáticas para modelar y espacializar los análisis efectuados, lo que sin duda permite ir más allá de lo solicitado por las autoridades, y a su vez propiciar la toma de decisiones con menor incertidumbre, que para este caso se espera se traduzcan en áreas en donde se cause la menor afectación posible al ambiente.

#### **Selección de áreas representativas para la elaboración del estudio:**

Como se observa, en la Figura 1, en gran parte del país hay actividad petrolera, no obstante es necesario precisar los sitios donde se está desarrollando este proceso de manera más intensiva. El mayor aporte a la producción nacional lo realizan los llanos orientales, donde se concentra aproximadamente el 66% de la producción nacional (425.231 barriles por día-BPD) y en segundo lugar, el Valle Medio del río Magdalena con una producción inferior de 98.687 BPD, que representa aproximadamente el 15% de la producción nacional (ver Tabla 1).

Con base en esta información de referencia se justifica además de la investigación, la zona de trabajo escogida, ya que corresponde a la Orinoquía Colombiana, área que está soportando buena parte del peso de los impactos negativos. por lo que se toma la decisión de trabajar con los datos del área de Perforación Exploratoria Llanos 58, ubicada en el municipio de Puerto López, departamento del Meta.

Tabla 1. Producción por cuenca y su participación en la producción total nacional

<b>CUENCA</b>	<b>P.C. (BPD)</b>	<b>P.P.N. (%)</b>
Caguán-Putumayo	24.000	3,75%
Catatumbo	3.283	0,51%
Cordillera Oriental	79	0,01%
Llanos Orientales	425.231	66,45%
Valle Inferior del Magdalena	458	0,07%

<b>CUENCA</b>	<b>P.C. (BPD)</b>	<b>P.P.N. (%)</b>
Valle Medio del Magdalena	98.687	15,42%
Valle Superior del Magdalena	88.149	13,78%
<b>Total</b>	<b>639.887</b>	<b>100%</b>

*Fuente:* <http://www.oilproduction.net/cms/files/estadisticaspcp.pdf>

## MARCO DE REFERENCIA

### 4.1 MARCO TEÓRICO

El manejo inadecuado de los materiales y residuos peligrosos ha generado a escala mundial, un problema de contaminación de suelos, aire y agua. Entre las más severas contaminaciones se destacan las que se producen a causa de la extracción y el manejo del petróleo en todos los países productores de hidrocarburos. En Colombia, el transporte de crudo y sus derivados se ha visto afectado durante los últimos 18 años, por un permanente ataque violento contra los oleoductos e instalaciones petroleras. Una de las mayores preocupaciones de la contaminación con hidrocarburos, se presenta en el suelo, ya que estos impiden el intercambio gaseoso con la atmósfera, iniciando una serie de procesos físico-químicos simultáneos como evaporación y penetración, que según el tipo de hidrocarburo, temperatura, humedad, textura del suelo y cantidad vertida pueden ser más o menos lentos, ocasionando una mayor toxicidad, además de tener una moderada, alta o extrema salinidad, haciendo que el tratamiento que se pueda realizar sea ineficiente.<sup>17</sup>

#### 4.1.1 Los suelos en Colombia

Los suelos, se forman en la superficie de la corteza terrestre donde se desarrollan las plantas y toda la diversidad de seres vivos, es un sistema abierto y complejo, sus características y propiedades se generan por la acción de agentes climáticos que actúan sobre el material geológico; también acondicionados por el relieve y los cuerpos hídricos que los definen por espacio de tiempo.

Para definir los suelos en Colombia se debe realizar una relación de los elementos biofísicos que conforman las regiones naturales, su ubicación geográfica, se hace necesario establecer esta delimitación natural, para su estudio y clasificación sea más clara. "Por ejemplo, los suelos de la Orinoquía, -altillanura- son de alto grado evolutivo. Poseen características asociadas con procesos de mayor alteración, lo cual genera menos aporte de elementos requeridos por las plantas y mayor dependencia nutritiva de su fracción orgánica, son suelos de ciclo largo donde predominan los óxidos de hierro y aluminio. En cambio, las regiones de la Cordillera Andina tienen condiciones diferentes, muchas zonas han recibido aportes de cenizas volcánicas y por su ubicación en zonas de pendiente, presentan procesos erosivos y movimientos en masa, lo que afecta su estabilidad y desarrollo evolutivo. Por esta razón se consideran suelos más jóvenes y menos alterados que los de otras regiones como la Orinoquía o la Amazonía, son de ciclo corto, con gran influencia de los materiales orgánicos"<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. NOVA - PUBLICACIÓN CIENTÍFICA, 2006.

<sup>18</sup> Los Suelos de Colombia. Bogotá: 1998

En Colombia se utiliza el Sistema de Clasificación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica,<sup>19</sup> el cual agrupa los suelos en 12 clases conocidos como Orden.

En Colombia los suelos están distribuidos de la siguiente manera, en la zona periglacial se encuentra la región de la alta montaña a unos 4000 msnm, con una formación frecuente de agujas de hielo, que se generan al amanecer y se derriten durante el día. Cuando se constituyen aumentan el volumen del interior del suelo, lo cual destruye y desgarran el suelo. Se genera un manto de gelifluxión cuando se arrastra microagregados por la destrucción del suelo, que se transporta fácilmente el cual desestabiliza las vertientes.

En el área de la región andina sobresalen zonas dominadas por la influencia de cenizas volcánicas. Se presentan acumulaciones de fragmentos asociados a la actividad volcánica, también hay presencia de suelos denominados Andosoles o Andisoles. Se generan capas de acumulación de materiales húmicos asociadas a productos de alteración de las cenizas alófanas. Los suelos más relevantes del país son los que son resultado de la alteración mineral que reaccionan con los compuestos producidos por la descomposición de la materia orgánica, compuestos húmicos, para formar un complejo de adsorción orgánico – mineral que se acumula, originando horizontes oscuros. Estos suelos se presentan en Risaralda, Quindío, Caldas y otras regiones productoras de café.

Otros tipos de suelos, que contrastan con los mencionados en cuanto a su morfología y características físicas, químicas, mineralógicas y biológicas, corresponden a los localizados en la Amazonía y parte de la Orinoquía, altillanura colombiana. Un 80% aproximadamente de suelos Ultisoles y Oxisoles, hacen referencia al pasaje de lomerío de la Amazonía y a la altillanura de la Orinoquía. Son suelos de alta evolución, lo cual está relacionado por su clima húmedo y muy húmedo, cálidos en la Amazonía con una marcada estacionalidad de la precipitación en la Orinoquía. Estas últimas condiciones, aunadas a la limitada presencia de minerales alterables en sus materiales parentales y al avanzado tiempo de evolución, hacen de ellos los de mayor grado de alteración en el país. Las condiciones ambientales, en especial la precipitación, determinan ecosistemas de selva húmeda en la Amazonía y sabanas tropicales en la Orinoquía. Ello está estrechamente vinculado con la importancia de la parte orgánica en su fertilidad; el mayor aporte de biomasa en condiciones selváticas y el mucho menor en las sabanas.

También se presentan en esta zona áreas correspondientes a las arenas blancas, producto de alteración de las rocas del Escudo Guayanés, de gran interés. Cuando estas arenas están en condiciones de muy alta precipitación, asociado a un ambiente de reducción, el hierro forma compuestos solubles y se elimina. Como resultado del proceso van quedando capas remanentes de arena blanca, medio limitante asociado a su muy baja fertilidad. En estos casos los materiales orgánicos de la superficie migran y se acumulan en profundidad creando una zona compactada de material húmico, generalmente relacionada con un nivel freático alto que determina una vegetación limitada.

---

<sup>19</sup> [http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias\\_agronomicas/l200310221542evaluaciondesuelosclasificacion1.pdf](http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_agronomicas/l200310221542evaluaciondesuelosclasificacion1.pdf)



En las zonas de sabanas de la altillanura, se manifiestan otras condiciones. El clima estacional es muy marcado y obra sobre sedimentos que datan del final del Terciario y comienzos del Cuaternario, es decir del Pleistoceno. La altillanura tiene diferentes grados de disección, suelos rojos y amarillentos, su drástico clima genera sabanas naturales con escasa biomasa, promedios generales estimados de 30 toneladas hectárea/año, mientras que el bosque húmedo de la Amazonía puede llegar a tener 10 veces más. Se genera una mínima capa vegetal, debajo de la cual se encuentran sedimentos considerablemente alterados por la estacionalidad imperante, en largos períodos de tiempo. El clima ha sufrido variaciones durante el Cuaternario, lo que genera, por ejemplo, una serie de corazas y materiales petroféricos.

Las zonas de los departamentos de Casanare y Arauca, comúnmente referidas a la Orinoquía inundable, se desarrollan sobre sedimentos cuaternarios, inundaciones variables pero marcadas, procesos de formación de compuestos ferrosos que originan coloraciones grises en sus suelos; en consecuencia, constituyen medios con características totalmente diferentes a las comentadas previamente. Ello es más notorio si se consideran los recubrimientos eólicos en gran parte de este territorio. La Región del Caribe contrasta, debido a sus condiciones climáticas, a los materiales a partir de los cuales se forman los suelos y a su vegetación. En ella se encuentran variados tipos de suelos asociados a la presencia de arcillas expandibles, Vertisoles, acumulación de sales y sodio, Aridisoles, en amplias zonas, especialmente de la Guajira, y al desarrollo de suelos con características muy favorables para la producción agrícola y ganadera, Mollisoles.

En algunas áreas se presentan sabanas naturales, como en el departamento de Cesar, pero de condiciones diferentes a las de la Orinoquía. La Sierra Nevada de Santa Marta se excluye de esto debido a su naturaleza diferente y condiciones ecológicas y ambientales propias.

En la planicie caribeña los suelos se desarrollan de materiales sedimentarios del Terciario o Cuaternario que comprenden, grosso modo, dos tendencias generales: suelos con un horizonte adecuado para el manejo agrícola y de gran productividad, que constituye los Mollisoles o, por otra parte, integrados por un material arcilloso muy activo de tipo montmorillonita. Se conocen como suelos expansivos, dado que sufren procesos de expansión y contracción. Éstos, al estar en clima estacional generan grandes grietas por donde migra el material del suelo, hacia abajo y hacia arriba, son los suelos denominados Vertisoles que generan constante inestabilidad en las obras civiles efectuadas, tal como ocurre en trechos de la carretera hacia Tolú, donde su desestabilización es frecuente.

#### **4.1.2 Los hidrocarburos y su presencia en Colombia**

¿Qué son los hidrocarburos? son recursos naturales que se encuentran en forma líquida o gaseosa debajo de la tierra; cuando se presentan en estado líquido se llaman petróleo y en estado gaseoso se llama gas.

#### 4.1.2.1 Historia del petróleo en Colombia

La presencia del petróleo en Colombia se remonta desde mucho antes de lo que se considera como el inicio de la industria del petróleo en el mundo. Tal fecha es aceptada como la perforación del pozo del Coronel Drake en Titusville, condado de Crawford, Pensilvania, a mediados del siglo XIX. El primer reporte que se conoce de la presencia de Petróleo data de la época de la conquista, lo realizó el fundador de Santa Fé de Bogotá, Gonzalo Jiménez de Quesada, como “oro negro” en los afloramientos de petróleo del Valle Medio del río Magdalena.

Antes del XVI; los indígenas utilizaban el petróleo para calafatear sus embarcaciones, prender sus hornos, y aún con fines medicinales, como fortalecer las piernas y controlar el cansancio. Para finales del siglo XIX, en el año 1883, se perforó el primer pozo de petróleo Tubara, cerca de Barranquilla, por dos líderes en exploración: Manuel María Palacio y Diego López, asesorados por el geólogo Luis Stiffler, que perforaron un pozo que llegó a producir 50 barriles por día.

En esta misma en el año de 1909, se construyó y se puso en marcha, la primera refinería, Cartagena OilRefining Co., para procesar crudo importado y con una capacidad de 400 barriles por día.<sup>20</sup> Primeras concesiones. En 1905 inicia en Colombia sus primeros contratos de concesión, la concesión de mares, llamada así porque fue firmada con un particular, Roberto De Mares, quien inició la extracción de petróleo en una gran extensión de terreno al sur de lo que hoy es el centro urbano de Barrancabermeja en el departamento de Santander. La concesión barco: firmada con el general Virgilio Barco y localizada en la región del Catatumbo, en el departamento de Norte de Santander.

Esa modalidad de concesión consistía básicamente en que el Estado cedía a particulares determinadas áreas de territorio para que los concesionarios adelantaran trabajos de exploración. A cambio se acordaba que recibieran unas regalías sobre la producción que obtuvieran, que oscilaban entre 7 y 14%. La Concesión de Mares pasó después a ser propiedad de la Tropical Oil Company. En 1918 se descubrieron los primeros yacimientos bautizados como la Ciralninfantas, con reservas recuperables cercanas a 800 millones de barriles de petróleo y que aún produce algo de crudo.<sup>21</sup>

Los recursos naturales, suelo y subsuelo son propiedad del estado. Sólo algunos casos, protegidos por Cédulas Reales expedidas por la Corona Española, están exentas de esta reglamentación, por esta razón solo el estado puede autorizar contratos de explotación de recursos minerales.

El primer contrato adjudicado se realizó a finales del siglo XIX, al autor de la famosa novela La María, Jorge Isaacs, quien en busca de carbón, descubrió petróleo. Para el año 1924 se habían perforado 17 pozos productores en el Campo Infantas. La actividad petrolera en el país se incrementó considerablemente y trajo como consecuencia el descubrimiento de campos como Casabe, Velásquez, Tibú, Llanito, entre otros.

---

<sup>20</sup> Asociación Colombiana de Ingenieros de Petróleos, [http://www.alip.org/docs/Historias/breve\\_historia\\_petrolera\\_colombia.pdf](http://www.alip.org/docs/Historias/breve_historia_petrolera_colombia.pdf)

<sup>21</sup> <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=532&conID=76464>

Dentro de las características de los contratos de concesión se encontraba que se tenía una duración de 50 años, al término de los cuales, todos los bienes e instalaciones del concesionario revertían al Estado; los gastos e inversiones eran por cuenta del concesionario, y en contraprestación el país recibía una regalía correspondiente a aproximadamente de 11 % de la producción. Como consecuencia de esta reversión, el 25 de agosto de 1951, el estado creó la empresa colombiana de Petróleos, ECOPEPETROL; para hacerse cargo de estas instalaciones.

Contrato de Asociación: El 22 de septiembre de 1969, se promulgó la ley 20, que sustituía el régimen de Concesiones vigente que sirvió de base para que el Contrato de Asociación. A partir de 1970, todos los Contratos firmados por ECOPEPETROL, sobre las áreas asignadas a la empresa por el Ministerio de Minas y Petróleos, eran Contratos de Asociación, amparados por la Ley 20.

Los términos de estos contratos se desarrollaban en un tiempo de 27 años, prorrogables, (5 años en el periodo de exploración, y 22 años en la etapa de producción), el valor de la regalía se aumentó del 11.5% a un 20%, distribución de la producción (20% regalías, 40% asociado, y 40% ECOPEPETROL), y el manejo del contrato en una administración conjunta entre el Asociado y ECOPEPETROL. Estas condiciones llevaron a un desarrollo considerable de la actividad, con un resultado de 73 pozos perforados en el año 1988 y al descubrimiento de campos gigantes como Caño Limón en 1983 y el de Cusiana - Cupiagua con menos de 10 años de diferencia y de los bienvenidos campos de gas en la plataforma del mar Caribe.

Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH: En el año 2003 se realizó un cambio trascendental en la estructura petrolífera de Colombia con la creación de la Agencia Nacional de Hidrocarburos –ANH- (Decreto 1760 de 2003). Con este decreto se transformó a ECOPEPETROL en una empresa comercial del Estado con dedicación exclusiva a las actividades integradas de la industria petrolera (exploración, perforación, producción, transporte, refinación y comercialización), lo que le permitiría competir en igualdad de condiciones con otras compañías del sector, este cambio, se realiza debido al bajo desarrollo de la actividad en 1993, con solo 8 pozos explorados.

Las condiciones económicas de las nuevas formas de contratos, regresaban a Colombia a su posición como uno de países más atractivos del mundo, tanto para los inversionistas, como para el país. Las zonas se adjudicaban con participación libre, y en rondas en que los interesados pueden ofrecer las condiciones que les sean más convenientes.

En la actualidad el petróleo se constituye en el motor de la economía Colombia, debido a que es el principal generador de renta, por encima del café, y por ser la fuente principal de rentas para las regiones, bien a título de regalías por su explotación o por contribuciones fiscales en las distintas fases de su proceso.<sup>22</sup>

El potencial de hidrocarburos está localizado en 18 cuencas sedimentarias, que cubren alrededor de 1.036.450 km<sup>2</sup>, a partir de las actividades de exploración y producción están clasificadas en cuencas con producción (valle superior, medio e inferior del Magdalena, Llanos orientales, Putumayo, Catatumbo y la Guajira), con un buen conocimiento

---

<sup>22</sup> La Industria Petrolera en Colombia. Revista Credencial Historia, Edición 151, 2002.

geológico, geofísico y técnico. También se encuentran las cuencas sin producción (Cagúan, Vaupes, Amazonas, Cesar, Ranchería, Cordillera Oriental, Cauca-Patía, Urabá, Choco, Pacífico, Tumaco, Sinú-San Jacinto y Cayos), áreas de menor interés en las cuales no han descubierto hidrocarburos a nivel comercial.<sup>23</sup>

Hoy por hoy según la Asociación Colombiana del Petróleo en informe estadístico petrolero de Abril de 2011, establece que Colombia cuenta con un nivel de producción promedio diario mensual de 900 miles BPDC (barriles por día calendario), distribuida en: 15 campos que producen de 0-10 BPDC, 73 campos de 10-100 BPDC, 120 campos de 100-1000 BPDC, 84 campos de 1000-10000 BPDC, 12 campos de 10000-20000 BPDC, 4 campos de 20000-40000 BPDC, y 3 campos de más de 40000 BPDC. El mismo informe indica que la cuenca de los llanos Orientales constituye el 72% de producción de 2011, el restante corresponde a un 14% en la cuenca del Magdalena, un 9% en el valle superior del Magdalena, un 4% en Putumayo y un 1% en el Catatumbo.<sup>24</sup>

En relación al gas natural, de acuerdo con la ANH, a 31 de Diciembre de 2008 el país contaba con reservas de gas natural de 6.385 GPC (giga pies cúbicos), de las cuales 4.383 GPC, corresponden a reservas probadas, disponibles para uso y 2.000 GPC a reservas no probadas.

Los principales campos de explotación se encuentran en la región de los Llanos Orientales y en la Guajira, adicionalmente se encuentran otros en las cuencas del Valle Medio y Valle Superior, así como en Catatumbo. De los 96 TPC (trillones de pies cúbicos) de gas natural que corresponden a las reservas potenciales, el 56% (alrededor de 54 TPC) están ubicados entre las cuencas de los Llanos Orientales, Valles Superior, Medio e Inferior del Magdalena, del Putumayo y la Guajira. Los 42 TPC restantes se distribuyen en las cuencas que no se encuentran actualmente en producción.<sup>25</sup>

Es así como la infraestructura petrolera de la Orinoquía (72% producción de 2011), comprende alrededor de 1.500 pozos, 600 km de gasoductos con capacidad de transportar cerca de 300 millones de pies cúbicos por día y 1500 km de oleoductos con capacidad de transportar 800.000 barriles de petróleo por día y más de 30 estaciones de bombeo; organizados a más de 120 campos de producción, asociados a su vez a 54 bloques de tierras. Infraestructura donde se desarrollan como actividades típicas la exploración, perforación, producción y transporte, las cuales generan modificaciones al medio relacionadas con los recursos hídricos, tales como la afectación de corrientes de agua, deterioro de la calidad del recurso (contaminación de aguas por aceites, lodos y desechos sólidos), perturbación del cauce de los ríos, entre otras.<sup>26</sup>

Aunque el desarrollo de la actividad petrolera es uno de los renglones más importantes de la industria Colombiana, siendo un país petrolero de tamaño mediano, de acuerdo a los estándares de América latina, ubicándose en el quinto lugar después de Venezuela, México, Brasil y Argentina. En comparación con otros países en Colombia se han descubierto en 162 campos cerca de 8 mil barriles, cuando en México un solo campo,

---

<sup>23</sup> La cadena del Gas en Colombia. Virtual Pro ISSN 1900-6241 N105.

<sup>24</sup> <http://acp.com.co/assets/documents/asuntos%20economicos/IEP.xls>

<sup>25</sup> La cadena del Gas en Colombia. Virtual Pro ISSN 1900-6241 N105.

<sup>26</sup> Planeación ambiental del sector hidrocarburos para la conservación de la biodiversidad en los llanos de Colombia. Bogotá. D.C.: 2007.

Cantarell, tiene aproximadamente 12 mil millones, más de lo que se ha encontrado en Colombia en 90 años.

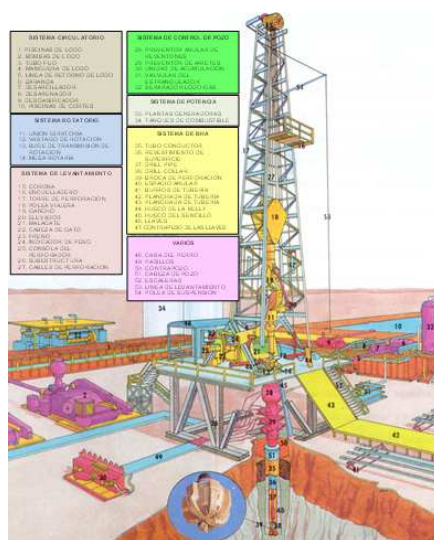
De acuerdo a los estudios contratados y realizados por la ANH, la región de la Orinoquía colombiana cuenta con reservas probables de aproximadamente 600 y 1.700 millones de barriles, repartidos en dos zonas caracterizadas en función de los hidrocarburos producidos: i) la zona del piedemonte; y ii) la zona de crudos pesados. La primera se caracteriza por la presencia de yacimientos de condensado y gas; la segunda por la presencia de yacimientos con grados API cercanos a los 20°.

### 4.1.3 Vertimientos generados en actividades de exploración y producción

A pesar, que los hidrocarburos se han destacado a lo largo de la historia por promover el crecimiento económico y la inversión extranjera directa en el país, las áreas donde se desarrolla esa actividad presentan un mayor conflicto social y político, de mayor inseguridad ambiental y de mayor pobreza, a pesar de las sucesivas bonanzas petroleras.<sup>27</sup>

Para el proceso de perforación es indispensable la utilización de lodos o fluidos de perforación en cuyo caso se utilizan lubricantes o lodos de perforación que son mezclas preparadas con gran cantidad de aditivos químicos. Algunas de las funciones de los fluidos de perforación son: Enfriar y lubricar la broca y la tubería de perforación, limpiar la broca, transportar (flotar) los recortes a la superficie y removerlos del fluido, proporcionar estabilidad a la formación perforada, prevenir la pérdida excesiva de fluido en formaciones permeables, evitar daños a las formaciones productivas y maximizar su producción, además de proporcionar integridad a la salud del personal.<sup>28</sup>

Figura 2. Esquema de perforación de pozos petroleros.



Fuente: Geoingeniería S.A.S, 2012

<sup>27</sup> Petrolero, seguridad ambiental y exploración petrolera marina en Colombia. Quito: Iconos, 2005.

<sup>28</sup> The Nature Conservancy e Instituto de Hidrología y Meteorología y EA, 24, 2009.

Los lodos o fluidos de perforación pueden ser de dos tipos: lodos base agua y lodos base aceite (principalmente diesel). La composición química precisa de los lodos varía de pozo a pozo, o aún dentro de un mismo pozo, pero los componentes más utilizados incluyen: arcillas, baritina y aditivos químicos. Muchos de los aditivos son altamente tóxicos y pueden incluir biocida, bactericidas, anticorrosivos, espesantes y sustancias químicas para controlar el pH. Los elementos principales que son añadidos al sistema en el proceso de perforación, tales como:

- Rompedores de emulsión: Empleados para facilitar la recuperación del petróleo, a menudo son una combinación compleja de compuestos aniónicos.
- Inhibidores de corrosión, Pueden ser aminas formadoras de películas solubles en agua.
- Inhibidores de parafinas, Utilizados con levantamiento artificial en áreas donde la deposición de parafina presenta un problema.
- Inhibidores de incrustación, Utilizados a menudo en áreas de alto corte de agua para impedir la deposición de costras de carbonatos y sulfatos.
- Bactericidas
- Removedores de oxígeno
- Elementos que minimizan los hidratos, generalmente metanol u glicol

Ahora bien, entre los productos de la perforación de un pozo, si se utilizan en promedio, 1.94 l/s de agua es emitido un promedio de 0.9 l/s de aguas residuales. Su concentración promedio de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) es de 49 mg/l, y de SST (Sólidos Suspendedos Totales) es de 564.6 mg/l, La eficiencia promedio de remoción de DBO, STT, grasas y aceites de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales provenientes de las actividades de perforación de pozos es del 37%, 27% y 36% respectivamente.<sup>29</sup>

Las aguas de perforación pueden tener concentraciones muy altas de cloro, sodio, azufre, metales pesados, fenoles, etc. Además, estas aguas pueden presentarse a muy altas temperaturas. Todos los pozos producen algo de agua, varía desde pequeñas cantidades hasta varias veces el volumen de petróleo en etapas posteriores de la vida del depósito, debido a la transmisibilidad y tasas de recogimiento que generan movimiento del fluido en el yacimiento y el cambio en los contactos de agua / petróleo. Durante la vida del pozo se producen volúmenes considerables de agua, por ejemplo en Ohio, en 1988 se produjeron 350,000 barriles de agua, En Louisiana 1.2 mil millones de barriles y 1.65 mil millones de barriles en Wyoming, todos en estados de Estados Unidos, país para el cual se estimó una producción total de 25 millones de barriles por día, que representan unos 10 mil millones de barriles por año.<sup>30</sup>

En Colombia para el año de 2008 el consumo de agua fueron 764.400 m<sup>3</sup> en operaciones de perforación exploratoria, 1.218.759 m<sup>3</sup> en pozos de desarrollo y 182.427 m<sup>3</sup> en operaciones de campo, estas últimas en etapas de producción. El total de agua

---

<sup>29</sup>

[http://economia.uniandes.edu.co/investigaciones\\_y\\_publicaciones/CEDE/Publicaciones/documentos\\_cede/2003/estudio\\_sobre\\_la\\_insercion\\_de\\_la\\_gestion\\_ambiental\\_en\\_las\\_politicas\\_sectoriales\\_caso\\_colombia](http://economia.uniandes.edu.co/investigaciones_y_publicaciones/CEDE/Publicaciones/documentos_cede/2003/estudio_sobre_la_insercion_de_la_gestion_ambiental_en_las_politicas_sectoriales_caso_colombia)

<sup>30</sup> Guía para la Disposición y tratamiento del agua producida, 2011.

consumida incluyendo transporte y sísmica fue de 2.256.629 m<sup>3</sup>.<sup>31</sup> De las aguas que acompañan la producción, la cantidad de agua para cumplir con los límites de refinería o de transporte llega hasta 0.5% BS&W (sedimentos de fondo y agua, no libres, contenidos en los hidrocarburos líquidos). Para lo cual, se instalan equipos para separar el agua y el petróleo, eliminar el agua y permitir que continúe la producción.

En el caso de los pozos de gas también producen agua, aunque en cantidades menores, debido a que el gas se comprime. Pueden preverse volúmenes de agua a una escala de 0.5 a 5 barriles por 1.000.000 millones de ft<sup>3</sup> de gas. Estas aguas generalmente son retiradas del gas en el sitio de emplazamiento del pozo, utilizando deshidratadores y luego se evaporan durante el ciclo de regeneración del equipo.<sup>32</sup>

En la fase de producción son generadas cantidades enormes de desechos tóxicos tanto en los sitios de los pozos como en las estaciones de separación, solamente en estas estaciones, son concebidas grandes cantidades de galones de desechos líquidos cada día, los cuales son trasladadas a piscinas de producción, formándose una mezcla llamada agua de producción. Estas aguas de producción contienen diferentes cantidades de sales como calcio, magnesio, sodio, y de gases disueltos como monóxido de carbono, petróleo (500-5000 ppm), dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel, zinc, benceno, naftalina, fenatrena, sólidos suspendidos que pueden contener trazas de metales pesados, entre otros posibles. Además la temperatura de estas aguas pueden alcanzar un rango entre 32 °C a 73 °C.<sup>33</sup>

#### 4.1.4 Sistema de manejo de aguas

El sistema de manejo de aguas en una plataforma se construye con el fin de manejar de forma adecuada los volúmenes de aguas lluvias y los procedentes del lavado de maquinaria, equipo y herramienta en el área del taladro durante las labores de perforación.

Para el manejo del volumen de agua procedente de la escorrentía se construyen cunetas perimetrales (ver Fotografía 1) excavadas en tierra o recubiertas en concreto o el uso de materiales prefabricados o de últimas tecnologías, cuya función es conducir el agua hasta un extremo de la plataforma y entregarla a un Skimmer (ver Fotografía 2 y 3), que corresponde a una estructura en concreto, metálica, plásticos de alta densidad u otros materiales diseñados para este fin, que cumplen la función de decantar o sedimentar el agua y de separar los residuos aceitosos para que el agua sea posteriormente entregada al terreno natural.

El agua procedente del área de operaciones es recolectada por cárcamos y cunetas que la conducirán a una caja en concreto, que corresponde a una estructura de almacenamiento donde el agua es bombeada a tanques australianos o directamente a las

---

<sup>31</sup>

[http://www.acp.com.co/assets/documents/desarrollo%20operaciones/ambiental/documentos/otros/recurso\\_hidrico\\_hidrocarburos2009.pdf](http://www.acp.com.co/assets/documents/desarrollo%20operaciones/ambiental/documentos/otros/recurso_hidrico_hidrocarburos2009.pdf)

<sup>32</sup> Asociación Regional de empresas de petróleo y gas natural en latinoamérica y el caribe, 1992.

<sup>33</sup> [http://www.inredh.org/archivos/documentos\\_ambiental/impactos\\_explotacion\\_petrolera\\_esp.pdf](http://www.inredh.org/archivos/documentos_ambiental/impactos_explotacion_petrolera_esp.pdf)

piscinas para su tratamiento y posterior vertimiento previo cumplimiento de los parámetros fisicoquímicos establecidos en la normatividad vigente y que son atendidos por las medidas de manejo de residuos líquidos industriales.

Fotografía 1. Cuneta perimetral en tierra.



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Fotografía 2. Caja en concreto para la instalación del Skimmer.



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.



Fotografía 3. Skimmer Metálico Típico.



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Los tanques australianos (ver Fotografía 4), son estructuras metálicas modulares que se arman directamente en el área y que pueden adecuarse con el volumen necesario de acuerdo a las condiciones del proyecto. Su función básica es almacenar el agua procedente del área del taladro para su tratamiento y disposición final.

Fotografía 4. Tanques Australianos.



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

#### 4.1.4.1 Zona de riego de las aguas residuales tratadas

Para la disposición de aguas residuales tratadas, se realiza un sistema de riego por aspersión sobre un área de la plataforma previamente definida y seleccionada de acuerdo al grado de infiltración de los materiales.

La disposición del agua en estos sitios cumplirá con los parámetros de vertimiento establecidos en el Decreto 1594 de 1984, a pesar que este se encuentra derogado.

#### 4.1.5 Lodos de perforación

Es una mezcla de un solvente (base) con aditivos o productos, que cumplen funciones físico-químicas específicas, de acuerdo a las necesidades operativas de una formación a perforar. En el lenguaje de campo, también es llamado Barro Lodo de Perforación, según la terminología más común en el lugar.

- Gases (Aire, N<sub>2</sub>) Se utiliza en Rocas duras y estables, Yacimientos agotados, Métodos de perforación bajo balance (Mayor ROP), pueden usarse para generar fluido aireado
- Fluidos libres de sólidos (agua, salmuera, Aceite)
- Fluidos de Perforación "Convencionales" En general consisten de un fluido base + sólidos

#### Funciones de los Fluidos

- Enfriar y lubricar la Broca y tubería de perforación.
- Limpiar de ripios el espacio anular mientras se perfora.
- Remover recortes del pozo y permitir su separación en superficie.
- Sellar formaciones permeables.
- Controlar la presión de la formación (Control del Pozo).
- Prevenir el derrumbe de la formación.
- Minimizar el daño a la formación productora de hidrocarburos.
- Permitir la toma de registros.
- Prevenir fatiga y corrosión de la tubería de perforación.
- Estabilizar formaciones reactivas (lutitas y arcillas) en el pozo.
- Resistir contaminantes (Anhidrita, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc.).
- Desarrollar todas las funciones sin peligro para el personal.
- 

#### Aditivos básicos de los fluidos

- Viscosificantes: Productos desarrollados para generar viscosidad o propiedades de suspensión.
- Adelgazantes o Defloculantes: Materiales desarrollados para afinar propiedades reológicas o reducir la viscosidad del lodo.
- Control de Filtración / Constructores de Revoque: Materiales desarrollados para controlar la pérdida de agua o invasión de filtrado del lodo hacia la formación a través del revoque.
- Inhibidores: Materiales desarrollados para estabilizar las paredes de formación, por inhibición iónica, encapsulación y sello. Ayudan en la sustentación de las paredes del pozo y en la separación de los sólidos en superficie.
- Control de pH (ácidos / álcalis): Materiales desarrollados para proveer iones oxidrilos que actúan como catalizadores.
- Agentes Densificantes: Materiales desarrollados para dar peso al fluido de perforación.
- Reductores de Dureza (remover iones Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>)

## Aditivos Especiales

- Bactericidas Materiales desarrollados para reducir la actividad bacterial con el fin de evitar la degradación y descomposición de los productos sensibles a la degradación, tales como los almidones, dextrinas y algunos polímeros.
- Lubricantes (sólidos o líquidos) Materiales desarrollados para dar lubricidad al igual que el petróleo, diesel o aceites minerales. Los lubricantes reducen el torque.
- Compuestos para liberar tubería atascada (“Spotting Agents”)
- Surfactantes Jabones desarrollados para cambiar la tensión superficial por absorción y mojabilidad de los sólidos de perforación y hacer que los mismos se mantengan inertes y sean fácilmente removibles en la superficie.
- Control de Corrosión Productos desarrollados para proteger la sarta de perforación, los revestimientos y el equipo superficial de la corrosión.
- Material de Pérdida de Circulación (LCM) y agentes puenteantes

### 4.1.6 Geoestadística

GEORGES MATHERON en 1962 fue el primero en usar éste término y su definición fue la siguiente: «Geoestadísticas son la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de los depósitos minerales (con todo lo que esto significa)» A partir de 1991: Geoestadística es el estudio de variables que fluctúan en el espacio o en el espacio y tiempo». <sup>34</sup>

Un análisis geoestadístico está compuesto por tres etapas:

- El análisis exploratorio de los datos En esta fase se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Sería una etapa de aplicación de la estadística. Se comprueba la consistencia de los datos, eliminándose aquellos que sean erróneos, y se identifican las distribuciones de las cuales provienen.
- El análisis estructural: Se estudia la continuidad espacial de la variable. En esta etapa se calcula el variograma experimental, o cualquier otra función que nos explique la variabilidad espacial, se ajusta a los datos un variograma teórico y se analiza e interpreta dicho ajuste al modelo paramétrico seleccionado.

Variograma: cada par de ubicaciones tiene una distancia única y suele haber varios pares de puntos. La diagramación de todos los pares rápidamente se vuelve imposible de administrar. En lugar de diagramar cada par, los pares se agrupan en bins de intervalo. Por ejemplo, calcule la semivarianza promedio de todos los pares de puntos que están a más de 40 metros de distancia pero a menos de 50 metros.

- Las predicciones (kriging o simulaciones): Estimaciones de la variable estudiada en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial

---

<sup>34</sup> Geostatistical Glossary & Multilingual Dictionary. 1991.

seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa, en los puntos muestrales, así como la conseguida indirectamente en forma de tendencias conocidas u observadas. También se pueden realizar simulaciones, teniendo en cuenta los patrones de continuidad espacial elegidos.

Al ser el semivariograma el promedio de todos los pares de semivarianzas para cada distancia de separación es dependiente del número total de datos y de la consistencia de los mismos. Es decir el semivariograma puede resultar erróneo cuando hay pocos datos o cuando en ellos existen valores extremos. Además al ser h un vector que implica dirección además de distancia puede haber anisotropía en la variación espacial de la variable, es decir un comportamiento diferente según la dirección elegida.<sup>35</sup>

Para interpretar el semivariograma hay que ajustar una función o modelo teórico que proporciona unos parámetros con los que describir la variación espacial de la variable y que después van a ser utilizados por el kriging.

- Mapas de predicción y SIG: En la naturaleza, las variables físicas y biológicas muestran generalmente una importante heterogeneidad espacial. Ello no quiere decir que sea imposible encontrar un patrón de distribución. Al contrario, en la mayoría de los casos, existe una continuidad espacial entre las diferentes localizaciones. En este sentido los mapas de predicción, a partir de valores puntuales, permiten determinar valores en donde no se han recolectado muestras.

El desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) y su integración con la geoestadística ha dado un nuevo impulso al análisis de la distribución espacial aplicada a las ciencias ambientales. Aunque los SIG han permitido a los investigadores la manipulación de datos espaciales, la caracterización y la modelización de los patrones de distribución es poco factible si no se cuenta con un programa estadístico que se complemente adecuadamente con las herramientas SIG, en este contexto la geoestadística es el instrumento fundamental para este tipo de investigaciones.<sup>36</sup>

#### 4.1.7 Modelo de Simulación Hydrus

El programa HYDRUS, es un programa para simular flujo unidimensional, transporte de un sólo soluto y movimiento de calor, en un medio variablemente saturado. Hydrus-2D permite realizar el análisis del flujo de agua y transporte de solutos en medios porosos no saturados en dos dimensiones. Ambas versiones modelan el flujo del agua usando la ecuación de Richards, y los solutos y el movimiento de calor usando ecuaciones de transporte convección y dispersión. El programa también considera histéresis en las propiedades hidráulicas del suelo no saturado. En la versión unidimensional el flujo puede ser considerado en dirección vertical, horizontal o inclinado. Aunque se simula también el movimiento de calor, el programa asume que el proceso del flujo de agua no se afecta por los cambios de la temperatura en el sistema.

---

<sup>35</sup> Aplicación de la Geoestadística al estudio de la Variabilidad Espacial del ozono en los veranos de la comunidad de Madrid, 2011.

<sup>36</sup> Aplicación de la Geoestadística en las ciencias ambientales, 2004.

El programa permite histéresis tanto en la retención suelo-agua como en las funciones de conductividad hidráulica. Permite escalar las funciones hidráulicas de suelo no saturado para tener en cuenta los cambios continuos en las propiedades hidráulicas. Además, considera condiciones alternativas de drenaje de bordes. Los antecedentes de este programa son el código de WORM (van Genuchten, 1987),c versiones anteriores de HYDRUS (Kooly van Genuchten,1991), SWM\_II (Vogel,1987) y SWMS\_2D (Simunek y otros, 1994). El código de HYDRUS asume flujo unidimensional en un suelo variablemente saturado bajo condiciones isotérmicas. Permite además, el uso de tres modelos analíticos diferentes para propiedades hidráulicas de suelos (Brooksy Corey, 1966; van Genuchten, 1980; y Vogely Cislerová, 1988), también permite que las propiedades hidráulicas se puedan leer directamente de tablas. Implementa las funciones de van Genuchten (1980) que usan la distribución estadística tamaño de poro del modelo de Mualem (1976) para obtener una ecuación de predicción para la función de conductividad hidráulica en términos de los parámetros de retención de agua del suelo.

Utiliza un proceso para escalar las funciones para simplificar la descripción de la variabilidad en las propiedades hidráulicas no saturadas de los perfiles de suelo heterogéneos. Asume que la variabilidad hidráulica en cierto punto del perfil del suelo puede ser aproximada por un conjunto de transformaciones lineales que relacionan las características hidráulicas individuales con las características de referencia. La técnica se basa en el concepto introducido por Millery Miller (1956) para medios porosos que difiere solamente en la escala de la geometría. HYDRUS implementados tipos de condiciones para describir las interacciones sistema independientes en los bordes de la región de flujo. Estas, son condiciones de borde de carga de presión especificada y las condiciones de borde de flujo específico. El software fue desarrollado por J. Simunek, K. Huang, M. Sejna, y M. Th. Van Genuchten del U.S. Salinity Laboratory, USDA/ARS, Riverside, California.

#### **4.1.8 Sistemas de Información Geográfica**

El término SIG procede del acrónimo de Sistema de Información Geográfica (en inglés GIS, Geographic Information System).

Es una tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos (hardware) programados adecuadamente (software) que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar **análisis** complejos con éstos siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico (personal).

##### **4.1.8.1 Utilidades de un SIG**

Entre sus múltiples utilidades, sobresalen:

- Obtener información instantánea y actualizada.
- Apoyo en la fase de diagnóstico.
- Facilidad en el análisis de la información.
- Agilidad en la manipulación de datos.
- Facilidad en las consultas.

- Mayor nivel de procesamiento, integración y calidad de datos.
- Información detallada, confiable y **geo-referenciada**.
- Eficiencia en las respuestas (rápidas, oportunas y confiables).
- Mayor velocidad de acceso a información tanto espacial, como no espacial.
- Respaldo eficiente al proceso de **toma de decisiones**.

## 4.2 MARCO LEGAL

En el presente numeral se hace mención a la legislación relacionada con el recurso suelo en Colombia, vertimientos de aguas residuales, así como una norma extranjera, (Louisiana 29-B) que se constituye en un referente para la industria.

- **Ley 99 de 1993.** Mediante esta Ley se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables.
- **Decreto-Ley 2811 de 1974** Mediante esta norma se dictó el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, el cual constituye uno de los pilares de la Política Ambiental en Colombia. En éste se establecen muchas de las normas y regulaciones aún vigentes en el país relacionadas con el medio ambiente y específicamente con el recurso suelo el cual se trata de manera general en la parte VII, correspondiente a los artículos 178 a 191 del mismo.
- Ley 9 de 1979. **Código Sanitario Nacional. Entre sus disposiciones prohíbe descargar, sin autorización, los residuos, basuras y desperdicios y, en general, de desechos que deterioren los suelos o causen daño o molestia a individuos o núcleos humanos.**  
De igual forma menciona que para la disposición o procesamiento final de las basuras se utilizarán, preferiblemente, los medios que permitan:  
*Evitar el deterioro del ambiente y de la salud humana;*  
*Reutilizar sus componentes;*  
*Producir nuevos bienes;*  
*Restaurar o mejorar los suelos.*
- **Decreto 4741 de 2005.** El cual reglamenta parcialmente el manejo de residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión ambiental. Este clasifica los diferentes tipos de residuos peligrosos e impone límites para la concentración en varios de estos (ver Tabla 2).

Tabla 2. Límites de concentración de residuos peligrosos

SUSTANCIA PELIGROSA	NIVEL MÁXIMO EN LIXIVIADOS - (mg/l) SEGÚN Dec.4741/05	LIMITE SEGÚN LOUISSIANA29B/99 EN CORTES DE PERFORACIÓN
Arsénico	5	10 p.p.m.
Bario	100	20.000 p.p.m.
Cadmio	1	10 p.p.m
Cromo <sup>+5</sup>	5	500 p.p.m
Plomo	5	500 p.p.m
Mercurio	0	10 p.p.m
Selenio	0	10 p.p.m
Plata	5	200 p.p.m
Zinc	N/A	500 p.p.m
Contenido de Grasas y Aceites	N/A	< 1% en peso
Conductividad eléctrica	N/A	4 mmhos/cm
Relación de absorción de Sodio (RAS)	N/A	< 12
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	N/A	< 15%
pH	N/A	4115800,00%
Contenido de Humedad	N/A	< 50% en peso

Fuente: Geoingeniería, 2011

- **Decreto 2820 de 2010.** Esta norma reglamenta lo relacionado con licencias ambientales, en cuanto a competencias alcances, requisitos y demás. Deroga el Decreto 1220 de 2005.
- **Decreto 3930 De 2010:** Plan De Gestión Del Riesgo Para El Manejo De Vertimientos: En este documento se presentan los términos de Referencia del Plan de Gestión de Riesgo para el manejo de Vertimientos, en cumplimiento de lo establecido en el Decreto 3930 de 2010. Estos términos son el marco de referencia para la elaboración del Plan, el cual debe ser adaptado a la magnitud y otras particularidades del proyecto, así como a las características ambientales y de riesgos regionales y locales en donde se pretende desarrollar.
- Para elaborar el Plan de Gestión del Riesgo, el interesado deberá consultar las diferentes Guías Ambientales que adopte el MAVDT, y deberá tener en cuenta las disposiciones legales establecidas aplicables de forma general y específica para la actividad que desarrolla el generador de los vertimientos, así como la establecida por el Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres.
- **Resolución 1503 De 2010 (MAVDT):** Mediante esta resolución se aprueba la METODOLOGÍA GENERAL PARA LA PRESENTACIÓN DE ESTUDIOS AMBIENTALES. En esta se presentan los parámetros establecidos por los

diferentes institutos y entidades oficiales que tienen por función la generación, administración y análisis de información y se incluyen además las especificaciones para su manejo, contempladas en un modelo de almacenamiento geográfico – geodatabase corporativa del Sistema Nacional de Información de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (SNIAVDT) del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, ahora Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible.

La metodología contiene fuentes de información que deben utilizarse en la elaboración de los diferentes estudios ambientales para el proceso de licenciamiento y especificaciones técnicas para la caracterización de los medios abiótico, biótico y socioeconómico. Así mismo se indican los lineamientos para realizar la zonificación ambiental y el establecimiento de zonas de manejo, la identificación y valoración de impactos ambientales, el diseño de medidas de manejo ambiental, la elaboración de los planes de seguimiento y monitoreo y la formulación del plan de contingencia. Esta metodología aplica a estudios tales como el diagnóstico ambiental de alternativas, estudio de impacto ambiental y plan de manejo ambiental.

- **Norma Louisiana 29-B.** Esta norma fue emitida por el departamento de recursos naturales del estado de Louisiana -EEUU, a través de la oficina de conservación la cual está encargada de regular la explotación y producción de petróleo, gas y demás hidrocarburos, así como la protección a la salud pública y al medio ambiente, causados por los desechos generados por la industria del petróleo. Esta norma es ampliamente usada como referencia para evaluar el límite de contaminación por desechos causados en las actividades exploratorias y de producción para esta industria en nuestro País.
- **Manual técnico para la ejecución de análisis de riesgos para sitios de distribución de derivados de hidrocarburos:** Este documento establece un procedimiento que permite manejar una situación de contaminación por hidrocarburos basado en un análisis de riesgos. El proceso de análisis de riesgos se enfoca en el escenario específico de cada sitio, sin aplicar niveles de limpieza establecidos de antemano de forma general, teniendo en cuenta los diferentes usos del terreno (actuales o futuros), de la población que esté ubicada o pueda ubicarse en el sitio en el futuro, de la geología, la hidrografía y de la geografía específica del sitio.

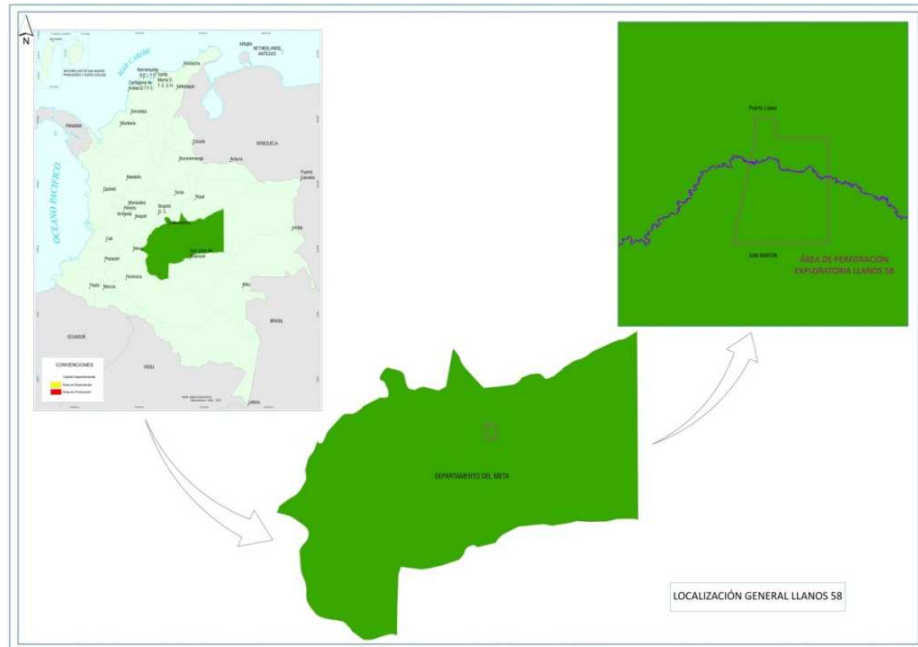
### 4.3 DESCRIPCIÓN ÁREA DE ESTUDIO

#### 4.3.1 Localización Llanos 58

El Área de Perforación Exploratoria LLA- 58 ubicada en la jurisdicción del municipio de Puerto López en el departamento de Meta, dentro de las veredas Alto Melua, Melua Medio y Serranía (ver Figura 3). Según coordenadas (ver Tabla 3).



Figura 3. Localización regional del área de estudio



Fuente: Autores

Tabla 3. Localización del área de perforación exploratoria LLA-58

<b>VÉRTICES ÁREA DE INTERÉS</b>		
<b>DATUM MAGNA SIRGAS - ORIGEN BOGOTÁ</b>		
<b>CÓDIGO</b>	<b>ESTE</b>	<b>NORTE</b>
<b>A</b>	1.164.794,08	922.000,75
<b>B</b>	1.164.794,06	906.600,92
<b>C</b>	1.150.844,57	906.600,94
<b>D</b>	1.153.994,47	922.000,77
<b>E</b>	1.153.994,47	925.000,73
<b>F</b>	1.156.694,37	925.000,73
<b>G</b>	1.157.244,35	922.000,76
<b>H</b>	1.158.994,29	922.000,76
<b>A</b>	1.164.794,08	922.000,75

Fuente: Geingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

### 4.3.2 Descripción de suelos<sup>37</sup>

La caracterización edafológica permite conocer las características y propiedades, así como el patrón de distribución de los diferentes suelos delimitados, constituyéndose en la herramienta básica de trabajo para establecer la capacidad de uso y manejo de las tierras, ya que brinda la oferta edáfica y las limitaciones encontradas en cada una de dichas unidades taxonómicas.

El área donde se ubica el APELLA-58, está relacionada con la evolución geológica de la Cordillera Oriental, la cual durante sus procesos de levantamiento y de glaciación dio origen a una serie de eventos que afectaron tanto las rocas predominantes de edad Cretácica, como las formaciones más jóvenes de edad Paleógena y Neógena, expuestas en la zona del Piedemonte hacia el contacto morfológico con los Llanos Orientales, las cuales han sufrido un fuerte proceso de denudación, en el que la intensa erosión y sedimentación, alternadamente, han ido modelando el nivel original hasta llegar al nivel de base.<sup>38</sup>

En el PBOT de Puerto López del año 2000, se reporta como el material parental originario de sedimentos del Terciario y comienzos del Pleistoceno dio origen a los suelos, estos fueron afectados posteriormente por movimientos tectónicos relativos. Se reporta también una actividad eólica localizada la cual se evidencia en el sector extremo occidental en el límite con Puerto Gaitán.

En algunos sectores de la Altillanura es común encontrar afloramientos de coraza petroférica, los cuales han sido expuestos por procesos erosivos y que son evidentes en algunas superficies de colinas.

Se concluye que el tipo de suelo presente en el área de estudio se relaciona estrechamente con la orogénesis de formación de la cordillera oriental aunado a los procesos de glaciaciones que se presentaron a lo largo del continente.

### 4.3.3 Clasificación edafológica

#### 4.3.3.1 Suelos asociados al paisaje de Altiplanicie (A) en clima cálido húmedo

Los suelos identificados en esta unidad de paisaje, corresponde a una superficie de acumulación de edad pleistocénica que fue levantada por tectonismo respecto de planicie aluvial de los ríos Meta y guayabero; están asociadas a climas cálidos húmedos; y por lo general, se encuentran en pendientes menores del 12%. Dentro de esta unidad de paisaje, los suelos están representados por la Asociación de suelos AVAb:

- **Asociación de suelos AVAab1.** Los suelos de esta Asociación, se encuentran en las veredas Serranías, Alto y Medio Melúa. El relieve es ligeramente plano a

<sup>37</sup> Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58 – Puerto López – Meta, 2012.

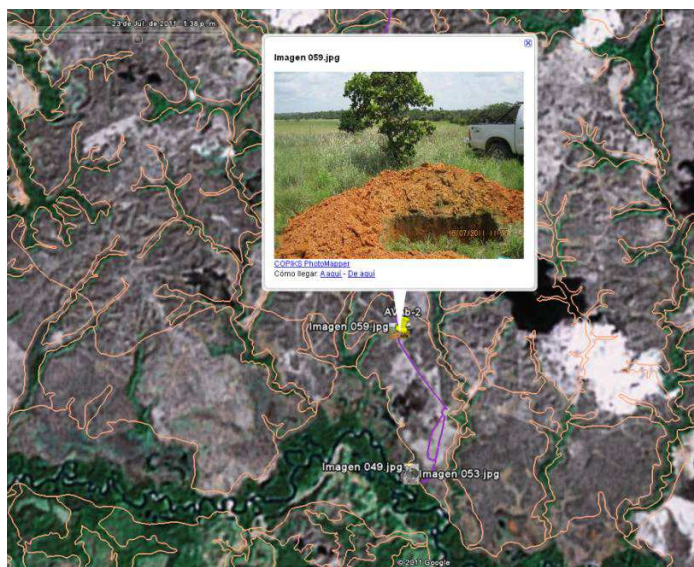
<sup>38</sup> Plan de Manejo Ambiental Programa de Exploración Sísmica Llanos 58-3D. Puerto López y San Martín de los Llanos, 2010

ligeramente inclinado con pendientes 1-7%. Se presenta el escurrimiento difuso generalizado sobre el área.

Suelos profundos a superficiales, texturas gruesas a moderadamente gruesas, bien a excesivamente drenados, muy fuerte a medianamente ácidos, fertilidad baja; presentan toxicidad por aluminio y concreciones petroféricas que restringen la penetración radicular de las plantas.

Su principal actividad es la ganadería extensiva con pastos naturales e introducidos como el braquiaria; el bajo contenido nutricional, la baja retención de humedad, los niveles altos de aluminios y en algunos sectores la profundidad efectiva superficial, dificultan la actividad agrícola y pecuaria (ver Figura 4 y Fotografía 5). Es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica.

Figura 4. Suelos AVAab1



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Fotografía 5. Calicata en campo.



*Fuente:* Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

La unidad está formada por suelos Oxidystropepts, los suelos PetroferricHaplultox y AericTropaquepts; para nuestro estudio se encontró la Asociación Oxidystropepts; en general se presentan en planos ligeramente inclinados, son profundos a superficiales, con texturas gruesas a moderadamente gruesas, bien a excesivamente drenado, muy fuerte a medianamente ácidos, fertilidad baja y con toxicidad por aluminio.

Suelos AVAab1. Planicies aluviales con agregados de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica dando como resultado suelos superficiales. Se encuentran cubiertas por pastos naturales y naturizados con buenos a regulares drenajes (zonas oscuras) como se observa en la Figura 4.

Con base, tanto en la pendiente como en la intensidad de los procesos erosivos, la unidad AVAab1 se caracteriza por presentar la fase a y b o sea presenta una pendiente de entre el 0-7% ligeramente inclinada y presenta erosión ligera.

De acuerdo con los principales factores limitantes de uso: erosión; pendiente; humedad del suelo (drenaje e infiltración); suelos (pedregosidad, profundidad efectiva, fertilidad); clima; y las características físicas, químicas y morfodinámicas de los suelos. La unidad AVAab1 se clasifica en tierras de clase VI s-1; las cuales son aptas, especialmente, para la actividad de conservación de la vegetación nativa, desarrollo de programas forestales y cultivo de pasto, principalmente de corte.

En el Mapa de Suelos (ver Mapa 1), esta unidad se presenta en 3.781,3 Ha que corresponde a un 7,53% del área de estudio, y se distribuye en veredas como Alto Melúa, Medio Melúa y Serranías. En la Tabla 4 se muestran las características de cada uno de los horizontes identificados.

Tabla 4. Características del perfil de la unidad de suelos AVAab1

**Unidad: AVAb1**

**Localización: 1.162.604 E; 918.984 N.**

**Finca: Valdivia**

**Vereda: Serranías**

**Municipio: Puerto López**

**Uso actual de los suelos: Ganadería extensiva**



A1  
00 - 16 cm Color en húmedo pardo grisáceo; textura franco arenoso, sin presencia de guijarros; estructura granular; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y en seco ligeramente dura; poros pocos, tubulares y finos; sin grietas; raíces pocas, finas y vivas; macro organismos pocos; límite difuso.

AE  
16 - 63 cm Color en húmedo pardo amarillento; textura franco arenoso, sin presencia de guijarros; estructura granular, media y moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y en seco dura; poros frecuentes, tubulares y finos; sin grietas; sin raíces; macro organismos pocos; límite difuso.

Bw  
63 - X cm. Color en húmedo pardo rojizo; textura franco arenosa y sin presencia de guijarros; estructura granular, gruesa y fuerte; consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa y en seco muy dura; poros pocos, medianos y tubulares; sin grieta; sin raíces finas y vivas; sin actividad de macroorganismos.

Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.



#### 4.3.3.2 Suelos asociados al paisaje de Lomas (L) en clima cálido húmedo a subhúmedo

Los suelos asociados a este paisaje, ocupan la posición de lomas dentro de los lomeríos asociados, distribuidos en relieves de moderadamente ondulados a moderadamente quebrados, dentro del clima cálido húmedo; con laderas medias y cortas, rectilíneas y ligeramente convexas, de pendientes entre el 7-25% y cimas redondeadas y planas.

Dentro de esta unidad de paisaje, los suelos están representados por una consociación de suelos LVAdc2 – TH y LVAdc2 – PH, y una asociación LVBbc1.

La consociación, está formada por suelos PetroferricHapludox, Typichapludults con inclusiones de PlinthicHapludox y típicoPlinthudults. De acuerdo a las calicatas realizadas en el terreno y a las características de sus suelos se menciona que se encontraron dos unidades de suelos diferentes para la zona norte y sur del bloque; Typichapludults en la vereda Serranías en la zona norte y PetroferricHapludox en las veredas Alto y Medio Melúa en la zona sur, se debe tener en cuenta que la zona sur del bloque es más disectado que la parte norte del mismo.

- **Consociación de suelos LVAdc2 (Typichapludults).** Se encuentra en la vereda Serranías. Morfológicamente, el relieve presenta cimas redondeadas y planas, la morfometría del terreno, es de moderadamente ondulada a moderadamente quebrada. Actualmente, los suelos se encuentran afectados por erosión hídrica laminar moderada.

Son suelos desarrollados a partir de arcillolitas; con buenos drenajes, son moderadamente profundos a superficiales, de texturas moderadamente gruesas (ver Figura 5 y Fotografía 6).

Figura 5. Suelos de lomas redondeadas desnudas



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Fotografía 6. Suelos de lomas redondeadas desnudas, en clima cálido húmedo, sobre laderas inclinadas, pendiente de 7-25% y erosión ligera a moderada



Fuente: Geingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Los suelos TypicHapludults, fase 7-12% se ubica en las partes altas y cimas de las lomas, con pendientes entre el 7-12%. Se originan de arcillolitas, presentan profundidad efectiva superficial a moderadamente profundos, con drenaje natural bueno.

Tiene una limitante de uso dado su gran susceptibilidad a la erosión, su profundidad efectiva, su baja disponibilidad de nutrientes y los altos contenidos de aluminio.

En la imagen satelital se observa área sobre pastos naturales y naturizados pertenecientes a la unidad. Estos suelos presentan una reacción fuerte a muy fuertemente ácida; baja capacidad de intercambio catiónico, baja saturación de calcio, magnesio, potasio y carbonatos de calcio. Bajos contenidos de carbón orgánico y fósforo.

Con base, tanto en la pendiente, como en la intensidad de los procesos erosivos, la unidad LVAdc2 se caracteriza por presentar las Fases d, c (pendientes entre el 7-25%) y erosión moderada.

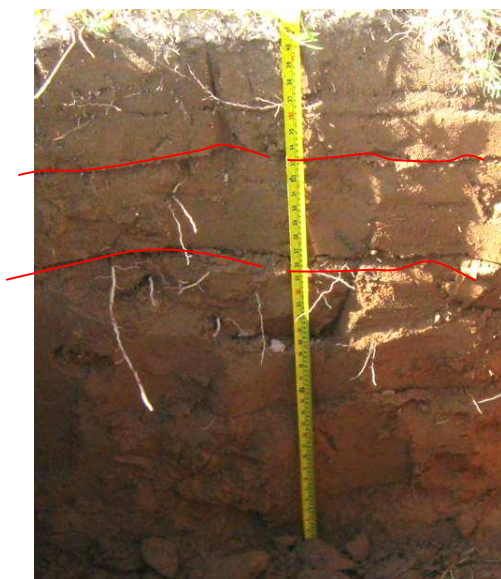
El porcentaje de área encontrada en suelos LVAdc2-TH en el área de estudio es de 22.457,8 Ha con un 44,75% del total del área y se distribuye en la vereda Serranías (ver Mapa 1).

De acuerdo con los principales factores limitantes de uso: erosión; pendiente; humedad del suelo (drenaje e infiltración); suelos (pedregosidad, profundidad efectiva, fertilidad) y clima; y las características físicas, químicas y morfodinámicas de los suelos; la unidad LVAdc2 – TH se clasifica en tierras de clase VII se-1; las cuales son aptas, especialmente, para actividades silvopastoriles, se debe conservar la vegetación natural para protección de microcuencas y fauna asociada, apta para la explotación de canteras para material de recebo, cultivo de pasto, principalmente de corte y cultivos bajo condiciones y actividades encaminadas a mantener (disminución de la erosión) y mejorar

(prácticas culturales o biológicas) las características edáficas. En la Tabla 5 se muestran las características de cada uno de los horizontes identificados.

Tabla 5. Características del perfil de la unidad de suelos LVAdc2 – TypicHapludults

**Unidad: LVAdc2 - TH**  
**Localización: 1.161.926 E; 921.770 N.**  
**Finca: Valdivia**  
**Vereda: Serranía**  
**Municipio: Puerto López**  
**Uso actual de los suelos: Ganadería extensiva**



A1  
00 - 18  
cm

Color en húmedo pardo grisáceo; textura franco arenoso, sin presencia de guijarros; estructura granular; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y en seco ligeramente dura; poros pocos, tubulares y finos; sin grietas; raíces pocas, finas y vivas; macro organismos pocos; límite difuso.

AE  
18 - 36  
cm

Color en húmedo pardo amarillento; textura franco arenoso, sin presencia de guijarros; estructura granular, media y moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y en seco dura; poros frecuentes, tubulares y finos; sin grietas; raíces pocas, finas y vivas; macro organismos pocos; límite difuso.

Bw  
36 - X  
cm.

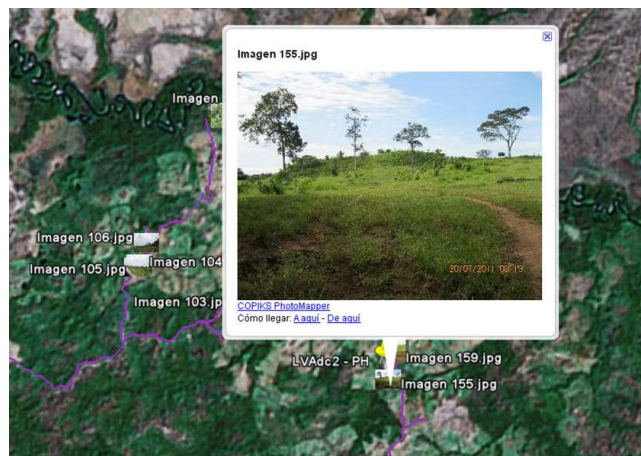
Color en húmedo pardo rojizo; textura franco arenosa y sin presencia de guijarros; estructura granular, gruesa y fuerte; consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa y en seco dura; poros pocos, medianos y tubulares; sin grieta; raíces pocas, finas y vivas; sin actividad de macroorganismos (no se observaron).



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

- **Consociación de suelos LVAdc2 (PetroferricHapludox).** Se encuentran en la vereda Alto Melúa. Morfológicamente, el relieve presenta cimas redondeadas y planas, cimas agudas; la morfometría del terreno, es de moderadamente ondulada a quebrada. Actualmente, los suelos se encuentran afectados por erosión hídrica laminar moderada, por movimientos de remoción en masa, representados en deslizamientos, terraceos y pate vaca; y por escurrimiento difuso. Son suelos desarrollados a partir de arcillolitas; con buenos drenajes, son muy superficiales a superficiales limitados por gravilla petroférica, de texturas finas a moderadamente gruesas (ver Figura 6 y Fotografía 7).

Figura 6. Suelos de lomas redondeadas y/o planas



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Fotografía 7. Izquierda: Suelos de lomas redondeadas y/o planas, en clima cálido húmedo, en terrenos de ondulados a quebrados, pendiente de 12-25% y erosión ligera a moderada



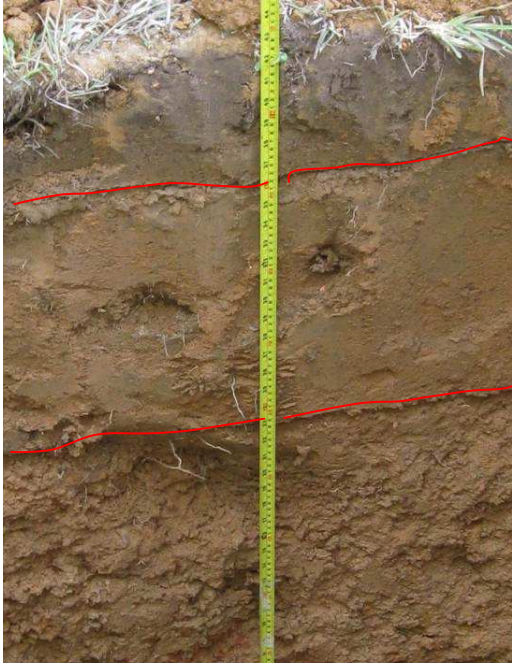
Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Los suelos PetroferricHapludox fase 12-25% se localiza en las laderas de las lomas del sector sur, con pendientes fuertemente inclinadas, son moderadamente profundos limitados por capas de gravilla petroférica, de drenaje natural moderado y origen de la misma a partir de arcillolitas.

Tiene una limitante de uso dado su gran susceptibilidad a la erosión y a la remoción en masa, su profundidad efectiva, su baja disponibilidad de nutrientes y los altos contenidos de aluminio.

En general estos suelos presentan una reacción fuerte a muy fuertemente ácida; baja capacidad de intercambio catiónico, baja saturación de calcio, magnesio, potasio y carbonatos de calcio. Bajos contenidos de carbón orgánico y fósforo. En la Tabla 6 se muestran las características de cada uno de los horizontes identificados.

Tabla 6. Características del perfil de la unidad de suelos LVAdc2– PetroferricHapludox

<b>Unidad: LVAdc2 – PetroferricHapludox</b> <b>Localización: 1.156.689 E; 915.509 N.</b> <b>Finca: Itoco</b> <b>Vereda: Alto Melúa</b> <b>Municipio: Puerto López</b> <b>Uso actual de los suelos: Ganadería y vegetación natural</b>	
	<p>Color en húmedo pardo grisáceo; textura franco arenoso, sin presencia de guijarros; estructura granular; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y en seco ligeramente dura; poros pocos, tubulares y finos; sin grietas; raíces pocas, finas y vivas; macro organismos pocos; límite difuso.</p> <p>Color en húmedo pardo amarillento; textura franco arenoso, sin presencia de guijarros; estructura granular, media y moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y en seco dura; poros frecuentes, tubulares y finos; sin grietas; raíces pocas, finas y vivas; macro organismos pocos; límite difuso.</p> <p>Límite de la grava petroférica.</p>
<p>A1 00 - 14 cm</p>	
<p>AE 14 - 32 cm</p>	
<p>C 32 - X cm</p>	

Fuente: Geingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

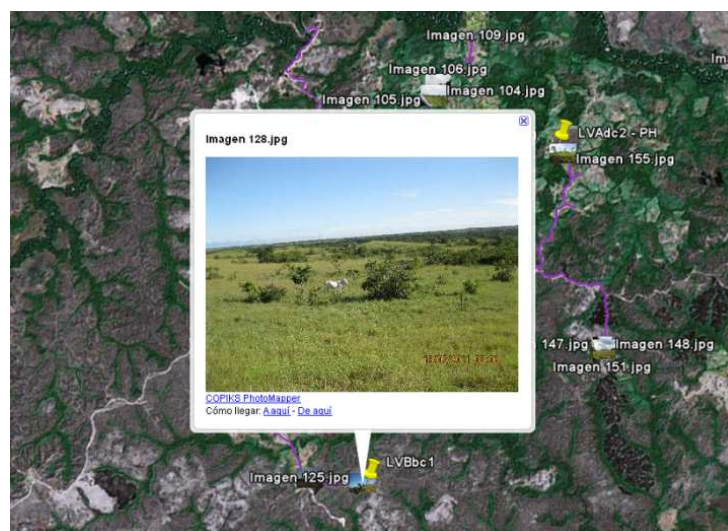
Con base, tanto en la pendiente, como en la intensidad de los procesos erosivos, la unidad LVAdc2 – PH se caracteriza por presentar las Fases d, c (pendientes entre el 7-25%) y erosión moderada. De acuerdo con los principales factores limitantes de uso: erosión; pendiente; humedad del suelo (drenaje e infiltración); suelos (pedregosidad, profundidad efectiva, fertilidad) y clima; y las características físicas, químicas y morfodinámicas de los suelos; la unidad LVAdc2 – PH se clasifica en tierras de clase VII se-1; las cuales son aptas, especialmente, para actividades silvopastoriles, se debe conservar la vegetación natural para protección de microcuencas y fauna asociada, apta para la explotación de canteras para material de recebo, cultivo de pasto, principalmente de corte y cultivos bajo condiciones y actividades encaminadas a mantener (disminución de la erosión) y mejorar (prácticas culturales o biológicas) las características edáficas.

El porcentaje de área encontrada en suelos LVAdc2-PH en el área de estudio es de 2.308,3 Ha con un 4,59% del porcentaje total del área y se distribuye en la vereda Alto Melúa Serranías (ver Mapa 1).

- **Asociación de suelos LVBbc1.** Los suelos de esta Asociación, se encuentran en las veredas Alto y Medio Melúa y Serranías. El relieve es ondulado, sus cimas son redondeadas y estrechas, las pendientes son entre el 3-12%, con laderas cortas y medias, ligeramente convexas. Actualmente, los suelos presentan erosión hídrica laminar, de ligera a moderada y escurrimiento difuso.

Los suelos en su mayoría son profundos, bien drenados, de texturas moderadamente finas a gruesas y se originan a partir de arcillas y conglomerados (ver Figura 7 y Fotografía 8).

Figura 7. Suelos de relieve ondulado



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Fotografía 8. Suelos de relieve ondulado, con pendientes entre 3% y el 12%, se aprecia al fondo las cimas redondeadas, pastos arbolados con la especie chaparro curatella americana



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Esta unidad está formada por suelos TypicHapludox; Oxidystropepts e inclusiones de los suelos TypicTropaquepts y TypicDystropepts donde en general la susceptibilidad a la degradación, los bajos contenidos nutricionales y los altos contenidos de aluminio intercambiable constituyen los principales limitantes del uso y manejo de estas tierras.

Se verificó que en la unidad en mención LVBbc1, existe la asociación Oxidystropepts la cual se distribuye principalmente en el plano inclinado o glacis mixtos con pendientes ligeramente inclinadas, son suelos profundos. Su evolución genética es a partir de materiales parentales arcillosos.

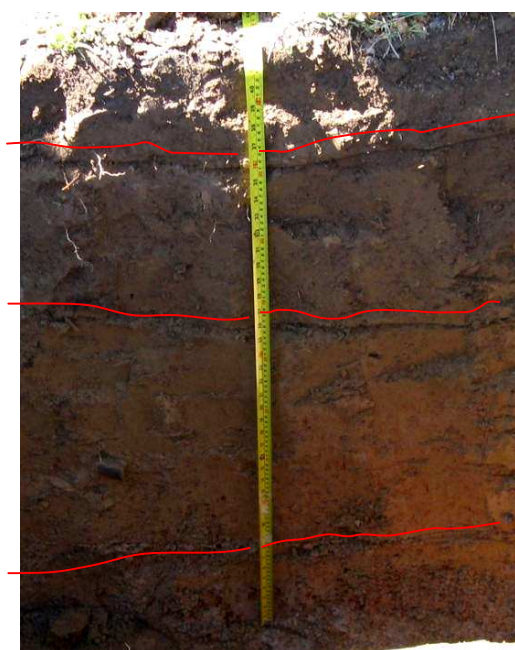
Con base, tanto en la pendiente como en la intensidad de los procesos erosivos, la unidad LVB se caracteriza por presentar las Fases b, c (pendientes entre el 3-12%) y Erosión ligera. De acuerdo con los principales factores limitantes de uso erosión, mencionados anteriormente, la unidad LVBbc1 se clasifica en tierras de clase VI; las cuales son aptas, especialmente, para la actividad de ganadería extensiva con pastos naturales e introducidos en los sectores con pendientes menores del 7%, en las laderas con pendientes entre el 7% y 12% se deben realizar actividades silvopastoriles que alternen con la conservación del bosque natural.

El porcentaje de área encontrada en suelos LVBbc1 en el área de estudio es de 9.808,4 Ha con un 19,54% del porcentaje total del área y se distribuye en veredas como Alto Melúa, Medio Melúa y Serranías (ver mapa 1). En la Tabla 7, se muestra las características de cada uno de los horizontes identificados.



Tabla 7. Características del perfil de la unidad de suelos LVAdc1

Unidad: LVBbc1  
 Localización: 1.151.941 E; 907.512 N.  
 Finca: Bonanza  
 Vereda: Alto Melúa  
 Municipio: Puerto López  
 Uso actual de los suelos: Ganadería extensiva; la vegetación natural se restringe a las zonas de rondas de cauce, caños y quebradas.



Ap 00 - 14 cm	Color en húmedo pardo claro; textura franco arenoso, sin presencia de guijarros; estructura granular; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y en seco suelta; poros pocos, tubulares y finos; sin grietas; raíces pocas, finas y vivas; macro organismos pocos; límite difuso.
AE 14 - 41 cm	Color en húmedo pardo grisáceo oscuro; textura arenosa; estructura granular, fina y moderada; consistencia en húmedo muy friable, en mojado pegajosa y en seco suelta; poros frecuentes, medios y finos; raíces pocas, finas y vivas; poca actividad de macro organismos; límite difuso.
Bc 41 - 84 cm	Color en húmedo pardo rojizo; textura arenosa y sin presencia de guijarros; estructura granular, fina y moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y en seco suelta; poros pocos, muy finos y tubulares; sin grieta; sin raíces; sin actividad de macroorganismos (no se observaron).
Bw 84 - X cm	Color en húmedo pardo rojizo con moteados grises; textura franco arenosa y sin presencia de guijarros; estructura granular, media y moderada; consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa y en seco ligeramente dura; poros pocos, muy finos y tubulares; sin grieta; sin raíces; sin actividad de macroorganismos (no se observaron).

Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

#### 4.3.3.3 Suelos asociados al paisaje de Valles (V) en clima cálido húmedo y muy húmedo

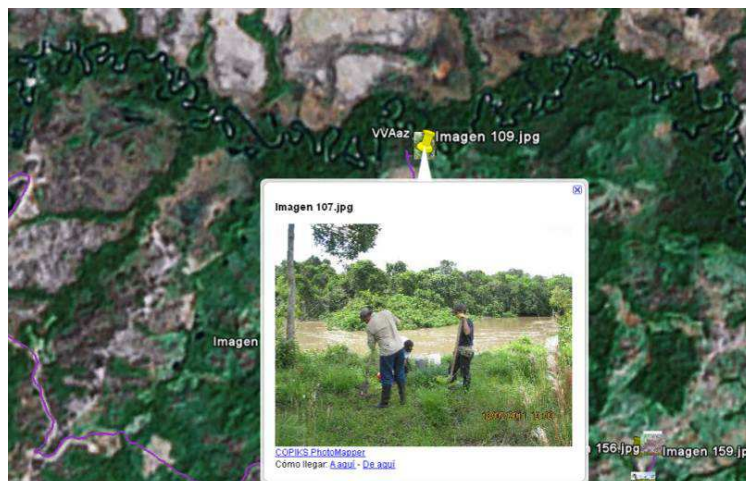
Los suelos asociados a este paisaje, se localizan sobre los planos de inundación y vallecitos coluvio – aluviales que se encuentran relacionados con la dinámica de los ríos; por lo general, están constituidos por depósitos mixtos aluviales y depósitos mixtos coluvio aluviales localizados en relieves que oscilan en pendientes de entre 0 - 3 %. Dentro de esta unidad de paisaje, los suelos están representados por la Asociación de suelos VVAaz y VVBaz:

- **Asociación de suelos VVAaz.** Estos suelos, se localizan de manera paralela a lo largo del río Melúa y el caño Garibay. Morfométricamente, el relieve es ligeramente plano a plano con pendientes de entre el 0-3%. Actualmente, los suelos superficiales a moderadamente profundos limitados por el nivel freático, imperfecta a pobremente drenados, de texturas variadas finas a gruesas y se originan a partir de depósitos aluviales mixtos (ver Figura 8 y Fotografía 9).

La unidad, está formada por suelos OxiaquicDystropepts, por suelos PlinthicTropaquepts, suelos TypicPlinthaquepts e inclusiones del subgrupo TypicTropopsamments. La asociación presente es la PlinthicTropaquepts la cual se origina a partir de sedimentos aluviales finos a moderadamente finos, se localiza en las partes bajas del plano de inundación.

Estos suelos presentan una reacción fuertemente ácida; bajo contenido de fósforo, carbón orgánico, bases y capacidad de intercambio catiónico, alta saturación de aluminio y fertilidad baja. El autor, menciona que los principales factores de formación son el clima; y como proceso importante se consideran las transformaciones.

Figura 8. Suelos de valles en planos de inundación VVAaz.



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Fotografía 9. Suelos de valles en planos de inundación VVAaz



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Con base, tanto en la pendiente como en la intensidad de los procesos erosivos, la unidad VVAaz se caracteriza por presentar las Fases az por tanto son suelos planos e inundables.

A partir de los principales factores limitantes de uso del recurso, como son la erosión; pendiente; humedad del suelo; tipo de suelo y clima; y las características físicas, químicas y morfodinámicas de los mismos; la unidad VVAaz se clasifica en tierras de clase IV sh-1; las cuales son aptas, especialmente, para cultivos anuales y perennes (arroz, caña, sorgo, palma africana, cítricos entre otros) y pastos introducidos (braquiaria) para ganadería semi intensiva.

La unidad VVAaz se distribuye en 2.890,8 Ha con un 5,76% del porcentaje total del área, y se identifican en las veredas como Alto Melúa, Medio Melúa y Serranías (ver Mapa 1).

- **Asociación de suelos VVBaz.** Estos suelos, se localizan de manera paralela a lo largo de las quebradas y caños afluentes del río Melúa y del caño Garibay, en caños como Nápoles, San Cristóbal, La Reforma, el Arenal, el Policía, el Gallo entre otros. Morfométricamente, el relieve es ligeramente plano a plano con pendientes de entre el 0 -3%.

Los suelos se han desarrollado a partir de materiales mixtos de origen aluvial y coluvial, son imperfectos a pobremente drenados, y superficiales a moderadamente profundos limitados por el nivel freático fluctuante (ver Figura 9 y Fotografía 10).

Tabla 8. Características del perfil de la unidad de suelos VVAaz

Unidad: VVAaz  
 Localización: 1.162.742,0 E; 917.393,0 N.  
 Finca: Valdivia  
 Vereda: Serranías  
 Municipio: Puerto López  
 Uso actual de los suelos: Sin uso agropecuario

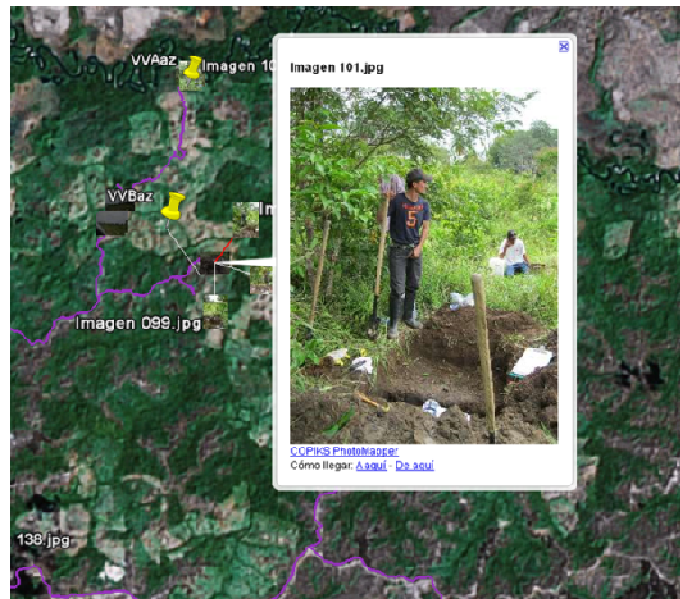


Ap 00 - 15 cm	Color en húmedo gris oscuro; textura franco arcillosa; estructura granulares, medios y moderados; consistencia en húmedo firme, en mojado plástica y en seco dura; poros pocos tubulares y finos; raíces abundantes, vivas, medias y finas; macro organismos mediana actividad; límite difuso.
A1 15 - 35 cm	Color en húmedo pardo oscuro; textura franco arcilloso; estructura granular, fina y moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y en seco dura; poros pocos, tubulares y finos; raíces pocas, finas y vivas; poca actividad de macro organismos; límite difuso.
Bw 35 - 68 cm.	Color en húmedo pardo amarillento claro, con manchas de color pardo grisáceo claro; textura arcillo arenosa; estructura granular, fina y débil; consistencia en húmedo firme, en mojado plástica, en seco muy dura; poros pocos, tubulares y finos; sin raíces. Limitado por nivel freático.

Fuente: Geingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.



Figura 9. Suelos de valles aluviales VVBaz



Fuente: Geingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Fotografía 10. Valle aluvial del caño los marranos, vereda Alto Melúa



Fuente: Geingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

La unidad, está formada por suelos Typictropofluvents, por suelos Typictropaquepts, OxyaquicDystropepts, e inclusiones del subgrupo FluventicDystropepts.

De acuerdo a las calicatas realizadas y a las características de los horizontes encontrados se menciona que la asociación Typictropofluvents es la que representa la unidad de suelos descrita. Estos suelos se encuentran en las proximidades a los ríos, caños entre otros. Son suelos de drenaje moderado, su evolución pedogenética es muy incipiente, y son profundos limitados por el nivel freático.

Las inundaciones, los encharcamientos, el nivel freático fluctuante, los niveles altos de aluminio y la baja fertilidad a causa del continuo lavado de nutrientes en estos suelos, generan serios inconvenientes para la adecuada explotación agropecuaria en estas tierras.

Estos suelos presentan una reacción fuertemente ácida; bajo contenido de fosforo, carbón orgánico, bases y capacidad de intercambio catiónico, alta saturación de aluminio y fertilidad baja.<sup>39</sup> Este mismo autor, menciona que los principales factores de formación son el clima; y como proceso importante se consideran las transformaciones.

Con base, tanto en la pendiente como en la intensidad de los procesos erosivos, la unidad VVB se caracteriza por presentar las Fases az, son planos e inundables. La Tabla 9, muestra las características de cada uno de los horizontes identificados.

De acuerdo con los principales factores limitantes de uso del recurso, nombrados previamente la unidad VVB se clasifica en tierras de clase IV hs-1; las cuales son aptas, para la agroforestería con ganadería extensiva, zoocultura y para la protección de los bosques de galería y nacederos de los caños.

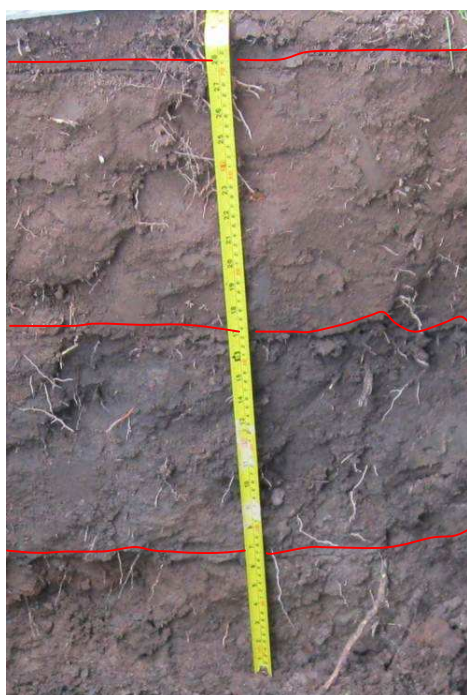
El porcentaje de área encontrada en suelos VVBaz en el área de estudio es de 8938,0 Ha con un 17,81% del porcentaje total del área y se distribuye en veredas como Alto Melúa, Medio Melúa y Serranías.

---

<sup>39</sup> Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Meta. 2004.

Tabla 9. Características del perfil de la unidad de suelos VVBaz

Unidad: VVBaz  
 Localización: 1155957mE; 921923mN.  
 Caño: Los Marranos  
 Vereda: Serranías  
 Municipio: Puerto López  
 Uso actual de los suelos: Bosque protector



<p>Ap 00 – 06 cm</p>	<p>Color en húmedo café oscuro; textura franco arcillosa arenosa; estructura granular, media y débil; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y en seco ligeramente dura; poros pocos tubulares y finos; raíces abundantes, vivas, medias y finas; macro organismos mediana actividad; límite claro.</p>
<p>B1 06 - 34 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo amarillento oscuro; textura arcillosa; estructura granular, medios y moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente plástico y en seco plástica; poros frecuentes, medios y finos; raíces frecuentes, finas y vivas; poca actividad de macro organismos; límite claro.</p>
<p>B2 34 - 62 cm.</p>	<p>Color en húmedo pardo oscuro, con manchas de color pardo grisáceo oscuro; textura franco arcillosa; estructura granular, media y débil; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y en seco blanda; poros frecuentes y medianos; pocas raíces finas y vivas.</p>
<p>Bw 62 – 84 cm.</p>	<p>Color en húmedo pardo oscuro, con manchas de color pardo grisáceo oscuro; textura franco arcillo arenosa; estructura granular, media y moderada; consistencia en húmedo muy friable, en mojado pegajosa y en seco blanda; poros frecuentes y finos; pocas raíces finas y vivas. Limitado por nivel freático.</p>

Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

#### 4.3.4 Caracterización física, química y biológica de las unidades de suelos

Se realiza una caracterización física, química y biológica de los suelos que hacen parte del área de estudio, teniendo en cuenta el reconocimiento en campo, la información secundaria recopilada y los resultados de laboratorio certificado ANTEK.

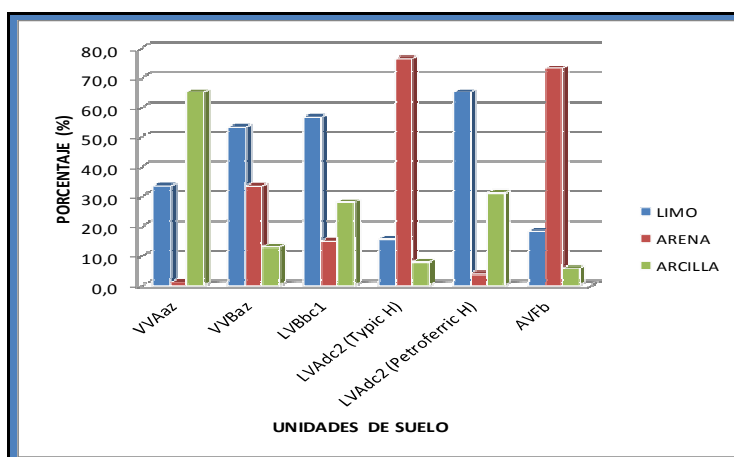
Las unidades de suelos del bloque se distribuyen en forma uniforme a lo largo y ancho del mismo, presentándose una diferencia marcada entre la zona norte y sur del bloque las cuales se encuentran divididas por el río Melúa; siendo la zona norte menos abrupta con presencia de más lomas, que la zona sur con más colinas lo cual hace que se marquen diferencias en sus características físico químicas como por ejemplo la zona norte presenta tendencia a texturas más arenosas mientras que las del sur más limo arcillosas.

##### 4.3.4.1 Interpretación física

En general, los suelos presentan pendientes que oscilan entre ligeramente planas (Ej. VVAaz) a fuertemente inclinadas (Ej. LVAdc2); las cuales, junto con la litología, enmarcan las profundidades efectivas radiculares que van desde muy superficiales (Ej. LVAdc2 limitados por grava petroférica en el sur del bloque) a profundos (Ej. LVBbc1).

Las texturas oscilan entre franco arenoso y franco arcilloso; donde, las fracción granulométrica predominante corresponden a los limos que ocupan las Asociaciones VVB, LVB y consociación LVA (Petroferric Hapludox). Para la unidad AVF y LVA (TypicHapludults), se aprecian los sedimentos gruesos (arenas) e inclusiones de materiales medios que se encuentran íntimamente ligados a la dinámica fluvial de las quebradas que se encuentra dentro del área de influencia del proyecto (ver Figura10). La unidad VVA presenta granos finos correspondientes a arcillas de las zonas aluviales y planos inundables de los ríos como el Melúa.

Figura 10. Porcentaje de distribución de la granulometría para cada una de las unidades de suelos



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

De igual manera, el drenaje natural de los suelos se encuentra entre muy baja a moderadamente drenados. Los primeros, ocupan pendientes mayores y se encuentran relacionados tanto con la estratigrafía como con los coluviones que se han depositado en la parte baja de las laderas. Los segundos, se relacionan con los valles de inundación que se encuentran asociados a las quebradas. Por lo visto en terreno, la zona norte del bloque presenta suelos más arenosos mientras que los suelos del sur son más limosos características que incide directamente sobre el drenaje de los mismos.

La densidad aparente de los suelos, se encuentran entre 1,5 y 0,75 gr/ml, clasificándose como de alta a media (ver Tabla 10). Este valor, se encuentra relacionado tanto con la textura como con la resistencia del suelo a la penetración y, al uso actual de los mismos; por ejemplo el pastoreo intensivo, genera sobrecargas en el suelo dando paso a deformaciones y compactaciones.

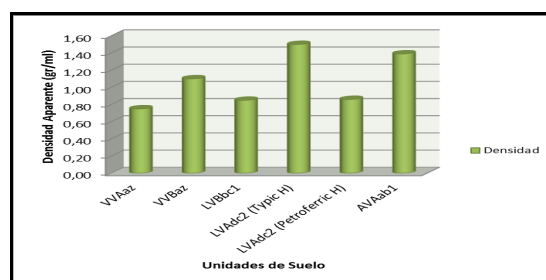
Tabla 10. Clasificación densidad aparente

UNIDAD	DENSIDAD (gr/cc)	TEXTURA	CLASIFICACIÓN
VVAaz	0,75	FA	BAJA
VVBaz	1,10	FAAr	MEDIA
LVBbc1	0,85	FAr	BAJA
LVAdc2 (Petroferric H)	1,50	FAr	ALTA
LVAdc2 (Typic H)	0,86	F	BAJA
AVAab1	1,39	FAr	ALTA

Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Según los valores de densidad aparentemente altos como en la unidad de suelo AVAab1 y LVAdc2 (TypicHapludults) indican un ambiente pobre para el crecimiento de raíces, aireación reducida y cambios indeseables en la función hidrológica como la reducción de la infiltración del agua. Las demás unidades de suelo presentan valores de densidad medios y bajos por tanto no tendrán problemas para crecimiento de raíces y no potencializará eventos relacionados como inundaciones en el evento que no haya problemas de inundación (ver Figura 11).

Figura 11. Densidad aparente de las unidades de suelos.



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

La Tabla 11, presenta los resultados obtenidos para el diagnóstico físico de las unidades de suelos que hacen parte del área de influencia.

Tabla 11. Caracterización física de los suelos del área de influencia

PAISAJE (1)	MORFOLOGÍA (1)	UNIDAD (1)	UNIDAD CARTOGRÁFICA (1)	CLASE TAXONÓMICA (1)	MATERIAL PARENTAL (1)	HORIZONTE (1)	PROFUNDIDAD (1)	DRENAJE (1)	LIMO (%) (1)	ARENA (%) (1)	ARCILLA (%) (1)	CLASE TEXTURAL (2)	DENSIDAD (gr/ml) (1)	HUMEDAD (%) (1)	PENDIENTE (1)	EROSIÓN (1)
Altiplanicie estructural	Mesas y superficies onduladas	AVAab 1	Asociación AVA	OxicDystropepts	Arcillas con cobertura continua de material coluvial grueso	0-15;15-35;35-X	Profundos a superficiales	Bien a excesivamente drenados	18,3	73,1	5,9	Francoarenosa	1,38	15,87	a, b	1
	Lomas	LVAdc 2	Asociación LVA	TypicHapludults	Arcillolitas	0-18;18-36;36-X	Superficiales a moderadamente profundos	Moderado a bien drenado	15,8	76,3	7,9	Francoarenosa	1,53	14,04	c, d	2
Lomerío Fluvio Gravifacional	Lomas	LVAdc 2	Asociación LVA	PetroferricHapludux	Arcillolitas	0-14;14-32; limitado por grava petroférica	Muy superficiales a superficiales	Moderado a bien drenado	65,1	3,9	31,1	Franco	0,94	29,79	c, d	2
	Lomas y colinas asociadas con rianitas mióclenas	LVBbc 1	Asociación LVB	OxicDystropepts	Arcillas	0-14;14-41;41-84; 84-X	Profundos	Bien drenados	56,8	15,1	28,1	Francoarenosa	1,01	18,22	b, c	1
Valles aluviales	Plano de inundación	VVAaz	Asociación VVA	PlinticTropaquepts	Depósitos mixtos aluviales	0-15;15-35;35-65	Superficial, limitada por nivel freático	Pobremamente drenados	33,7	1,2	65,1	Francoarcillosa	0,79	26,04	a	-
	Vallecitos coluvio - aluviales	VVBaz	Asociación VVB	Typictropofluvents	Depósitos mixtos aluviales y coluviales	0-6,6-34,34-62, 62-84	Moderada limitada por nivel freático	Moderadamente bien drenado	53,3	33,6	13,0	Francoarcillosa arenosa	1,08	20,28	a	-

Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012. (1) Datos obtenidos durante el muestreo en campo y análisis de resultados de laboratorio.

#### 4.3.4.2 Interpretación química

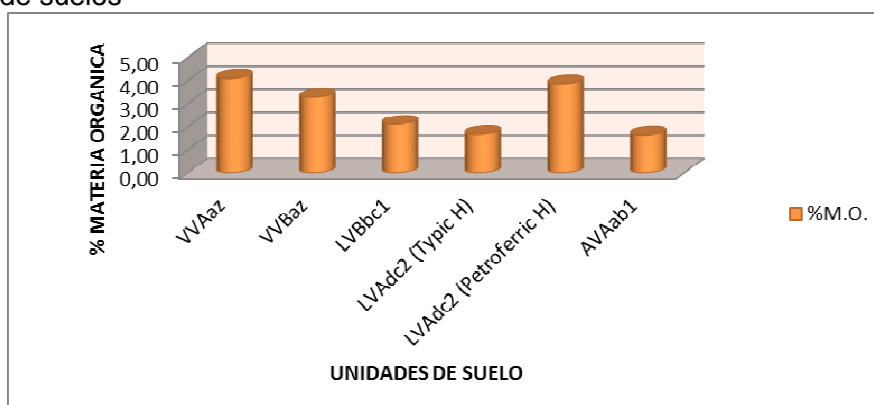
La acidez del suelo mide la concentración en hidrogeniones (H+) en el suelo, los cuales pueden estar tanto en la solución del suelo como en el complejo de cambio. Los suelos que hacen parte del área de influencia, presentan pH entre 4,87 en la asociación AVAab1 y 4,41 en la asociación VVAaz; por lo cual se clasifican en suelos muy fuertemente ácidos, ésta característica proviene de las características litológicas del material parental, en donde no se neutralizan los óxidos de hierro, óxidos de aluminio, óxidos de manganeso y la materia orgánica que le aportan acidez a los suelos. De aquí, los bajos o nulos niveles de aluminio, saturación de aluminio y carbón orgánico. Un pH muy bajo puede insolubilizar algunos nutrientes y movilizar al aluminio (Al 3+).

Con respecto al aluminio intercambiable, se presentan niveles tóxicos para las plantas, ya que de acuerdo a investigaciones previas se ha observado que un exceso de aluminio interfiere en la división celular en las raíces, así como el proceso de absorción y utilización de algunos iones, en especial el Ca (Calcio) Mg (Magnesio) y P (Fósforo). De igual forma se relaciona con la precipitación de los fosfatos en el interior de la pared celular; El nivel más alto de aluminio con un valor de 2,3 se presentó para la asociación de suelos denominada LVBbc1, aunque en general para los suelos el aluminio intercambiable es alto, lo cual limita definitivamente el uso del suelo en la zona.

La materia orgánica (M.O.), se encuentra entre 1,66 y 4,10% valores que para clima cálido se clasifican en bajos a altos, donde el menor valor se localiza en suelos que se encuentran sobre altillanuras de la asociación AVAab1 (1,66); seguido de los suelos que se encuentran sobre lomas de la asociación LVAdc2 (TypicHapludults) (1,69), y los suelos con mayor porcentaje de M.O., corresponden a los que se ubican sobre valles coluvio – aluviales de la asociación VVAaz (4,1) áreas donde se encuentran los bosques de galería.

Se estima que el bajo porcentaje de M.O., en los primeros, se debe al lavado continuo, a las características texturales de los suelos y al drenaje y movimiento vertical de las aguas tanto de escurrimiento como de infiltración (ver Figura 12).

Figura 12. Porcentaje de distribución de la materia orgánica para cada una de las unidades de suelos

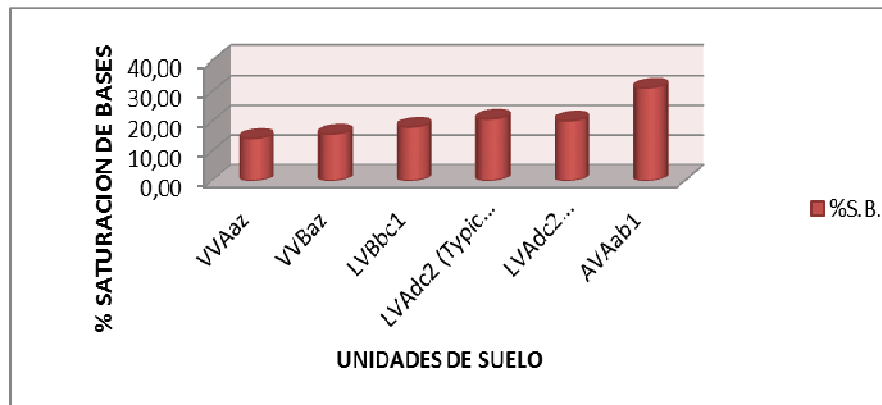


Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.



El porcentaje de saturación de bases está relacionado con el pH y la fertilidad del suelo, a mayor pH y mayor fertilidad de un suelo mayor es el grado de saturación de bases, dado lo anterior por encontrarse el Ph hacia la mitad de la tabla (valores entre 4-6) la saturación de bases en los suelos es baja con respecto a la escala de pH de suelos ácidos (<31), debido a la disminución de la facilidad con que los cationes de Ca, Mg, Na son absorbidos por las plantas; Igualmente, a que predominan las texturas arenosas y a que no existe el suficiente porcentaje de materia orgánica que pueda retener las bases del suelo (ver Figura 13).

Figura 13. Porcentaje de saturación de bases totales para cada una de las unidades de suelos.



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

En general los suelos presentan rangos de contenidos con tendencia media – baja en porcentaje de materia orgánica (<2 – 4) y bajos en contenidos de fósforo (<7), dado lo anterior la fertilidad es muy baja, sus condiciones intrínsecas sumadas al uso inadecuado de los suelos, donde el sobrepastoreo, la agroindustria y la deforestación son causantes de la degradación de los mismos.

Con base en lo anterior, se considera que el comportamiento tanto del pH, como de la saturación de aluminio y de los componentes mineralógicos en general, se debe a la composición del material litológico, al comportamiento de la precipitación pluvial, al clima y al tipo de organismos que se encuentran en la fase aire-suelo.

Con respecto a la medición de grasas y aceites, la Figura 14 muestra las cantidades de grasas y aceites la cual oscila entre 155,0 y 230,0 (mg/Kg), lo cual Estado de Louisiana.<sup>40</sup> los considera de carácter bajo.

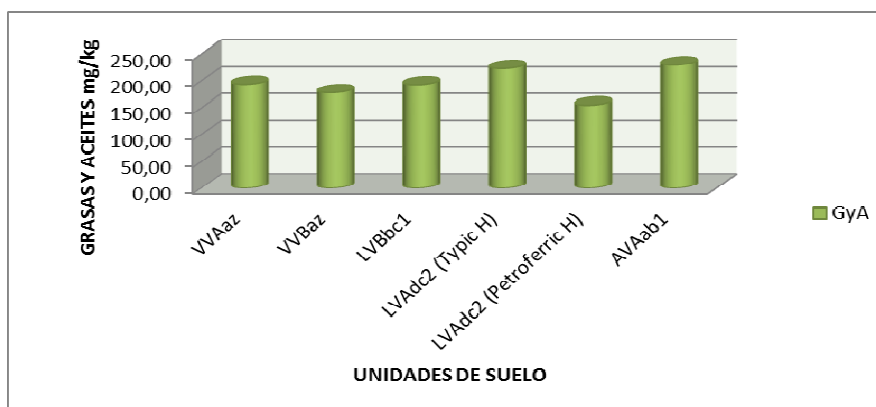
De igual manera, en la Figura 15, se muestra la cantidad de hidrocarburos totales el cual tiende a valores 163 y 246 mg/kg, dado lo anterior según el Código de Louisiana.<sup>41</sup>

<sup>40</sup> Department Of Natural Resources. Office of Conservation, pág. 785.

<sup>41</sup> ibid

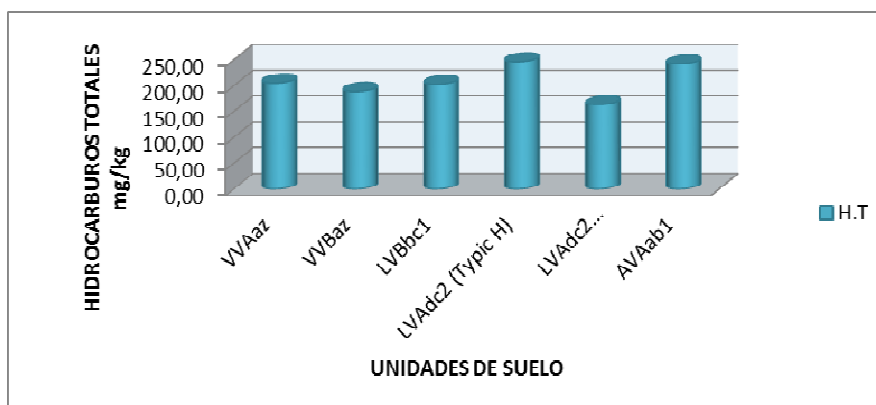


Figura 14. Cantidad de Grasas y aceites por unidad de suelos



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Figura 15. Cantidad de Hidrocarburos totales por unidad de suelos.



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

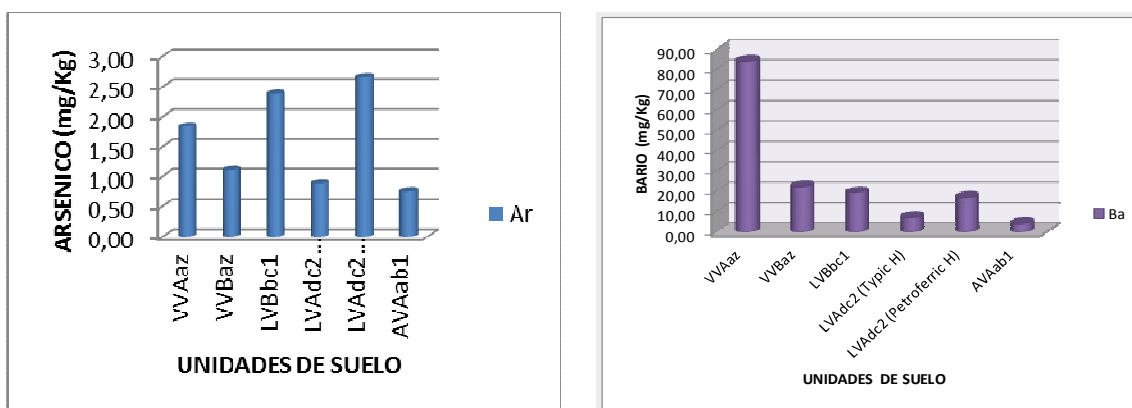
#### 4.3.4.3 Interpretación metales pesados

Con respecto a los metales pesados, la Figura 16, muestra la cantidad tanto de arsénico como de bario y otros elementos pesados que se encuentran en los suelos muestreados y que hacen parte del área de estudio. Como se aprecia y de acuerdo con EPA<sup>42</sup> los niveles de arsénico en el suelo son bajos para todas las unidades de suelos (<5) nivel no tóxico para plantas ni suelos. Gran parte del arsénico de los suelos está adsorbido sobre compuestos amorfos de hierro y aluminio de los suelos del área de estudio.

<sup>42</sup> Guide to site and soil description for hazardous waste site characterization, 1992.

Las concentraciones de bario en el suelo oscilan entre 4,40 y 84,0 mg/Kg considerándose normales pues la máxima concentración permitida es 100mg/kg para los suelos.<sup>43</sup> (Lindsay, 1979, pág. 300). En general las concentraciones que se presentan en las diferentes unidades de suelo se clasifican como bajas.

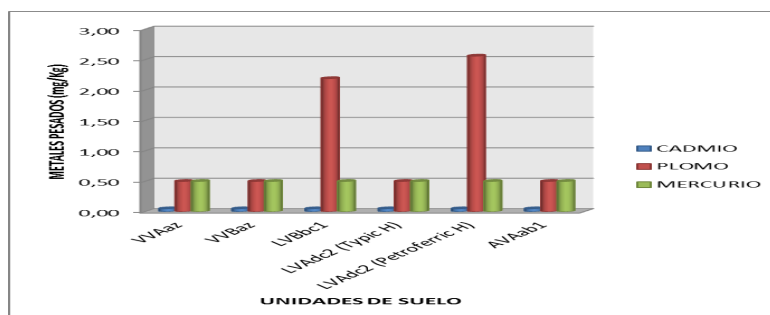
Figura 16. Cantidad de metales pesados por unidad de suelos



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

En la Figura 17 se muestra las cantidades de otros metales como cadmio, plomo y mercurio que se encuentran en los suelos muestreados y que hacen parte del área de estudio. Como se aprecia y de acuerdo con EPA<sup>44</sup>, los niveles de cadmio y mercurio en el suelo son bajos para todas las unidades de suelos pues son menores a 10 ppm y 5 ppm respectivamente por tanto poseen un nivel no tóxico para plantas y suelos. En el caso del plomo todos los valores son bajos pues no superan 100 ppm. Dado lo anterior no se aprecia contaminación de los suelos por metales pesados.

Figura 17. Cantidad de cadmio, plomo y mercurio por unidad de suelos.



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

La Tabla 12 presenta los resultados obtenidos para el diagnóstico químico de las unidades de suelos.

<sup>43</sup> Chemical equilibria in soils. 1979.

<sup>44</sup> Guide to site and soil description for hazardous waste site characterization, 1992.

Tabla 12. Caracterización química de los suelos del área de influencia

PAISAJE (1)	MORFOLOGÍA (1)	UNIDAD (1)	UNIDAD CARTOGRÁFICA (1)	CLASE TAXONÓMICA (1)	MATERIAL PARENTAL (1)	HORIZONTE (1)	PROFUNDIDAD (1)	pH (1)	ACIDEZ (1)	CIC (meq/100gr) (1)	SODIO INTERCAMBIABLE (meq/100gr) (1)	CARBONO ORGÁNICO (%) (1)	SATURACIÓN DE BASES TOTALES (%) (1)	RAS (1)	FÓSFORO (ppm) (1)	ALUMINIO (meq/100gr) (1)	ARSÉNICO TOTAL (mg/Kg) (1)	BARIO TOTAL (mg/Kg) (1)	GRASAS Y ACEITES (mg/Kg) (1)	HIDROCARBUROS TOTALES (mg/Kg) (1)	FERTILIDAD(1)
Altiplanicie estructural	Mesas y superficies onduladas	AV/Aab1	VAV uoppcosy	OxicDystropepts	Arcillas con cobertura continua de material coluvial grueso	0-15;15-35;35-X	Profundos a superficiales	4,87	Muy Fuertemente Acido	333	0,37	0,96	31,3	0,64	6,67	0,50	0,76	4,40	230,0	242,0	Muy Baja
Lomerío Fluvio Gravitacional	Lomas	LVAdc2	ASOCIACIÓN Lyfbc	Hapluditis	Arcillolitas	0-18;18-36;36-X	Superficiales a moderadamente profundos	4,48	Extremadamente Acido	000	0,30	0,98	20,8	0,92	3,33	1,07	0,89	7,17	223,3	246,3	Muy Baja
Lomerío Fluvio Gravitacional	Lomas	LVAdc2	ASOCIACIÓN Urichaplud		Arcillolitas	0-14;14-32; limitado por grava petroférica	Muy superficiales a superficiales	4,78	Muy Fuertemente Acido	000	0,32	2,24	20,2	1,20	1,0	1,40	2,66	17,05	155,0	163,0	Muy Baja
Valles aluviales	de inundación	VVAa1	ASOCIACIÓN Urichaplud		Arcillas	0-14;14-41;41-84; 84-X	Profundos	4,51	Muy Fuertemente Acido	005	0,30	1,23	18,1	1,19	4,25	2,28	2,38	19,60	192,5	203,0	Muy Baja
Valles aluviales	de inundación	VVAa1	ASOCIACIÓN Urichaplud		Depósitos mixtos aluviales	0-15;15-35;35-X	Superficial	4,41	Extremadamente Acido	003	0,28	2,39	14,3	1,0	2,67	3,13	1,84	84,0	193,3	205,3	Muy Baja
Valles aluviales	de inundación	VVBaz	ASOCIACIÓN Urichaplud		Depósitos mixtos aluviales y coluviales	0-6,6-34,34-62, 62-84	Moderada limitada por nivel freático	4,53	Muy Fuertemente Acido	003	0,21	1,8	15,8	0,82	1,0	1,83	1,11	22,6	177,5	189,0	Muy Baja

Fuente: Geingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012. (1) Datos obtenidos durante el muestreo en campo y análisis de resultados de laboratorio.

#### 4.3.4.4 Interpretación biológica

Según las observaciones realizadas, a lo largo del perfil de suelos, se identifica que el contenido de microorganismos es de pocos a sin presencia; están limitados a ciempiés y, esporádicamente, alguna que otra lombriz de tamaño pequeño a mediano. La presencia de hongos e insectos y bacterias es limitada, debido a los datos bajos de pH.

Los organismos del suelo contribuyen en la formación y los cambios de la estructura física del suelo e influyen en la dinámica de los nutrientes por sus efectos sobre la inmovilización y humificación de la materia orgánica. En la Tabla 13 se presenta el número de individuos entre Nemátodos, Colémbolos y Sinfílicos encontrados en análisis de laboratorio, para las muestras de suelo correspondientes a las unidades de suelo. Es de anotar que pese a que se encontraron presencia de nematodos, sinfílicos y colémbolos en todas las calicatas, solo en algunas (LVBbc1 y LVAdc2- PH) de ellas la población de esta edafofauna puede causar daño de acuerdo a su cantidad.

La mayor parte de los individuos hallados (entre 98 y 99%) corresponde a especies de nemátodos, siendo más frecuentes las especies Rhabditissp, Criconemasp, y Meloidogynesp. Las especies de nematodos fitoparasitarios que se hallaron corresponden a Pratylenchussp, Pratylenchussp, Cricoinemasp, Meloidogynesp, Aphelenchussp, Atylenchussp, Pratylenchussp y Dytlenchussp.

En lo referente a macroorganismos, los individuos más frecuentes en el suelo fueron lombrices, ciempiés y termitas, en su orden, los cuales contribuyen a la activación de la microflora edáfica, al ciclaje de carbono y a la disponibilidad de nutrientes.

Tabla 13. Presencia de edafofauna

UNIDAD DE SUELO	EDAFOFAUNA (IND/250CM3)	PRESENCIA DE FITOPARÁSITOS
AVAab1	200	Si
LVAdc2-TH	250	Si
LVAdc2-PH	425	Si
LVBbc1	725	Si
VVAaz	100	Si
VVBaz	200	Si

Fuente: Geingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

## 5. METODOLOGÍA

El suelo, se puede degradar al acumularse en él, sustancias a unos niveles tales que repercuten negativamente en el comportamiento de los suelos. Las sustancias, a esos niveles de concentración, se vuelven tóxicas para los organismos del suelo. Se trata pues de una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo.<sup>45</sup>

Actualmente, el hombre dispone directamente sobre el suelo, de alguna u otra manera, aguas residuales, residuos sólidos, agroquímicos y plaguicidas (organoclorados y organofosforados) entre otras; sin dimensionar las futuras alteraciones de las variables físicas, químicas y biológicas de los mismos.

Esta acumulación puede ser natural, como en el caso de los suelos de la zona de estudio, donde los suelos son de origen sedimentario, depositados en un ambiente de transición marino-continental, plegadas y falladas durante la orogenia del Terciario y cubiertas por extensos y potentes depósitos del Cuaternario de origen fluvial, fluvio-marino y lacustre. Estas características, hacen que las concentraciones de bases y el grado de alcalinidad presenten condiciones salino sódicas; en donde, en algunos casos, no son favorables para el desarrollo de especies animales y vegetales.

La elaboración del procedimiento para la identificación de áreas menos afectadas por el vertimiento de aguas residuales derivadas de los lodos de perforación, requirió labores de tipo investigativo y técnico que permitieron identificar de manera acertada los criterios a tener en cuenta, en el procesamiento de los datos y una correcta interpretación de los resultados obtenidos; lo cual se logró a través del seguimiento de las siguientes etapas:

### 5.1 ESTRUCTURACIÓN METODOLÓGICA

A partir del planteamiento del problema, se realiza la estructuración metodológica que debe plantear las mejoras necesarias para captura, procesamiento y análisis de la información básica en la implementación de la investigación. En la elaboración de estudios ambientales se realiza un trabajo de investigación exhaustiva, donde se toman datos de campo y se describen con un nivel de detalle importante los elementos socio económicos y ambientales relevantes del área, sin embargo, por desconocimiento, éstos datos se subutilizan, pues son tomados únicamente para descripciones y análisis superficiales; en la presente investigación se propone la integración de diferentes herramientas que permitan combinar la información puntual con información espacial, generando así superficies que permitan la toma de decisiones más acertadas y ubicando espacialmente las zonas en donde se van a realizar las actividades relacionadas con el proyecto.

Se proponen específicamente cuatro etapas en el desarrollo de la investigación; la primera se refiere al trabajo de campo, en donde se tomarán las muestras de cada unidad de suelos, realizando los análisis de laboratorio pertinentes, en la segunda etapa se

---

<sup>45</sup> <http://edafologia.ugr.es/conta/tema11/concep.htm>

simulará el comportamiento de las aguas vertidas en cada tipo de suelo según las características físicas de las unidades de suelos resultado de los análisis de laboratorio, la tercer etapa será llevar los datos obtenidos en el modelamiento a superficies a través de la aplicación del módulo de geoestadística de ARCGIS, y finalmente en la cuarta etapa se analizarán las unidades presentes en cuanto hidrogeología, suelos y capacidad de infiltración, a las cuales se les dará una valoración y un peso llegando a una zonificación que permita identificar las áreas menos afectadas en el vertimiento de aguas residuales industriales.

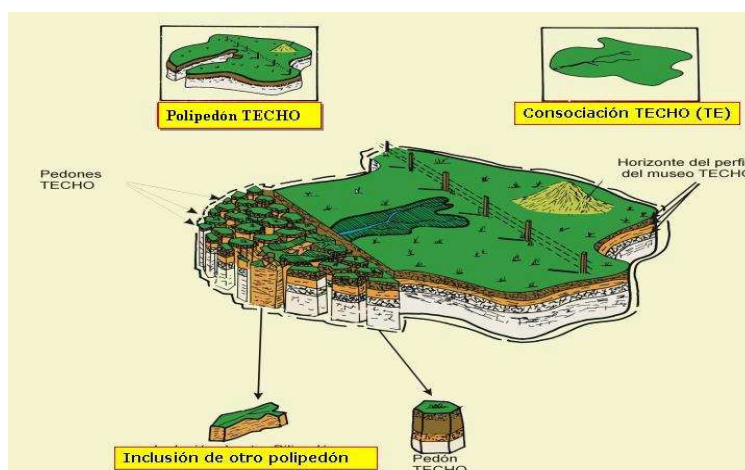
### 5.1.1 Etapa 1. Elaboración de trabajo de campo<sup>46</sup>

En esta etapa no fue posible realizar el trabajo de campo por las autoras de la investigación, debido a protocolo HSEQ y perfiles exigidos por la autoridad ambiental, para la realización de este tipo de actividad, por lo cual se conto con la colaboración del Ingeniero Agrologo Willian Rosero.

El trabajo de campo se inicia con un recorrido general del área en la que se va a ejecutar el levantamiento, para evaluar la funcionalidad de las áreas piloto y los transectos, realizar los ajustes necesarios a los transectos establecidos y familiarizarse con la infraestructura de la zona; es recomendable hacer observaciones de los ambientes edafogénéticos, incluidas algunas descripciones de los perfiles de suelos.

El reconocimiento de campo consiste en recorrer la zona piloto haciendo observaciones detalladas y de comprobación, ajustando los límites de la interpretación y según la homogeneidad del terreno (ver Figura 18).

Figura 18. Fase de levantamiento de suelos



Fuente: Tomado de <http://www.diarioinformacion.com/elche/2010/03/10/principal-problema-agricultura-productos-venden-baratos/987411.html>

<sup>46</sup> METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUELOS, EN LOS ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL – EIA, PÁEZ MENDOZA, Raúl, 2011.

Las observaciones de identificación (ver Fotografía 11), se realizan para establecer las características necesarias para clasificar el suelo. Son perforaciones rectangulares de 50 X 50 X 50 cm para estudiar el horizonte B, si existe. La observación, se completa hasta 120 cm o más, con la utilización del barreno.

Fotografía 11. Observaciones de identificación (cajuelas)



Fuente: Geingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Las observaciones de comprobación (ver Fotografía 12), se llevan a cabo con el barreno que permiten la identificación de las clases de suelos (unidades taxonómicas), definidas previamente mediante las observaciones detalladas; es importante la toma de aquellos datos que posteriormente ayuden a definir la(s) fase(s), estas observaciones se agrupan de acuerdo con las normas que la taxonomía Americana suministra para configurar los respectivos subgrupos.

Fotografía 12. Observaciones de comprobación (barrenadas)



Fuente: Geingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

Las observaciones de descripción (ver Fotografía 13), se utilizan, tanto para describir en forma muy completa las características internas y externas de los pedones que conforman las unidades cartográficas, como para el muestreo de los horizontes o capas que integran

el perfil de suelo (ver Figura 19). Estas descripciones sirven para caracterizar el concepto modal de las unidades taxonómicas, tal como es la realidad de campo.

Es importante tener en cuenta que el número de observaciones por unidad de área oscila entre 12 a 20 observaciones por cada 100 ha. El 60% de las observaciones son de identificación (cajuela) y el 40% de comprobación (barreno).

Además dentro del levantamiento se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las observaciones detalladas, en las unidades determinadas por interpretación de imágenes, incluyen una clasificación taxonómica tentativa, hecha en el campo.

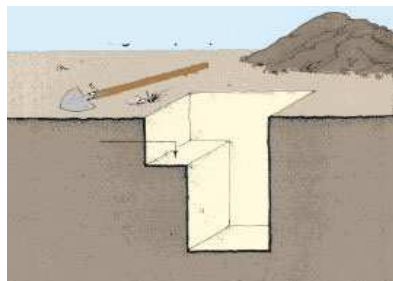
Fotografía 13. Observaciones de descripción (calicatas)



Fuente: Geoingeniería S.A.S., Estudio de Impacto Ambiental, Bloque Exploratorio Llanos 58, 2012.

- Todas las observaciones deben clasificarse hasta subgrupo; dando de todos modos una clasificación tentativa pero manteniendo el criterio para todo suelo similar. Luego se ajustarán con los datos de laboratorio. Después de haber establecido suficientes características accesorias y poder definir la clasificación con base en estas, se hacen solamente observaciones de identificación.

Figura 19. Vista lateral de la calicata



Fuente: Tomado de <http://www.mapfre.com/fundacion/html/revistas/seguridad/n117/articulo3>.



- Al final del levantamiento, se escogen y describen calicata de los perfiles modales de todas las unidades; se toman muestras de los horizontes por perfil, para análisis de caracterización física y química. En áreas de difícil acceso el muestreo deberá efectuarse en forma casi simultánea al levantamiento mismo.

En síntesis para cada una de las unidades de paisaje delimitadas se determina:

- Patrón de distribución de los suelos.
- Relación paisaje-suelo
- Unidades cartográficas y su composición.
- Perfiles modales y su descripción
- Clasificación de los suelos al nivel taxonómico de subgrupo

#### 5.1.1.1 Análisis de laboratorio

Para cada uno de los horizontes identificados en campo, se realizó los análisis fisicoquímicos correspondientes a textura, densidad real y aparente, conductividad hidráulica, estabilidad estructural, retención de humedad (PMP, CC y SAT); y los análisis químicos, aunque se realizaron, estos no hacen parte del desarrollo de esta investigación.

#### 5.1.2 Etapa 2. Simulación comportamiento del vertimiento

##### 5.1.2.1 Datos suministrados para la simulación

###### **a. Datos climáticos**

Los datos climatológicos utilizados, corresponden a la Estación de Cejalito, identificada por el IDEAM con el código 35137010, ubicada en el municipio de Puerto López, departamento del Meta, referidos a precipitación y evapotranspiración diaria del año 2010.

###### **b. Datos para el flujo de agua sin solutos**

Es importante mencionar, que la serie de datos climáticos fueron incluidos a escala diaria, por un período de un año. Además, para llevar a cabo la simulación, al programa se le suministraron las variables relacionadas tanto con el flujo de agua (precipitación, evapotranspiración, caudales típicos de vertimiento, profundidad de cada horizonte, textura, densidad aparente).


###### **c. Variables edáficas y perfil del suelo**

Con base en la caracterización, tanto de campo como de laboratorio, que se llevó a cabo para el diagnóstico de los suelos de la zona, se seleccionaron algunas variables edafológicas e hidráulicas, con el fin de “alimentar” el modelo HYDRUS-1D.

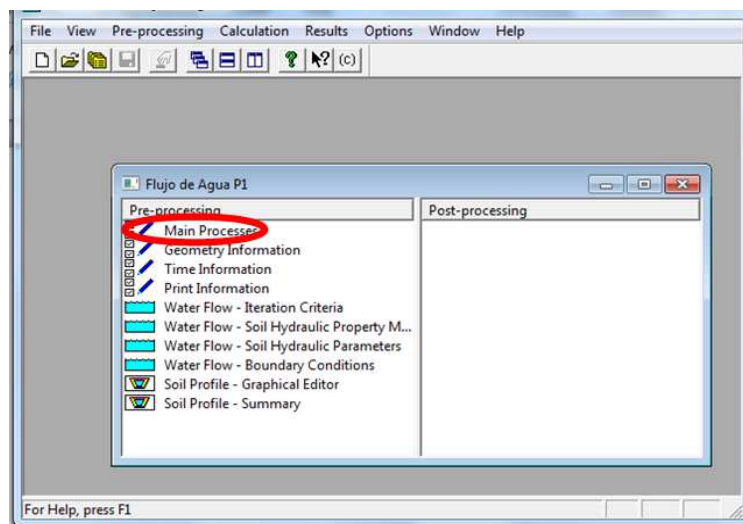
### 5.1.2.2 Implementación de la modelación

Para la simulación se considero únicamente el flujo vertical del agua en el suelo y se asumió que los agentes contaminantes viajan mezclados con el agua, por lo tanto su presencia en el suelo depende del movimiento del fluido.

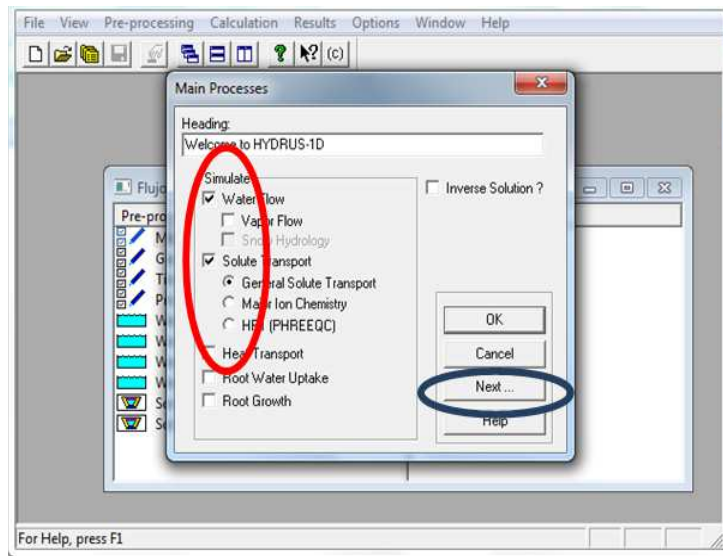
A continuación, se presenta un paso a paso de cómo se realizó el ingreso de datos al programa para simular el flujo de agua en la zona no saturada, para lo cual se tiene en cuenta los siguientes símbolos para interpretar las acciones correspondientes:

 =para continuar  
=datos insertados y seleccionados

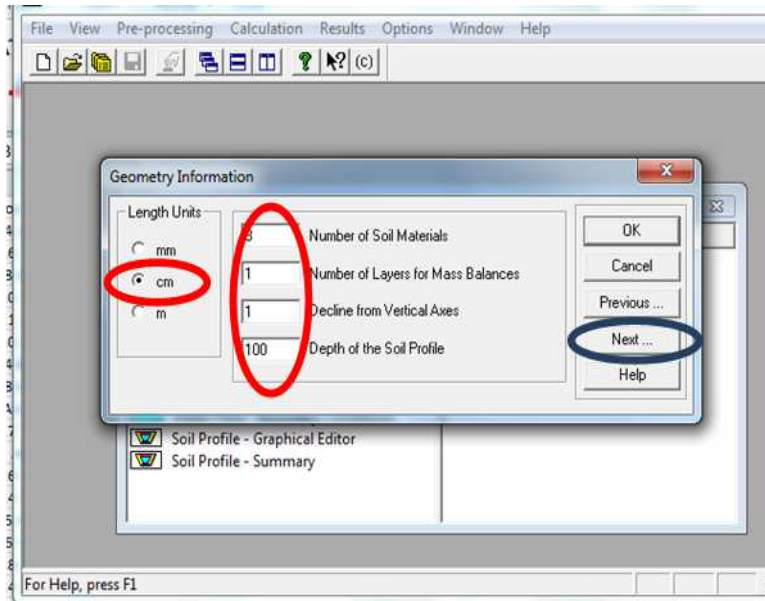
- Luego de abrir el programa se inserta el nombre y se realiza la descripción del proyecto para poder ubicarlo después en la base de datos.
- Para iniciar la modelación se da click en MainProcesses



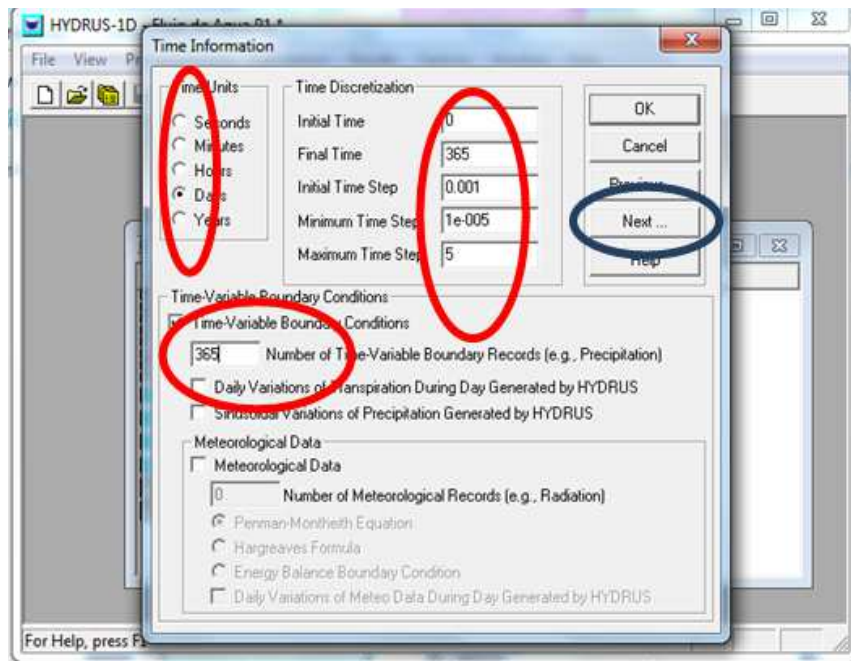
- Se selecciona la opción Water Flow y soluted transport (general solut transport), para definir que es lo que se va a modelar en este caso el flujo de agua y el transporte de un soluto que se desplaza con el agua.



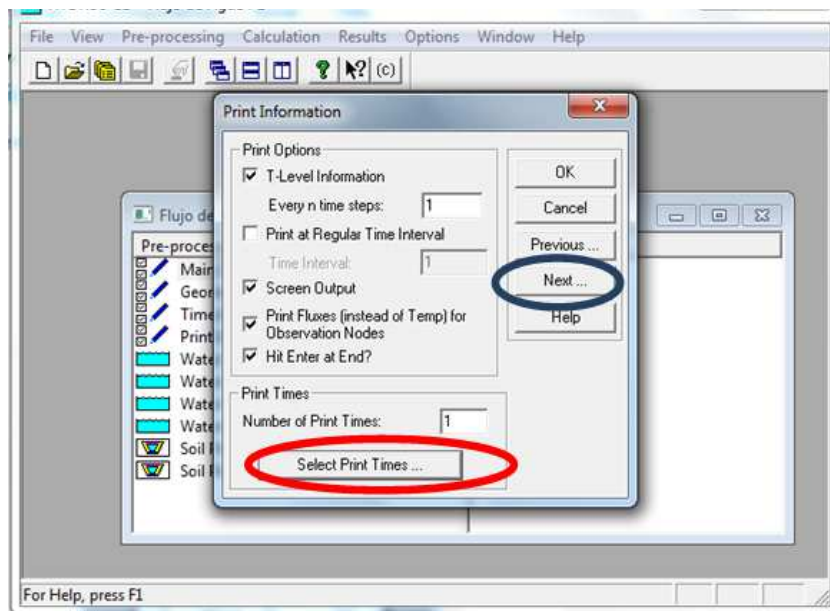
- d) Se seleccionan las unidades de medida, los tipos de material del suelo, la inclinación del perfil al que se quiere realizar la modelación y la profundidad del mismo.

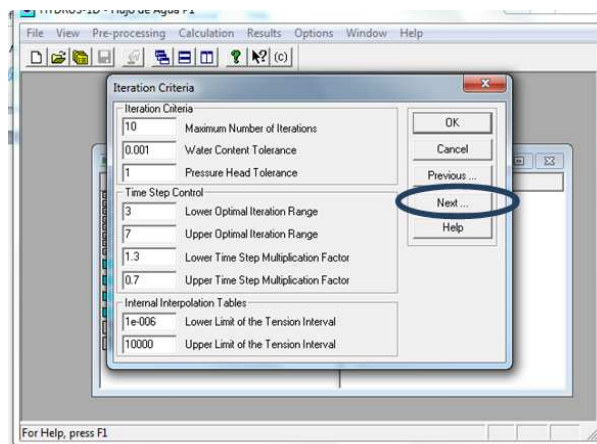


- e) Se ingresa la unidad de medida de tiempo y el número de datos de precipitación.

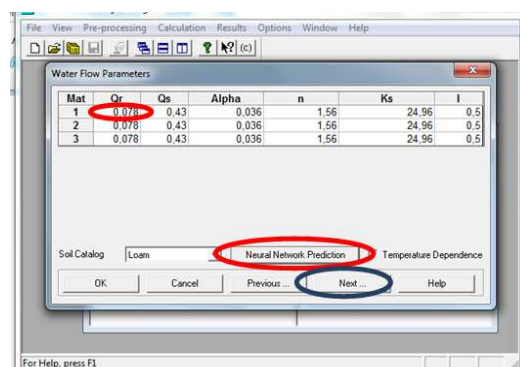
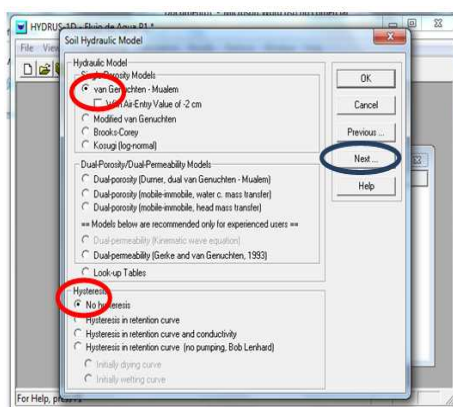


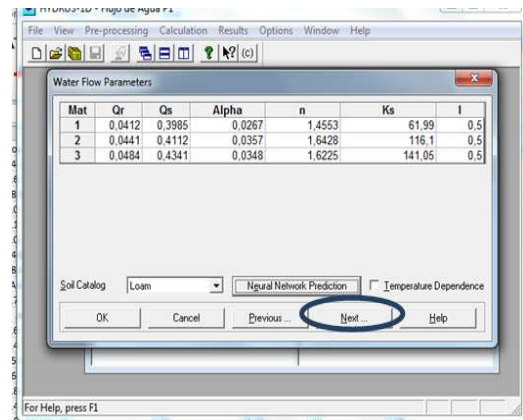
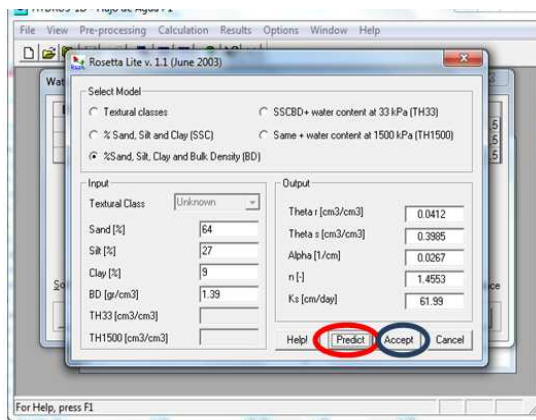
- f) Se seleccionan el número de tiempos de impresión o generación de información, de acuerdo a los datos y lo que se requiere en este caso el número de datos de precipitación (número de días).



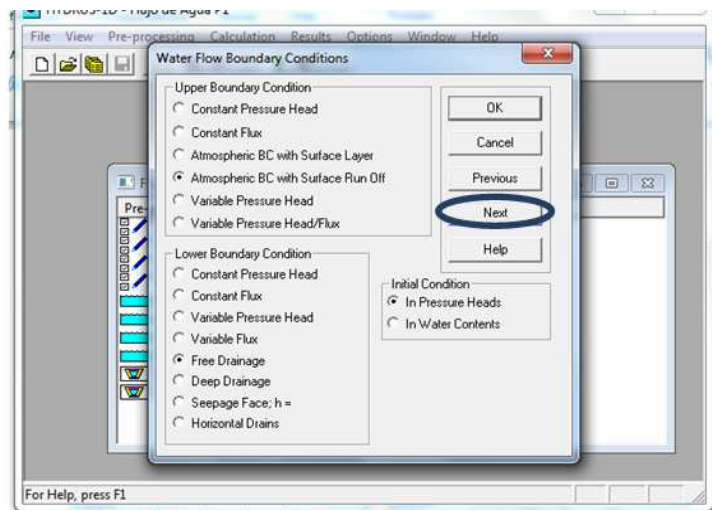


g) Se selecciona el modelo hidráulico con el que se va a trabajar, posteriormente se ingresan los datos de las texturas del suelo (Limo, Arena y Arcilla), y la densidad aparente; esto por cada horizonte, del perfil estudiado. Se predice y se aceptan los datos calculados por el programa.



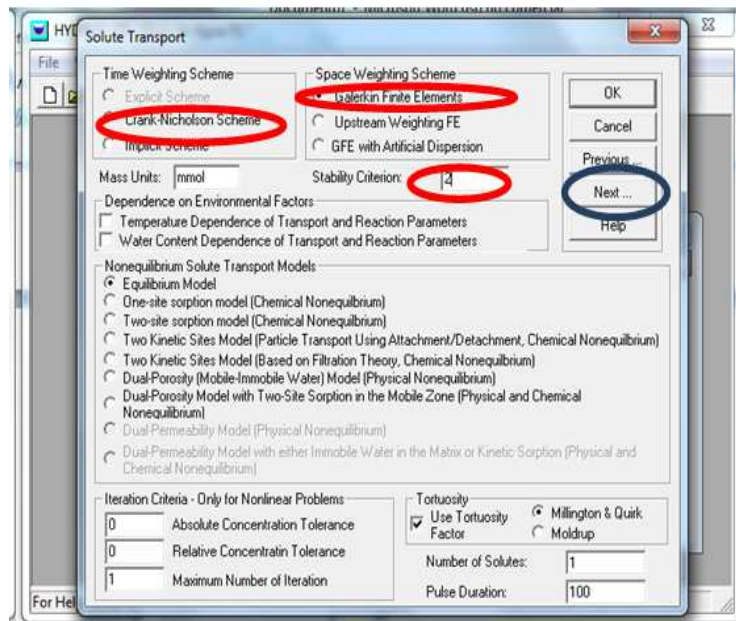


- h) Se definen las condiciones de los límites superior e inferior, en el superior para el caso se selecciona atmosphericbc with surfacerun off (atmosférica con escorrentía superficial), y en el inferior Free Drainage (drenaje libre).

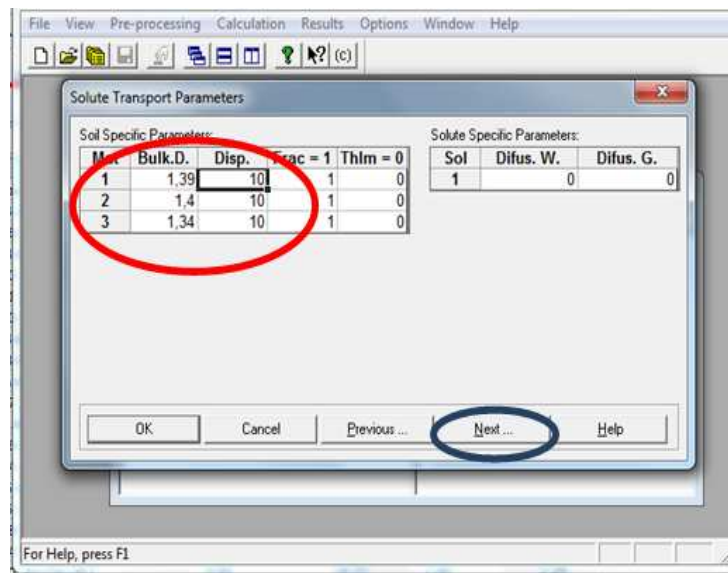


- i) Se seleccionan el tipo de ponderación tiempo y el espacio, el criterio de estabilidad, la medida de masa y el número de solutos a modelar.

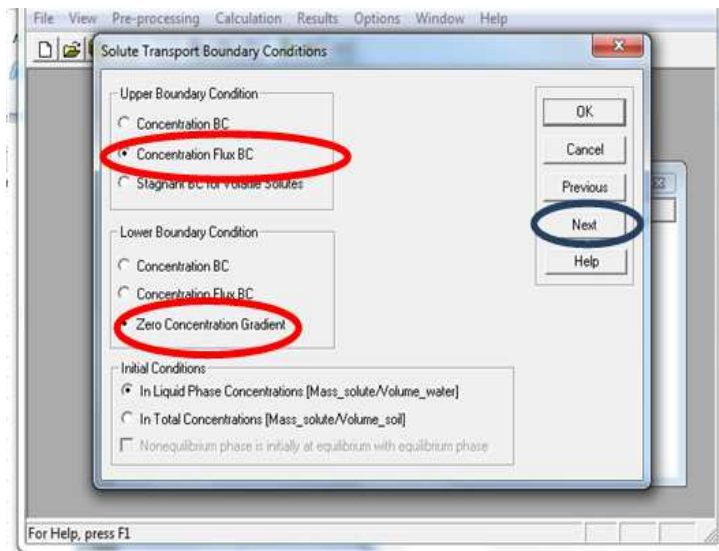




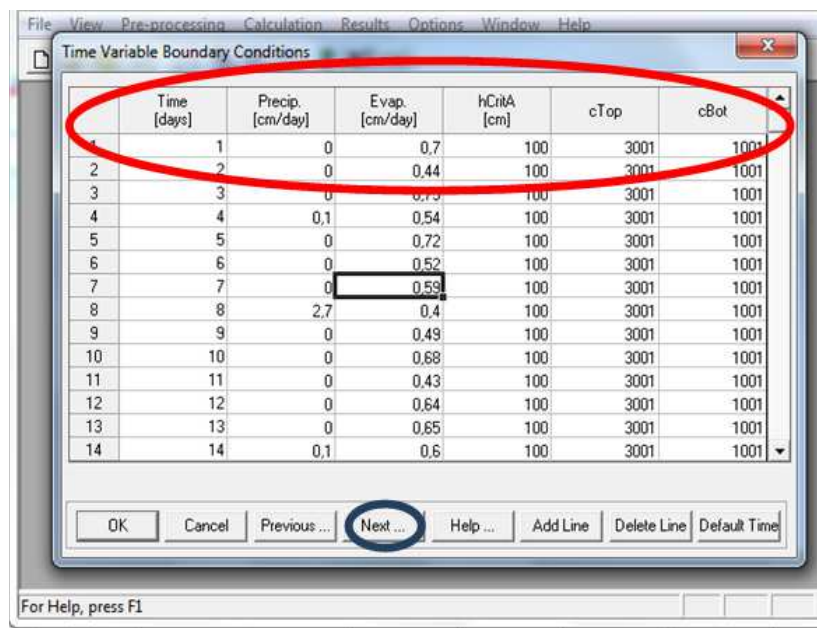
j) Se ingresan los datos de densidad que se han calculado en cada horizonte del perfil analizado.



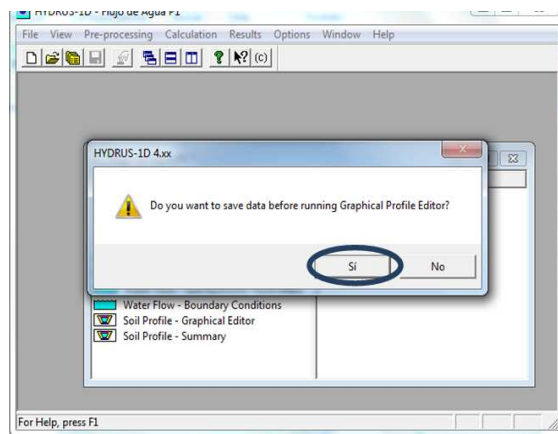
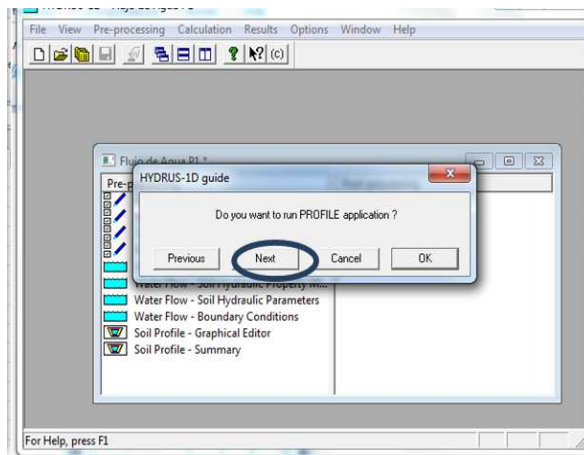
k) Se definen las condiciones del límite superior e inferior del soluto para su transporte.



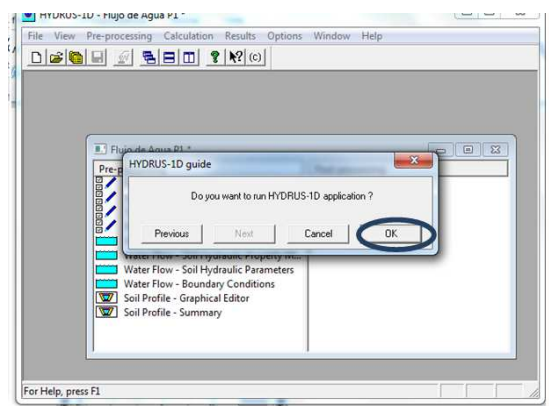
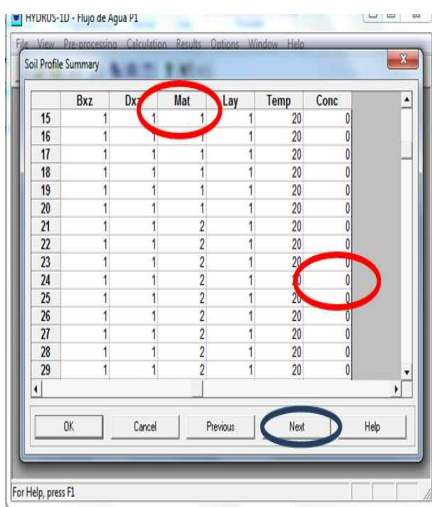
- l) Se ingresan los datos de precipitación, según el número de días para el análisis, los datos de la evaporación diaria, igual para el número de días establecido, el hCriteria, y las condiciones del límite superior e inferior (datos por defecto).



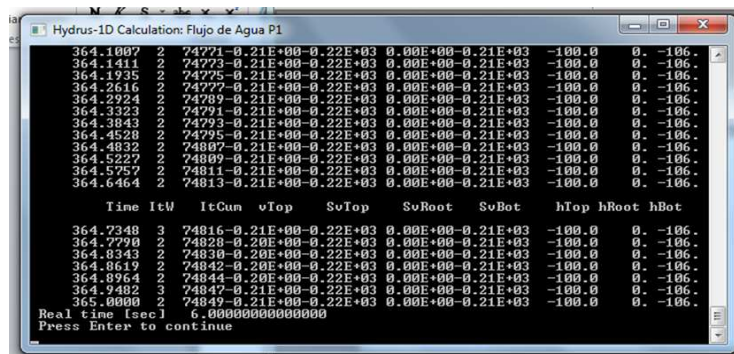
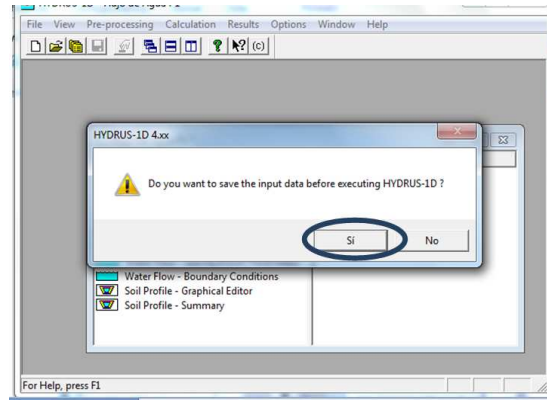




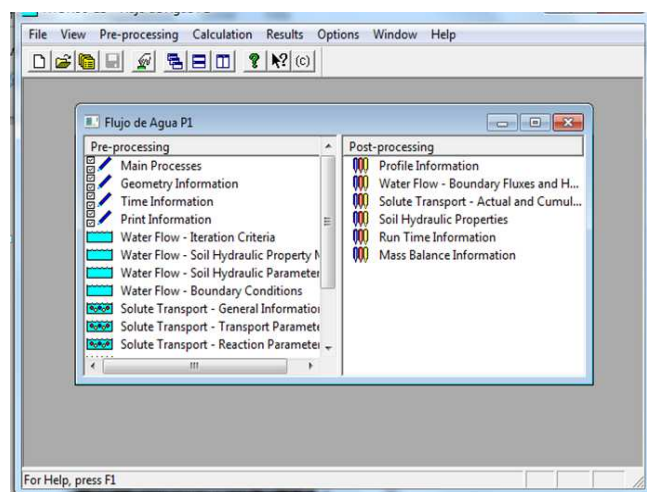
m) Se ingresa las dimensiones de profundidad de cada uno de los horizontes analizados en cada muestreo de suelos.

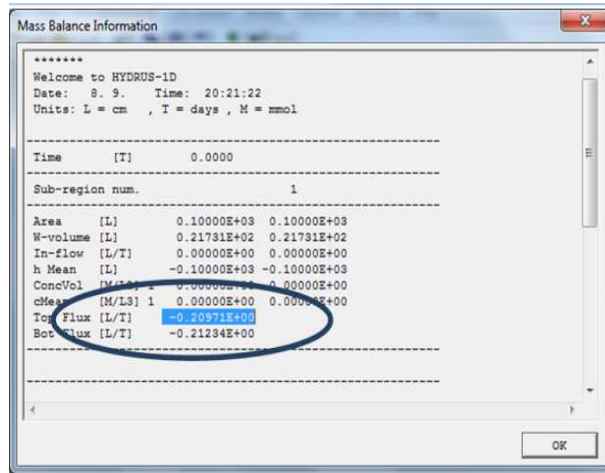


n) Se aceptan los cambios para efectuar el modelo, y este se genera.



o) Después de correr el proceso, se puede observar en el panel derecho de la ventana inicial del programa el resultado del post processing, en donde se identifican algunas graficas que representan el comportamiento del soluto en el agua. Además arroja los datos puntuales de cada modelo, que son los que posteriormente se utilizaran para realizar la espacialización de diferentes criterios.





Luego de correr los modelos para cada muestra de suelo se obtienen los siguientes datos:

Tabla 14. Datos arrojados en la simulación del comportamiento del flujo. Hydrus1D

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Area	Longitud del flujo en un área específica
W-Volume	Volumen de Agua del flujo en un área específica.
InFlow	Flujo de entrada / flujo de salida hacia / desde el flujo completo o una subregión especificada
hMean	La media de altura de presión en el flujo completo o de una subregión específica
TVol	Cantidad de calor en el flujo completo o en una subregión especificada [MT <sup>2</sup> ].
TMean	La temperatura media en el flujo completo o una subregión específica. [K].
ConcVol	Cantidad de soluto en el flujo completo o una subregión específica [ML-2] excluyendo ConcVollm. Esta variable se da para todos los solutos del 1 al NS.
ConcVollm	Cantidad de soluto en el flujo completo, o en una subregión específica, ya sea adsorbida en el tipo-2 (cinética) o en sitios donde la adsorción del líquido sea en la región inmóvil [ML-2]. Esta información es para todos los solutos del 1 al NS.
cMean	La media de la concentración en el flujo completo o una subregión específica [ML-3]. Esta información es para todos los solutos del 1 al NS.
Top Flux	Flujo real de la superficie [LT-1] (infiltración / evaporación: - / +).
Bot Flux	Flujo real a través de la parte inferior del perfil del suelo [LT-1] (entrada / salida: + / -).
WatBalT	Error absoluto en el balance de masas del flujo total del agua [L].
WatBalR	Error relativo en el balance de masas del de flujo completo del agua [%].
CncBalT	Error absoluto en el balance de masas del soluto en el caudal [ML-2]. Esta información es para todos los solutos del 1 al NS.
CncBalR	Error relativo en el balance de masas de soluto en el caudal [%]. Esta información es para todos los solutos del 1 al NS.

Fuente: Autores.

### 5.1.3 Etapa 3. Aplicación de métodos geoestadísticos para la espacialización de datos

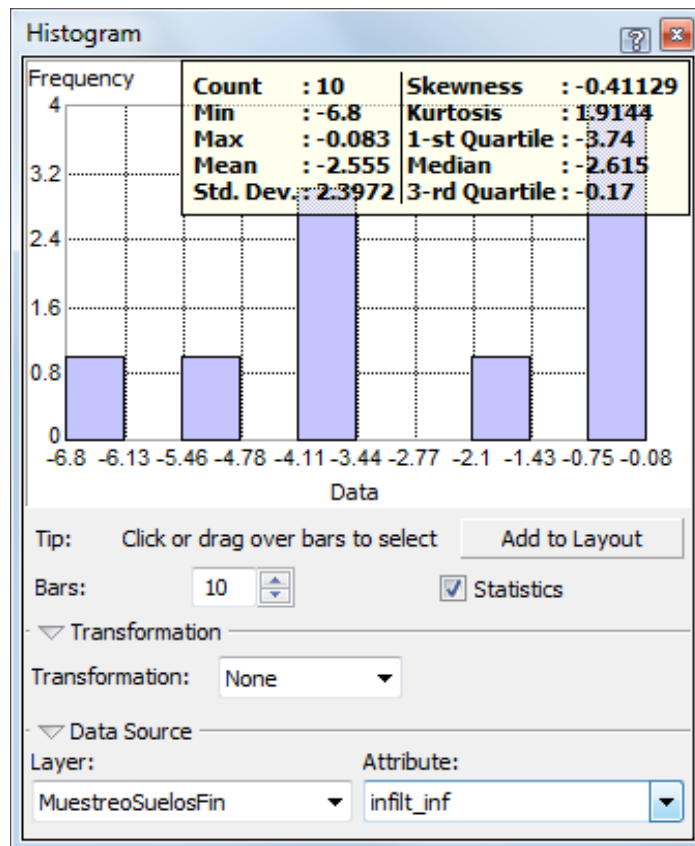
La geoestadística permite modelar, mediante el uso de variogramas, con el objeto de estimar, a través del Kriging, valores en posiciones no muestreadas o promedios espaciales relativos a una longitud, área o volumen definidos. El Kriging es un modelo de regresión usado con datos irregularmente espaciados en coordenadas de 1, 2 o 3 dimensiones. De acuerdo con Myers (1991), en la aplicación de técnicas de Kriging, se pueden identificar los siguientes pasos:

- a) Análisis exploratorio estadístico de los datos
- b) Estimación y modelado de la función que cuantifica la correlación espacial.
- c) Uso de la función de correlación espacial para determinar la serie de ecuaciones lineales que determinan los pesos del estimador de Kriging.
- d) Generación de los valores estimados y las estimaciones de desviaciones estándar (minimizadas) asociadas.

Los resultados se utilizan como entradas para un paquete de áreas, de manera que se pueden obtener intersecciones y regiones con características similares incluyendo otras importantes variables para la determinación de áreas que puedan ser más o menos afectadas por el vertimiento de aguas residuales industriales.

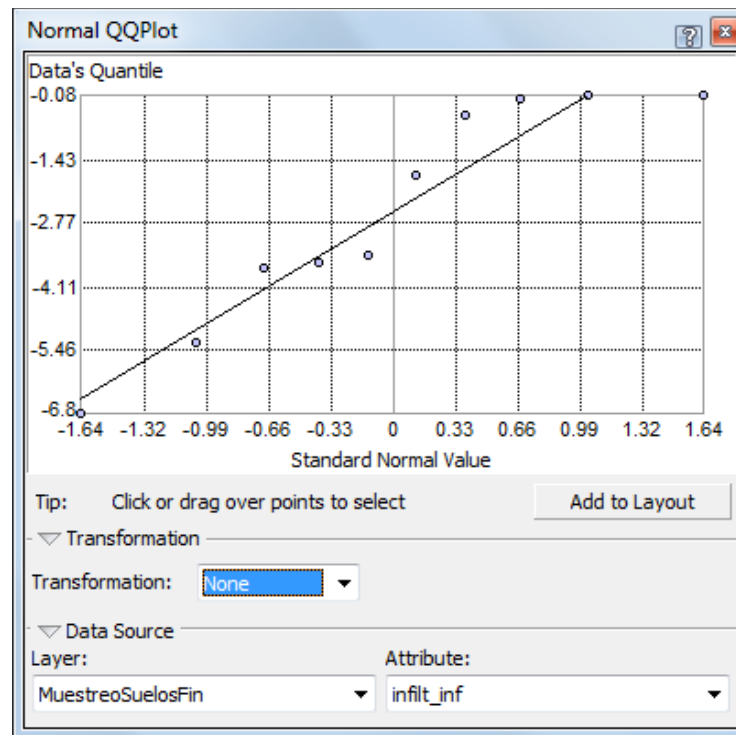
A continuación, se presenta un paso a paso del análisis geoestadístico en el software ARCGIS 10.0. Para el ejercicio se utilizaron los datos del Flujo real de la superficie (TopFlux) y el flujo real a través de la parte inferior o permeabilidad (Bot Flux) para interpolar estos datos y correlacionarlos con otras variables importantes en la determinación de las áreas que se verían menos afectadas por el riego por aspersión de las aguas industriales derivadas de los lodos de perforación.

- a) Análisis estadístico de los datos: Los métodos de interpolación que se utilizan para generar una superficie arrojan los mejores resultados si los datos se distribuyen normalmente (una curva en forma de campana). Si los datos están inclinados, se puede optar por transformarlos, para que la distribución sea normal. Por lo tanto, es importante conocer la distribución de estos antes de la creación de una superficie. El histograma de frecuencia para los atributos del conjunto de datos, lo que permite examinar el univariante (una variable) de distribución para cada atributo del conjunto de datos. A continuación, se estudiará la distribución de los datos derivados del modelo realizado con anterioridad.



Para el Histograma los valores del eje x-han sido reajustada por un factor de 10 para hacerlos más fáciles de leer. La distribución de los valores está representado en el histograma con el rango de valores se dividen en 5 clases. La frecuencia de los datos dentro de cada clase está representada por la altura de cada barra. En general, las características importantes de una distribución son su valor central, dispersión y simetría. Como una comprobación rápida, si la media y la mediana son de aproximadamente el mismo valor, se tiene una evidencia de que los datos puedan ser distribuidos normalmente. El histograma de los datos de la capa de indica que los datos es unimodal (una joroba) y la tendencia no es clara. Sin embargo los datos están cerca de una distribución normal.

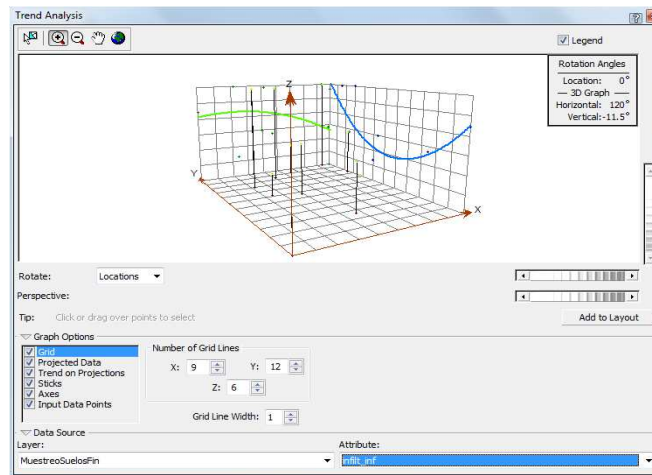
El cuantil-cuantil (QQ) trama se utiliza para comparar la distribución de los datos a una distribución normal estándar, proporcionando así otra medida de la normalidad de los datos. Cuanto más cerca de los puntos a la recta (45 grados) de la línea en la gráfica, la muestra sigue una distribución normal.



Del diagrama QQplot, se puede ver que la trama es muy cerca de ser una línea recta, por lo cual no es necesario transformar los datos para hacer una distribución normal antes de usar las técnicas de interpolación kriging.

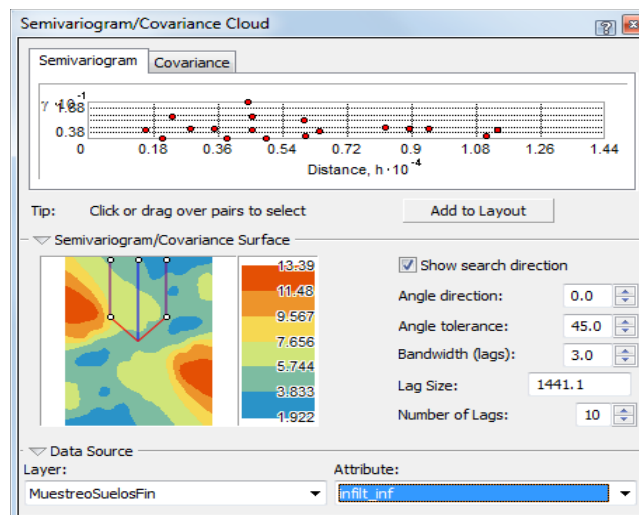
Si existe una tendencia en los datos, los componentes de una superficie que pueden ser representados por una fórmula matemática. Por ejemplo, una ligera colina, puede ser representada por un plano. Un valle estaría representado por una fórmula más compleja (un polinomio de segundo orden) que crea una forma de U. Esta fórmula puede producir la representación de la superficie que desee.

La herramienta de análisis de tendencias permite identificar la presencia / ausencia de las tendencias en el conjunto de datos de entrada y de identificar el orden del polinomio se ajusta a la tendencia mejor.



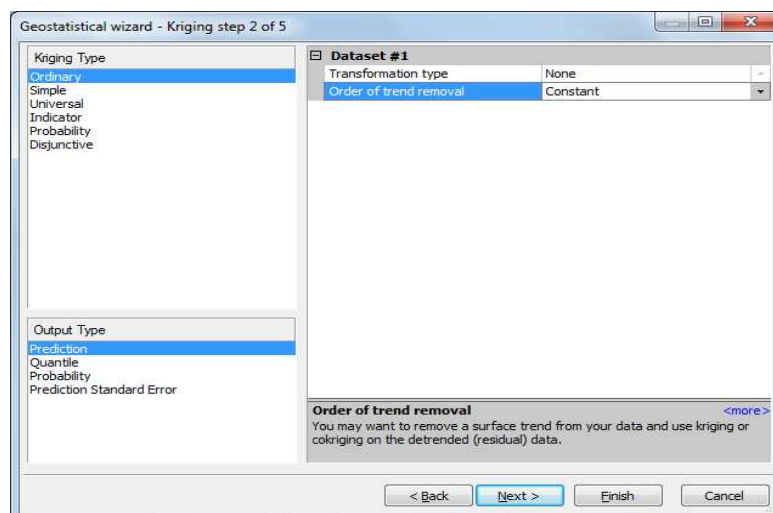
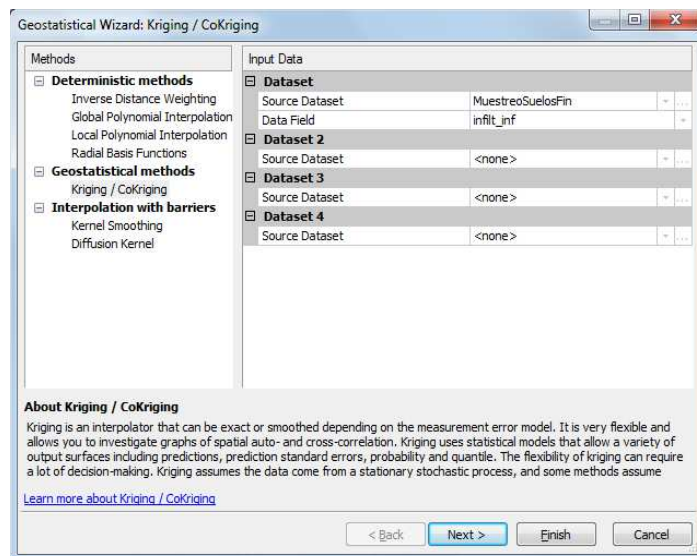
Cada barra vertical en el gráfico de análisis tendencia representa la ubicación y el valor (altura) de cada medición. Los puntos de datos se proyectan en los planos perpendiculares. Una línea de mejor ajuste (un polinomio) se dibuja a través de los puntos proyectados, mostrando las tendencias en direcciones específicas. Si las líneas fueran planas, esto indicaría que no hay una tendencia.

El semivariograma y/o covarianza permite examinar la autocorrelación espacial entre los puntos de muestra medidos. Se asume generalmente que si están cerca uno de otro son más parecidos. El semivariograma / covarianza permite examinar esta relación. Para ello, un valor de semivariograma, que es la diferencia al cuadrado entre los valores de cada par de lugares, se traza en el eje Y con relación a la distancia que separa cada par de mediciones, que se traza en el eje X.

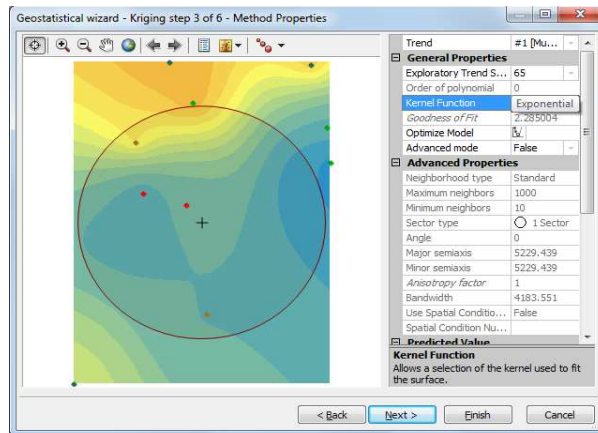


La dirección del puntero determina qué pares de ubicaciones de datos se trazan en el semivariograma. Por ejemplo, si el puntero se enfrenta a una dirección de sur a norte, sólo los pares de ubicaciones de datos que se encuentran al sur o al norte del uno al otro se representan en el semivariograma.

- b) Generación de los valores estimados: A partir de la exploración de los datos, se descubrió una tendencia Gaussiana. Después de refinamiento con la herramienta de análisis de tendencias, se determinó que un polinomio de segundo orden parecía razonable. Esta tendencia puede ser representado por una fórmula matemática. La tendencia se añadirá automáticamente de vuelta antes de que la superficie final es creada para que las predicciones puedan producir resultados significativos.



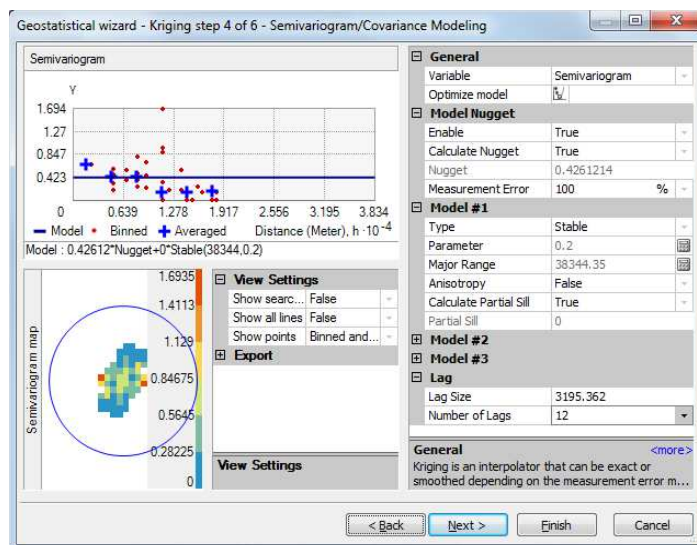


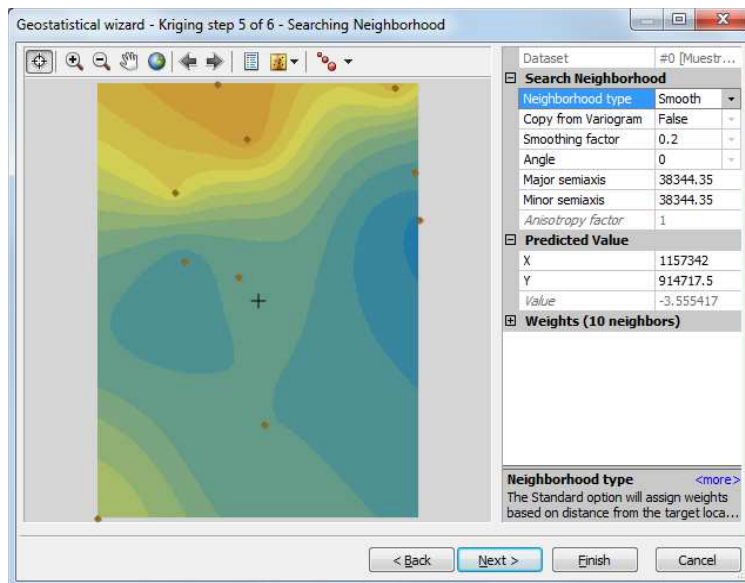


De forma predeterminada, Analisis Geostatistical asigna la tendencia Gaussiana en el conjunto de datos. Una influencia direccional afectará a los puntos del semivariograma y el modelo que se encajan. En ciertas direcciones, las cosas que están más cerca entre sí pueden ser más parecidas de lo que en otras direcciones.

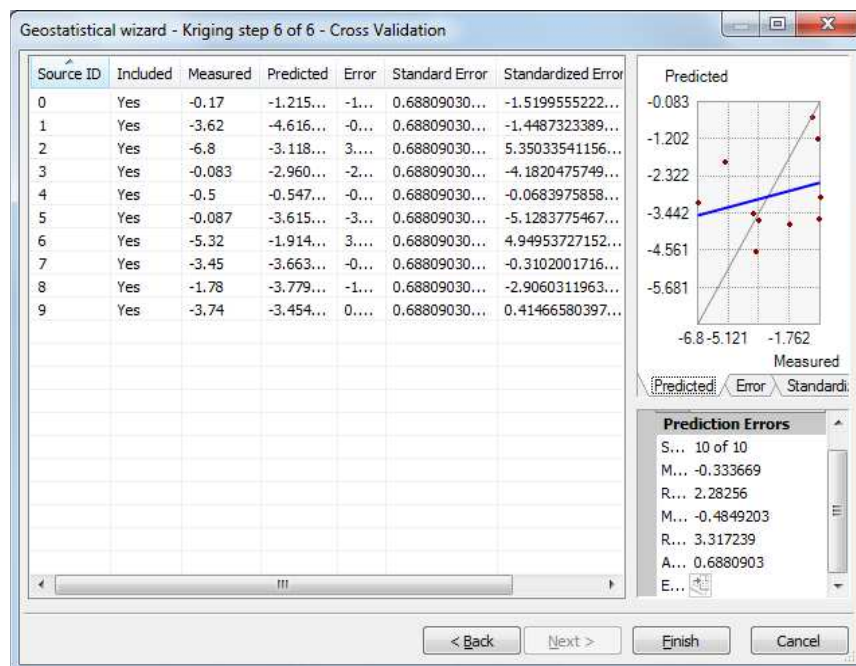
Analisis Geostatistical puede dar cuenta de las influencias direccionales y anisotropía en el modelo de semivariograma. Anisotropía puede ser causada por el viento, la escorrentía, una estructura geológica, o una amplia variedad de otros procesos. La influencia direccional puede ser estadísticamente cuantificada y contabilizados al hacer el mapa.

Se puede explorar la disimilitud en los puntos de datos para una determinada dirección con la herramienta de dirección de búsqueda. Esto permite examinar las influencias de dirección en la tabla semivariograma. No afecta a la superficie de salida. Los pasos siguientes muestran cómo lograrlo.

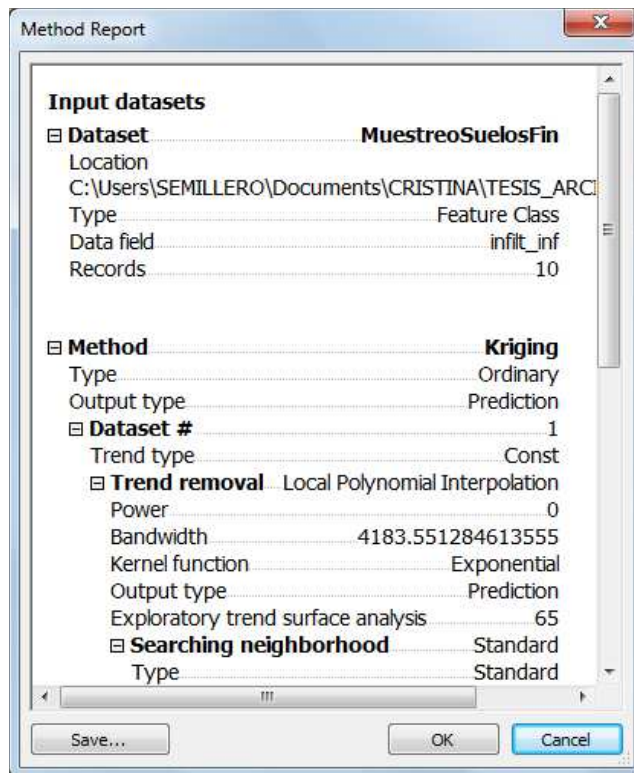




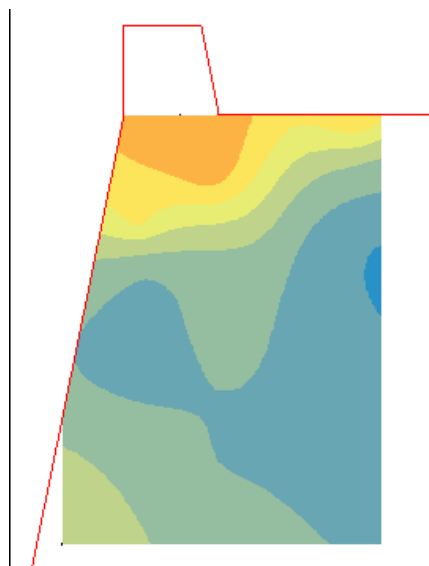
Antes de que realmente crear la superficie, se utiliza el cuadro de diálogo Cross Validation para realizar diagnósticos en los parámetros y determinar lo bien que será el modelo.



El Informe del cuadro de diálogo proporciona un resumen del modelo que será usado para crear una superficie.



Y el resultado final será la superficie que se genera a través del modelo identificado y modificado.



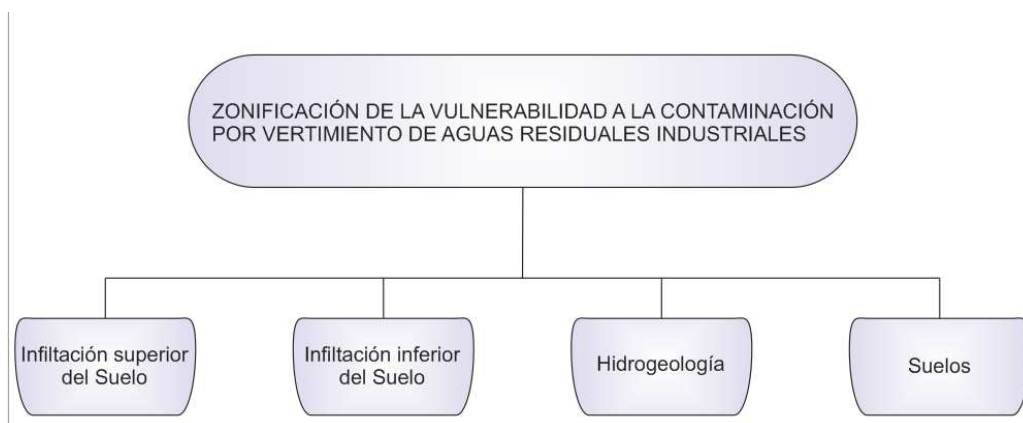
#### 5.1.4 Etapa 4. Zonificación para la determinación de áreas menos afectadas en el riego por aspersión de aguas residuales industriales en sector de hidrocarburos

Las ponderaciones o calificaciones de cada uno de los parámetros considerados en la presente guía se efectúa con fundamento en el conocimiento, experticia y criterio de cada uno de los especialistas que participan en la elaboración de los estudios ambientales, de tal manera que cada componente será medido bajo el mismo criterio y escala de valores que posea cada profesional, garantizando de esta manera el empleo de un mismo patrón para cada componente. Es importante mencionar que los parámetros y ponderaciones consideradas dentro de la metodología pueden ser modificados a criterio de cada profesional o especialista y de acuerdo a las condiciones específicas del área de estudio.

Aunque existen múltiples variables para determinar la vulnerabilidad de una zona a la contaminación por actividades antrópicas relacionadas con el sector de hidrocarburos, desde el punto de vista físico, en esta metodología, la zonificación busca integrar espacialmente (4) variables consideradas de mayor significancia, a saber: Capacidad de infiltración del suelo superficial e inferior, tipo de unidad de suelo presente e hidrogeología superficial.

Dichas variables se pueden materializar a partir de la caracterización de los aspectos edafológicos e hidrogeológicos de la región en estudio (ver Figura 20).

Figura 20. Diagrama de variables a utilizar.



*Fuente:* Autores.

##### 5.1.4.1 Capacidad de infiltración del suelo

En la calificación de la variable de infiltración se establecen siete (7) rangos o categorías, cuyas características se describen a continuación:

Tabla 15. Valoración de vulnerabilidad de la capacidad de infiltración del suelo

VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (cm/h)	CALIFICACIÓN	VALORACIÓN VULNERABILIDAD
> 25.6	MUY RÁPIDA	5
12.6 – 25.5	RÁPIDA	Vulnerabilidad Alta
6.6 – 12.5	MODERADAMENTE RÁPIDA	3
2.1 – 6.5	MODERADA	Vulnerabilidad Media
0.6 – 2.0	MODERADAMENTE LENTA	1
0.2 – 0.5	LENTA	Vulnerabilidad Baja
< 0.1	MUY LENTA	

Fuente: Manual de clasificación de tierras para riego. 1993.

#### 5.1.4.2 Hidrogeología superficial

Con fundamento en las características hidrogeológicas de los diferentes cuerpos de roca que afloran a la superficie en una determinada región, junto con aquellas que son dadas por la permeabilidad de las unidades litológicas identificadas, son las que determinan el grado de captación o alimentación de los acuíferos, en concordancia con el comportamiento superficial del flujo de agua proveniente del ciclo hidrológico.

Considerando las anteriores variables se pueden diferenciar tres (3) tipos de zonas, las cuales pueden ser definidas o descritas de manera más detallada según sea el nivel de información con que se cuente y las particularidades geológicas e hidrogeológicas de la zona de estudio. Las categorías consideradas se describen de la siguiente manera:

- **Zonas de Mayor Interés hidrogeológico (5).** Corresponden a regiones de alta permeabilidad, ya sea primaria o secundaria, que alimentan formaciones geológicas de alta productividad, con capacidades específicas superiores a 1.1 lps/m, conformando acuíferos de gran importancia. Por su alto potencial hidrogeológico ya que son zonas de recarga hídrica, se debe tener un manejo especial.
- **Zonas de Moderado Interés hidrogeológico (3).** Son regiones de moderada permeabilidad, ya sea primaria o secundaria, que en función de los excesos del ciclo hidrológico y por efecto de la infiltración se convierten en escorrentía sub superficial o en su defecto alimentan acuíferos de mediana productividad, con capacidad específica entre 0.1 y 1.1 lps/m.
- **Zonas de Bajo Interés hidrogeológico (1).** Se encuentran en áreas de baja o nula permeabilidad (impermeables), sin posibilidad de infiltrar o alimentar acuíferos, donde el agua fluye superficialmente, considerada sin ninguna utilidad para el aprovechamiento de aguas subterráneas y actúan como zonas de escorrentía.

#### 5.1.4.3 Suelos

Para el tema de suelos se tomarán las unidades del tipo de relieve y dicho mapa nos proporcionará información de sectores críticos, sensibles o vulnerables desde el punto de vista físico, dentro del área de estudio. Para tal efecto se tendrán en cuenta los siguientes rangos de valoración que determinarán los niveles de sensibilidad correspondientes, tal como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Valoración de vulnerabilidad del componente suelos

PAISAJE	CLIMA	TIPO DE RELIEVE	Principales Características de los suelos	Unidades Cartográficas y Componentes Taxonómicos	Valoración de Vulnerabilidad
Lomerío Fluvio Gravitacional	Cálido Húmedo	Lomas	Moderadamente profundos a superficiales, texturas finas a moderadamente gruesas, bien a moderadamente drenados, fuerte a extremadamente ácidos, fertilidad baja; toxicidad por aluminio; baja susceptibilidad a la erosión.	ASOCIACION TypicHapludults, fase 7-12%, erosión moderada	3
		Lomas	Muy superficiales a superficiales, texturas finas a moderadamente gruesas, bien a moderadamente drenados, fuerte a extremadamente ácidos, fertilidad baja; toxicidad por aluminio; susceptibles a la erosión	COMPLEJO PetroferricHapludox, fase 12-25%, erosión media	Vulnerabilidad Media
		Lomas y colinas asociadas con glacis mixtos	Profundos, texturas moderadamente finas a gruesas, bien drenados, fuerte a muy fuertemente ácidos, fertilidad baja, toxicidad por aluminio, susceptibles a la erosión	ASOCIACION TypicHapludox, fase 3-12%, erosión ligera Oxycystropepts, fase 3-7%, erosión ligera	
Altiplanicie Estructural	Cálido Húmedo	Mesas y superficies onduladas	Profundos a superficiales, texturas gruesas a moderadamente gruesas, bien a excesivamente drenados, muy fuerte A medianamente ácidos, fertilidad baja; toxicidad por aluminio	ASOCIACION OxicDystropepts, fase 1-7% TypicTropopsamments, fase 3-7%	3 Vulnerabilidad Media
		Plano de inundación	Superficiales a moderadamente profundos, texturas variadas de finas a gruesas, imperfecta a pobremente drenados, fuerte a extremadamente Ácidos, fertilidad baja; susceptibilidad a inundaciones y encharcamientos	ASOCIACION OxyaquicDystropeptsPli nthicTropaqueptsTypicP inthaquepts	5 Vulnerabilidad Alta
Valles	Cálido Húmedo	Vallecitos coluvio - aluviales	Superficiales a moderadamente profundos, texturas moderadamente gruesas a moderadamente finas, imperfecta a pobremente drenados, muy fuerte a extremadamente ácidos, fertilidad baja; ligera toxicidad por aluminio; susceptibles a inundaciones y encharcamientos	GRUPO INDIFERENCIADO TypicTrópofluventsTypic TropaqueptsOxyaquicDy stropepts	

Fuente: Autores.

Con el cruce de la información, asignada con los pesos correspondientes de acuerdo a las variables existentes en la zona, se realiza la ponderación de los pesos y se da la vulnerabilidad de acuerdo a los rangos establecidos en la Tabla 17.

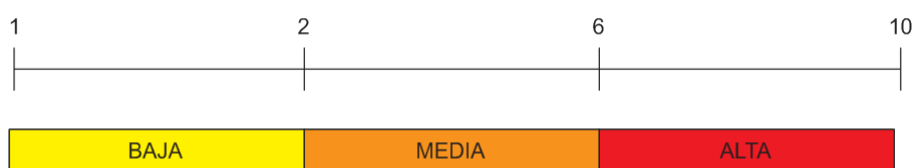
Tabla 17. Ponderación de valoración por vulnerabilidad

Valor	Peso %	1	3	5
Infiltración Superior	0.2	0.2	0.6	1
Infiltración Inferior	0.3	0.3	0.9	1.5
Hidrogeología	0.3	0.3	0.9	1.5
Suelos	0,2	0.2	0.6	1
Total		2	6	10

*Fuente: Autores*

Finalmente, se puede categorizar por vulnerabilidad (ver Figura 21) y obtener un mapa donde sean de fácil identificación las áreas que se verían menos afectadas por el vertimiento de aguas residuales industriales.

Figura 21. Categorías vulnerabilidad



*Fuente: Autores.*

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la sección referida al modelamiento de los contaminantes en el suelo una vez ejecutado el modelo, se tuvieron en cuenta los valores de infiltración superficial y los niveles de infiltración de la parte inferior del perfil, con los cuales se realizó el procedimiento geoestadístico relacionado en el capítulo anterior de este documento, el cual arrojó principalmente dos zonas de infiltración moderada, lo cual divide la zona de estudio en dos áreas de interés referido a la capacidad de infiltración (ver Anexo 3 y 4); sin embargo, es importante contar no solo con el criterio de la capacidad de infiltración del suelo, puesto que éste se convierte en un factor determinante si se relaciona con la información derivada de los acuíferos presentes en la zona, aunque es importante para la amortiguación del vertimiento, para evitar saturación, puede ser un factor de riesgo para los acuíferos libres presentes en la zona, por lo cual se realizó la intersección con ésta capa temática, además de los suelos que por sus características pasan a tener un peso importante en la zonificación realizada.

Finalmente luego de valorar las unidades cartográficas presentes y darles el peso correspondiente según la metodología propuesta se encontró de un total del área de estudio de 25.666 ha, un 18,72% con vulnerabilidad alta en donde se recomienda no realizar la actividad relacionada con el vertimiento del aguas residuales industriales derivadas de los lodos de perforación principalmente por la afectación que se puede causar a las zonas de recarga de acuíferos y a los acuíferos mismos, por sus características. Se tiene también que el 54,89% del área de estudio, tiene una vulnerabilidad media para el desarrollo de ésta actividad, y las que las zonas con baja vulnerabilidad corresponden al 26,54%, lo cual deja un alto margen de decisión para la ubicación de las zonas en donde se pueda hacer la instalación de la zona de riego por aspersión, las cuales deben ser analizadas en el momento de la ubicación de la plataforma de perforación. Estos resultados se presentan en el mapa 5, el cual permite identificar claramente los resultados simulados.



## 7. CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación permiten concluir que las prácticas que son aceptadas en las licencias ya otorgadas, no son ambientalmente sostenibles y por el contrario como en el caso en donde lo que se busca es una aceleración del proceso de infiltración, se hace necesario mitigar o evitar la profundización de la infiltración de estos fluidos, ya que se corre un riesgo muy alto de contaminación de las zonas de recarga de acuíferos.

Para profundizar y seguir la línea del estudio es pertinente tener en cuenta las características del contaminante y la interrelación físico-química y microbiológica entre el suelo y el agua, lo que sin duda contribuirá para que la simulación se acerque cada vez más a la realidad.

Los métodos Geoestadísticos permiten una simulación espacial del comportamiento de los datos, sin embargo es importante realizar, como se hizo en este caso, una revisión inicial del comportamiento estadístico de los datos para evitar interpretaciones sesgadas por datos variantes alejados del comportamiento uniforme

## 8. RECOMENDACIONES

Se hace necesario que se desarrollen metodologías para cuantificar la afectación que se haya podido generar, o que se este generando actualmente, al ambiente por el riego por aspersión.

Con respecto a la actual normatividad relacionada con el vertimiento en suelos, se hace urgente que el Estado Colombiano a través de la autoridad ambiental, actualice los parámetros que se deben cumplir para realizar esta práctica industrial. Son pocos e insuficientes los análisis que actualmente y de manera obligatoria se deben realizar para realizar el vertimiento, lo que minimiza la responsabilidad de las operadoras para mitigar los impactos generados por las actividades petroleras.

Mediante la apropiación y utilización del software Hydrus 1D, se puede establecer la velocidad a la cual avanza verticalmente el fluido contaminado, sin embargo para la investigación, no se tomó en cuenta el flujo horizontal del mismo, por lo cual los resultados pueden ser sesgados y en este sentido se recomienda identificar otras herramientas informáticas que permitan ambas simulaciones.

Es importante que se generen los mecanismos para que estas iniciativas desde el entorno académico escalen a la esfera nacional que tiene que ver con el establecimiento de las normas ambientales en el país, para que las acciones correctivas incluso desde la legislación ambiental se empiecen a tomar, dando así reconocimiento al roll investigativo y propositivo que tiene la academia.

El ejercicio de zonificación realizado arroja datos importantes y permite determinar con mayor exactitud áreas en donde se puede realizar el vertimiento, no obstante se recomienda efectuar análisis en la particularidad de cada proyecto de exploración, puesto que cada zona presenta condiciones específicas que pueden variar los criterios de selección y de ponderación de cada capa temática.

El requerimiento de la autoridad ambiental debe ampliarse, mas allá de lo que hoy en día se solicita como información para validación, aprobación y veeduría de las actividades petroleras, se recomienda que ésta entidad solicite a las empresas espacializar todos sus análisis pues la información cartográfica permite hacer una comparación en el tiempo de los cambios físicos en la zona.

Finalmente, la investigación es un muy buen referente de cómo la aplicación de las herramientas SIG, más allá de la mapificación, abren una gama amplia de posibilidades para el análisis integral de los datos, permitiendo a los profesionales de diversas áreas del conocimiento obtener nuevos resultados desde múltiples perspectivas

## 9. BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cierre de Ronda, 2012. Bogotá: 2012.

\_\_\_\_\_. (01 de Septiembre de 2012). Cifras y estadísticas a 2012: Agencia Nacional de Hidrocarburos. Recuperado el 25 de Noviembre de 2012, de Sitio web Agencia Nacional de Hidrocarburos: <http://www.anh.gov.co/es/index.php?id=8>

ALCALDÍA MUNICIPAL DE PUERTO LÓPEZ. Plan Básico de Ordenamiento Territorial, Municipio de Puerto López. Diagnostico Rural. Meta: 2000.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. Manual para el Manejo Integral de Residuos en el Valle del Cauca. Medellín, Antioquia: 2002.

Asociación Colombiana del Petroleo. (17 de Junio de 2009). Desarrollo de operaciones, Ambiental, Documentos. Recuperado el 8 de Diciembre de 2010, de Asociación Colombiana del Petroleo: [http://www.acp.com.co/assets/documents/desarrollo%20operaciones/ambiental/documentos/otros/recurso\\_hidrico\\_hidrocarburos2009.pdf](http://www.acp.com.co/assets/documents/desarrollo%20operaciones/ambiental/documentos/otros/recurso_hidrico_hidrocarburos2009.pdf)

Asociación Latinoamericana de la Industria del Petróleo. (s.f.). Asociación Colombiana de Ingenieros de Petróleos. Recuperado el 25 de 11 de 2012, de [http://www.alip.org/docs/Historias/breve\\_historia\\_petrolera\\_colombia.pdf](http://www.alip.org/docs/Historias/breve_historia_petrolera_colombia.pdf)

Asociación Regional de empresas de petroleo y gas natural en latinoamerica y el caribe. (1992). Guía para la Disposición y tratamiento del agua producida. Recuperado el 25 de Octubre de 2011, de Arpel, Asociación Regional de empresas de petroleo y gas natural en latinoamerica y el caribe: [www.arpel.org](http://www.arpel.org)

\_\_\_\_\_. (s.f.). Asociación Regional de empresas de petroleo y gas natural en latinoamerica y el caribe, Guia para la disposición y el tratamiento de agua producida. Recuperado el 25 de Octubre de 2011, de [www.arpel.org](http://www.arpel.org)

AVELLANEDA CUSARÍA, A. Petrolero, seguridad ambiental y exploración petrolera marina en Colombia. Quito: Iconos, Revista de ciencias sociales, 2005, 11-17.

BRAVO, E. (Mayo de 2007). Fundación regional de asesoría en derechos humanos. Recuperado el 12 de Enero de 2012, de [http://www.inredh.org/archivos/documentos\\_ambiental/impactos\\_explotacion\\_petrolera\\_es\\_p.pdf](http://www.inredh.org/archivos/documentos_ambiental/impactos_explotacion_petrolera_es_p.pdf)

CÁMARA COLOMBIANA DE SERVICIOS PETROLEROS – CAMPETROL. La Producción de los Distintos Tipos de Crudo en Colombia. Bogotá: 2009.

CAÑADA TORRECILLA, Rosa; VIDAL DOMÍNGUEZ, María Jesús; MORENO JIMÉNEZ, Antonio. Aplicación de la Geoestadística al estudio de la Variabilidad Espacial del ozono

en los veranos de la comunidad de Madrid. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, 2011, 119.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, Prosperidad Para Todos, Más empleo, menos pobreza y más seguridad. Bogotá: 2010.

DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. Office of Conservation. (s.f.). Louisiana Administrative Code.

Empresa Colombiana de Petróleos. (25 de Noviembre de 2012). Quiénes Somos: Nuestra Historia: Empresa Colombiana de Petróleos. Recuperado el 25 de Noviembre de 2012, de Página web de la Empresa Colombiana de Petróleos: <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=532&conID=76464>

\_\_\_\_\_. (s.f.). Petróleo en Colombia: Empresa Colombiana de Petróleos. Recuperado el 25 de 11 de 2012, de <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/petroleoencolombia2.htm>

\_\_\_\_\_. (2011). Recuperado el 2 de Agosto de 2011, de <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/exploracion3.htm>

FADDA, G. (s.f.). Cartografía del Suelo. Recuperado el 25 de Noviembre de 2012, de Universidad Nacional: [www.edafologia.com.ar](http://www.edafologia.com.ar)

GALINDO et al, G, Marcelo, D., Bernal, N.R., Vergara L.K., y Betancourth, J.C. (2009). Planificación ecorregional para la conservación de la biodiversidad en el Caribe continental colombiano. Planificación Ecorregional para la Conservación de la Biodiversidad, No.1. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Agencia Nacional de Hidrocarburos, The Nature Conservancy e Instituto de Hidrología y Meteorología y EA, 24.

GALINDO, G., PEDRAZA, C., BETANCOURT, F., MORENO R., CABRERA, E. (Junio 2007). Planeación ambiental del sector hidrocarburos para la conservación de la biodiversidad en los llanos de Colombia. Convenio de cooperación 05-050. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt., Bogotá. Colombia.

GARCÍA, I. (01 de Enero de 2012). Contaminación del suelo e impacto ambiental. Recuperado el 25 de Noviembre de 2012, de sitio web del Departamento de Edafología y Química Agrícola: <http://edafologia.ugr.es/conta/tema11/concep.htm>

IMPACTOS DE LA INDUSTRIA PETROLERA EN MARES Y COSTAS. (s.f.). Recuperado el 35 de Noviembre de 2012], de <http://oilwatchpanama.tripod.com/documentos/id4.html>

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT. Planeación ambiental del sector hidrocarburos para la conservación de la biodiversidad en los llanos de Colombia. Bogotá. D.C.: 2007.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Estudio de Suelos de Los Municipios de Cabuyaro, Fuente de Oro, Puerto López, San Carlos de Guaroa y La Inspección de Barranca de Upía. Bogotá: Imprenta Nacional, 1978.

\_\_\_\_\_. Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras. Bogotá: Imprenta Nacional, 1991.

\_\_\_\_\_. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Meta. Bogotá: Imprenta Nacional, 2004.

\_\_\_\_\_. (s.f.). Glosario. Recuperado el 25 de Noviembre de 2012, de <http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/Glosario>

LINDSAY, W. L. (1979). Chemical equilibria in soils. New York: Wiley.

LÓPEZ DE MESA, Quintero, GUEVARA VIZCAINO, Jaimes Cáceres, GUTIÉRREZ RIAÑO, Miranda García. Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. NOVA - PUBLICACIÓN CIENTÍFICA, 2006.

MALAGON CASTRO, D. Los Suelos de Colombia. Bogotá: 1998.

MAVDT. (28 de Noviembre de 2010). MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Recuperado el 5 de Octubre de 2011, de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/DocumentosBiodiversidad/proyectos\\_norma/proyectos/281010\\_proy\\_res\\_vertimientos\\_181110.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/DocumentosBiodiversidad/proyectos_norma/proyectos/281010_proy_res_vertimientos_181110.pdf)

MAYORGA GARCÍA, F. La Industri Petrolera en Colombia. Revista Credencial Historia, Edición 151, 2002.

MELENDEZ, M. U. (Abril de 2003). Centro de Estudios sobre Desarrollo Económico. Recuperado el 10 de Enero de 2011, de Universidad de los Andes: [http://economia.uniandes.edu.co/investigaciones\\_y\\_publicaciones/CEDE/Publicaciones/documentos\\_cede/2003/estudio\\_sobre\\_la\\_insercion\\_de\\_la\\_gestion\\_ambiental\\_en\\_las\\_politiccas\\_sectoriales\\_caso\\_colombia](http://economia.uniandes.edu.co/investigaciones_y_publicaciones/CEDE/Publicaciones/documentos_cede/2003/estudio_sobre_la_insercion_de_la_gestion_ambiental_en_las_politiccas_sectoriales_caso_colombia)

MÉNDEZ ESTEBAN, J., & RODRIGUEZ VELADEZ, J. F. Extracción de hidrocarburos en suelos contaminados mediante el acoplamiento del lavado de suelos implementando un sistema de columna. XVI verano de la investigación científica, 82, 2006.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 1594. Bogotá: 1984.

\_\_\_\_\_. Decreto 4741. Se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá: 2005.

\_\_\_\_\_. Decreto 2820, Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. Bogotá: 2010.

\_\_\_\_\_. Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales. Bogotá: 2010.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. (Octubre, 2010). La cadena del Gas en Colombia. Virtual Pro ISSN 1900-6241 N105.

MORAL, F. J. (Abril de 2004). Aplicación de la Geoestadística en las ciencias ambientales. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente.

OLEA, R. A. Geostatistical Glossary & Multilingual Dictionary. 1991.

PETROMINERALES. Plan de Manejo Ambiental Programa de Exploración Sísmica Llanos 58-3D. Puerto López y San Martín de los Llanos – Meta: 2010.

RUDA DE SCHENQUER, E., & MANGUELO, A. Contaminación y salud del suelo. Centro de Tecnología educativa aplicada facultad de ingeniería química UNL, 39, 2004.

SOLÍS SEGURA, L. M., & MOPEZ ARRIAGA, J. A. Principios básicos de contaminación ambiental. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.

Tomado del IEP-ACP. (25 de Julio de 2011). Asociación Colombiana del Petroleo. Recuperado el 28 de Julio de 2011, de <http://acp.com.co/assets/documents/asuntos%20economicos/IEP.xls>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Guide to site and soil description for hazardous waste site characterization, 1992.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Levantamiento de Información Gestion integral de residuos peligrosos en laboratorios. Bogotá: 2004.

ZAMBRANO MARTÍNEZ, S. Y. (22 de Enero de 2010). artículo.org. Recuperado el 25 de Noviembre de 2012, de artículo.org: [http://www.articulo.org/articulo/11698/tratamiento\\_de\\_los\\_residuos\\_derivados\\_de\\_la\\_extraccion\\_de\\_los\\_hidrocarburos\\_gasto\\_o\\_inversion.html](http://www.articulo.org/articulo/11698/tratamiento_de_los_residuos_derivados_de_la_extraccion_de_los_hidrocarburos_gasto_o_inversion.html)