

**EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA CONTAMINANTE
ANTE EVENTUALES ESCENARIOS DE CONTAMINACION POR
HIDROCARBURO LIVIANO EN AGUAS SUBTERRANEAS DENTRO DE DOS
INSTALACIONES INDUSTRIALES UTILIZANDO EL SOFTWARE VISUAL
MODFLOW.**

LAURA CRISTINA MALDONADO DELGADO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
FLORIDABLANCA**

2012

**EVALUACION DELCOMPORTAMIENTO DE LA PLUMA CONTAMINANTE
ANTE EVENTUALES ESCENARIOS DE CONTAMINACION POR
HIDROCARBURO LIVIANO EN AGUAS SUBTERRANEAS DENTRO DE DOS
INSTALACIONES INDUSTRIALES UTILIZANDO EL SOFTWARE VISUAL
MODFLOW.**

LAURA CRISTINA MALDONADO DELGADO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Ambiental

**Director
MSc. MARIA KOPYTKO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
FLORIDABLANCA**

2012

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser el motor en cada día de mi vida; por darme las mejores experiencias al lado de las mejores personas, por ser mi fortaleza, mi todo, porque gracias a él llegue hasta el final.

A mis papás Beatriz Helena y Roque por estar siempre ahí, en todo momento y lugar luchando junto a mí, por sus consejos, su confianza, su paciencia y sobre todo por su inmenso amor. A mis hermanos Diego y Natalia por convertirse en mis mejores amigos, los inigualables; por las risas, las lágrimas y cada uno de los momentos que hemos compartido.

A mis profesores de carrera que durante arduos semestres dieron lo mejor de cada uno de ellos para formar una profesional íntegra. A mi directora, María Kopytko por su apoyo y su confianza, a la Ingeniera Adriana Serrano por acompañarme en cada etapa de este proyecto y brindarme sus conocimientos. A la Universidad Pontificia Bolivariana por adoptarme todos estos años; por permitirme creer, aprender y madurar.

A toda mi familia; especialmente a mis primas que siempre tuvieron una mano extendida para mí, a mis amigos, a mis hermosas amigas que han dejado huella en mi vida y que han forjado la mujer que soy.

Caer y levantarse; la lucha es hoy y siempre.

LAURA CRISTINA MALDONADO DELGADO.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	19
1.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. MARCO TEORICO	22
3.1. AGUAS SUBTERRANEAS.	22
3.2. ACUIFEROS.	25
3.2.1. Formaciones Geológicas y su Comportamiento Frente al Agua.	26
3.2.2. Tipos de Acuíferos y su Comportamiento.	27
3.3. CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.	29
3.3.1. Fuente de Contaminación Por Hidrocarburos.	30
3.3.2. Comportamiento de los Hidrocarburos en el Subsuelo.	32
3.3.3. Problemas Ambientales Causados Por Hidrocarburos.	34
3.4. MODELACION DE AGUAS SUBTERRANEAS.	35
3.4.1. Modelo Hidrogeológico.	38
3.4.1.1. Desarrollo de un Modelo Hidrogeológico	39
3.4.1.2. Simulación de Eventos Contaminantes en Modelos Hidrogeológicos	39
3.4.2. Visual Modflow	41
3.4.2.1. Comportamiento de contaminantes	42
3.4.2.2. Fuentes de contaminacion (BACKWARD)	43
3.4.2.3. Prediccion Del Comportamiento Del Contaminante (FORWARD)	43
3.5. SURFER ®	43
3.6. TERMINALES INDUSTRIALES SELECCIONADAS	44

3.6.1. Terminal de Sebastopol	44
3.6.2. Estación Vasconia	46
4. MARCO NORMATIVO	51
5. METODOLOGIA	54
5.1. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES LOCATIVAS, TOPOGRÁFICAS, DE PRECIPITACIONES Y CALIDAD DE AGUA EN AREAS DE INTERES.	55
5.1.1. Ensayos Físico-Químicos de Aguas Subterráneas en Sebastopol	59
5.1.1.1. Determinación de pH.	59
5.1.1.2. Oxígeno disuelto.	60
5.1.1.3. Fenoles	60
5.1.1.4. Compuestos BTEX's	60
5.1.1.5. Grasas y aceites.	60
5.1.2. Revisión de Información Topográfica del Área de Interes.	61
5.2. ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DENTRO DE LAS ESTACIONES INDUSTRIALES	61
5.3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS, TOPOGRÁFICOS Y DEL SUELO.	64
5.4. SIMULAR ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBURO LIVIANO	64
5.4.1. Discretización del Modelo	68
5.4.2. Dirección de Flujo de Agua Subterránea	68
5.4.3. Calibración Del Modelo	68
5.4.4. Aplicación de Modpaht y Pathlines para Evaluación de la Trayectorias de partículas Forward y Backward.	69
6. RESULTADOS Y ANALISIS	70
6.1. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES LOCATIVAS, TOPOGRÁFICAS, DE PRECIPITACIONES Y CALIDAD DE AGUA EN PLANTA SEBASTOPOL.	70
6.1.1. Ensayos Fisico-Quimicos de Aguas Subterranneas en Sebastopol	71
6.1.1.1. Determinación de pH	72
6.1.1.2. Oxígeno Disuelto	72
6.1.1.3. Fenoles.	72

6.1.1.4. Grasas y Aceites.	73
6.1.1.5. Compuestos BTEX's.	73
6.1.2. Interpolacion de Curvas de Nivel En Surfer®	73
6.2. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.	75
6.3. PARÁMETROS PARA SIMULAR EVENTUALES ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN.	77
6.4. SIMULACION DE ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBURO LIVIANO	80
6.4.1. Discretizacion del Modelo	80
6.4.2. Dirección Flujo Agua Subterránea Estación Sebastopol.	81
6.4.3. Calibración del Modelo	84
6.4.4. Aplicación de Modpaht y Pathlines para Evaluación de la Trayectoria de Partículas Forward y Backward	86
6.5. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES LOCATIVAS, TOPOGRÁFICAS, DE PRECIPITACIONES Y CALIDAD DE AGUA EN PLANTA VASCONIA.	92
6.5.1. Ensayos Fisico-Quimicos de Aguas Subterraneas en Vasconia	94
6.5.1.1. Determinación de pH.	95
6.5.1.2. Oxígeno Disuelto.	95
6.5.1.3. Fenoles	95
6.5.1.4. Grasas y Aceites	95
6.5.1.5. Compuestos BTEX's.	96
6.5.2 Interpolacion de Curvas de Nivel en Surfer®	96
6.6. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.	98
6.7. PARÁMETROS PARA SIMULAR EVENTUALES ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN.	100
6.8. SIMULACION DE ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBURO LIVIANO	103
6.8.1. Discretizacion Del Modelo	104
6.8.2. Direcccion Flujo Agua Subterranea Estacion Vasconia	105
6.8.3. Calibración Del Modelo	108
6.8.4. Aplicación de Modpaht y Pathlines para Evaluación de la Trayectoria de Partículas Forward y Backward.	109

7. CONCLUSIONES	120
8. RECOMENDACIONES	123
BIBLIOGRAFIA	124
ANEXOS	128

LISTA DE IMAGENES

Imagen 1. Agua subterránea	25
Imagen 2. Tipos de acuíferos.....	29
Imagen 3. Dispersión de contaminantes a partir de una fuga de hidrocarburos.	33
Imagen 4. Estación Sebastopol.	45
Imagen 5. Estación Vasconia.....	48
Imagen 6. Metodología aplicada en el proyecto.....	54
Imagen 7. Método Hvorslev para conductividad hidráulica.	63
Imagen 8. Área de modelación Estación Sebastopol.	66
Imagen 9. Área de modelación Estación Vasconia.	67
Imagen 10. Modelo digital del terreno en Sebastopol.	74
Imagen 11. Topografía Estación Sebastopol en Visual Modflow.....	75
Imagen 12. Mallado para simulación.....	81
Imagen 13. Modelo de dirección de flujo Sebastopol.....	82
Imagen 14. Calibración modelo (PM4 inactivo).....	84
Imagen 15. Calibración modelo (PM4 activo).....	85
Imagen 16. Proyección y trayectoria partículas 1 año (365 días)	87
Imagen 17. Proyección y trayectoria partículas forward para 2 años (izquierda) y 5 años (derecha).....	88
Imagen 18. Proyección pluma contaminante en Gases de Antioquia.....	89
Imagen 19. Proyección y trayectoria partículas 10 años (3650 días)	90
Imagen 20. Proyección partículas Forward (izquierda) y partículas Backward (derecha) aprox. 20 años.....	92
Imagen 21. Modelo digital del terreno en Vasconia.....	97
Imagen 22. Topografía Estación Vasconia en Visual Modflow.....	98
Imagen 23. Mallado para simulación.....	105
Imagen 24. Modelo de dirección de flujo Vasconia.	106
Imagen 25. Calibración Modelo Vasconia.....	108
Imagen 26. Proyección y trayectoria partículas 1 año (365 días)	110

Imagen 27. Proyección y trayectoria partículas forward (izquierda) backward (derecha) a 2 años (730 días).....	111
Imagen 28. Proyección y trayectoria partículas circulares a 2 años TK 703 - TK 704. ...	112
Imagen 29. Proyección y trayectoria partículas forward (izquierda) backward (derecha) a 5 años (1825 días).....	113
Imagen 30. Proyección y trayectoria partículas forward K 703 - TK 704	114
Imagen 31. Proyección Forward (izquierda) y Backward (backward) 10 años (3650 días)	116
Imagen 32. Trayectoria partículas forward 10 años PM7, PM5 y API.....	117
Imagen 33. Trayectoria partículas backward 10 años PM7 y API	118

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Normas técnicas empleadas.	60
Tabla 2. Caracterización físico-química de aguas subterráneas Sebastopol.....	72
Tabla 3. Condiciones iniciales de conductividad hidráulica.	77
Tabla 4. Datos iniciales de pozos de monitoreo.	78
Tabla 5. Datos iniciales y finales del Río Magdalena – Puerto Berrío.	78
Tabla 6. Valores de porosidad modelo Sebastopol.	79
Tabla 7. Valores de datos observados y calculados Modelo Sebastopol.	83
Tabla 8. Caracterización físico-química de aguas subterráneas Vasconia.....	94
Tabla 9. Condiciones iniciales de conductividad hidráulica.	100
Tabla 10. Datos iniciales de pozos de monitoreo.	101
Tabla 11. Datos iniciales y finales del Río Magdalena – Puerto Boyacá.	101
Tabla 12. Valores de porosidad modelo Vasconia.	102
Tabla 13. Valores de datos observados y calculados Modelo Vasconia	107

LISTA DE FOTOGRAFIAS

	Pág.
Fotografía 1. Pozos de monitoreo Estación Sebastopol.	57
Fotografía 2. Pozos de monitoreo Estación Vasconia.	58
Fotografía 3. Panorámica Estación Sebastopol.	70
Fotografía 4. Pruebas slug en campo.	76
Fotografía 5. Panorámica Estación Vasconia.	93
Fotografía 6. Pruebas slug en campo.	99

RESUMEN

Este proyecto evaluó el comportamiento de la pluma contaminante ante eventuales escenarios de contaminación por hidrocarburo liviano en aguas subterráneas, dentro de dos instalaciones industriales pertenecientes a Ecopetrol S.A mediante el software visual Modflow. En la fase inicial se diagnosticaron las condiciones locativas, topográficas a través de la interpolación de curvas de nivel en SURFER®; de precipitaciones y calidad del agua en términos de fenoles, compuestos BTEXs, grasas y aceites; cuyos resultados fueron positivos al no encontrarse valores significativos de hidrocarburo dentro de las áreas de estudio, según lo establecido en la norma colombiana vigente (Fenoles <0.10 mg/L, grasas y aceites <1.07 mg/L y BTEXs cuyas concentraciones son inferiores a la mínima cuantificable). Posteriormente se estudió el comportamiento hidráulico de aguas subterráneas en los piezómetros ubicados dentro de las estaciones industriales de Sebastopol y Vasconia a través de pruebas slug en campo con el método para conductividades de Hvorslev. De ésta manera se establecieron los parámetros hidráulicos, topográficos (cotas y coordenadas) y del suelo (porosidad) requeridos por Visual Modflow. Finalmente la simulación del flujo de aguas subterráneas y la trayectoria de partículas forward y backward de la pluma contaminante en Sebastopol dejó como resultado un modelo similar al realizado en el año 2006, cuya dirección del flujo es variable debido a la topografía del terreno; ya que cuenta con pendientes en la mayoría de las direcciones. La máxima velocidad de flujo obtenida en la simulación fue de 0.68 m/d y la dirección de la extensión de la pluma predominante es sur-oeste. En la calibración del modelo el valor de Residual Mean obtenido fue de 0.54 (m) con el PM4 inactivo y de -0.285 (m) con el PM4 activo. Y los valores de Abs. Residual Mean fueron de 0.603 (m) con el PM4 inactivo y de 1.142 (m) con el PM4 activo respectivamente. El porcentaje de Normalized RMS fue de 19% con el PM4 activo y finalmente de un 9% con el PM4 inactivo. En Vasconia la simulación dejó como resultado un modelo similar al realizado en el año 2010, cuya dirección del flujo es sur – noroeste; no cuenta con muchas pendientes pronunciadas, generando así una topografía uniforme. La máxima velocidad de flujo obtenida en la simulación fue de 0.42 m/d y la dirección de la extensión de la pluma predominante va en el mismo sentido del flujo de agua subterránea. En la calibración del modelo el valor de Residual Mean obtenido fue de 0.511 (m), los valores de Abs. Residual Mean fueron de 1.9 (m) y el porcentaje de Normalized RMS fue del 50%.

PALABRAS CLAVES: Visual Modflow, pluma contaminante, simulación, aguas subterráneas, flujo subterráneo.

ABSTRACT

“CONTAMINATING PLUME BEHAVIOR REVIEW FOR TWO PROSPECTIVE LIGHT HYDROCARBON CONTAMINATION SCENARIOS IN UNDERGROUND WATER INSIDE OF TWO INDUSTRIAL FACILITIES, USING VISUAL MODFLOW”

This project reviewed the contaminating plume behavior for two prospective light hydrocarbon contamination scenarios in underground water, inside of two industrial facilities belonging to Ecopetrol S.A using the software Modflow. At the initial stage, locative and topographic conditions were diagnosed through level curves interpolation in SURFER[®]; precipitations and water quality in terms of phenols, BTEX's compounds, fats and oils; results were positive as significant levels of hydrocarbon were not found within the studied areas, according to the prevailing Colombian norm (Phenols <0.10 mg/L, fats and oils <1.07 mg/L and BTEX's whose concentrations are below the least quantifiable). Later, underground water hydraulic concentrations at piezometers located at Sebastopol and Vasconia industrial stations were studied through Slug tests performed on field and solved by Hvorslev method. That's how hydraulic, topographic (bounds and coordinates) and ground (porosity) parameters, required by Modflow, were established. Finally, underground water flux simulation and the forward and backward particle tracking of contaminating plume at Sebastopol left as results a model similar to the one of 2006, which flux's direction is variable due to land's topography as it count with slopes at most directions. Flux's top speed, obtained by simulation, was 0.68 m/d and prevalent plume extension's direction is South-West. At model's calibration, Residual Mean values obtained were 0.54 (m) with inactive PM4 and 0.285 (m) with active PM4. Abs. Residual Means values were 0.603 (m) and 1.142 (m) with inactive and active PM4 respectively. Normalized RMS percentages were 19% and 9% with active and inactive PM4 respectively. At Vasconia, the simulation left as a result, a model similar to that performed in 2010, in which the flux direction is S – NW; it does not have many sharpened slopes so it produces a regular topography. The maximum flux speed obtained at the simulation was 0.42 m/d and the direction of the pollution plume's extension presents the same flux of the underground water. At the calibration's model, the Residual Mean's value obtained was 0.511 (m), Abs. Residual Mean's values were 1.9 (m) and the Normalized RMS's percentage was 50%.

KEY WORDS: Modflow, contaminating plume, simulation, underground water.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural que además de ser la superficie donde se realizan actividades agrícolas, y ganaderas desempeña funciones importantes, entre las cuales se destaca su papel como medio filtrante durante la recarga del manto acuífero y la protección de los mismos.¹

A lo largo de la historia, el hombre ha desarrollado diversas actividades económicas que de una u otra manera han comprometido al suelo como principal recurso de explotación; muchas de estas actividades, principalmente la extracción y manejo del petróleo, sin lugar a duda, han venido deteriorando paulatinamente el suelo dejándolo en un estado avanzado de degradación. De la misma manera, cada vez más frecuente resulta la contaminación de acuíferos, debido a que una vez derramado el petróleo, éste penetra el suelo y puede llegar a las aguas subterráneas, desplazándose lentamente hasta ríos, lagos, ciénagas, alterando la vida acuática en su trayectoria.

Los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) son compuestos químicos altamente contaminantes, que alteran las condiciones del medio y de seres vivos al ser expuesto al mismo.²

Estos compuestos afectan de manera directa los tejidos vegetales, inhibiendo el crecimiento y ocasionando la muerte de las plantas debido a la ausencia de oxígeno. Algunos compuestos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP'S) son acumulados por las plantas, las cuales durante la degradación metabólica, los convierten en compuestos más tóxicos, carcinogénicos y

¹SAVAL, 1995.

²ATDSR, 1999.

mutagénicos, éste proceso ocurre en sedimentos y plantas acuáticas y por lo tanto puede impactar en especies herbívoras de peces y vida silvestre en general .Tanto en los vertebrados como en el ser humano, los hidrocarburos pueden ocasionar daños biológicos, los cuales dependen de la vía de ingreso al organismo. En primer instante actúan los hidrocarburos más volátiles produciendo irritaciones de las vías respiratorias y digestivas, así como hemorragias pulmonares y gastrointestinales, y además otras afecciones a nivel hepático, renal y del sistema nervioso central. En el ser humano puede incluso causar daños en los riñones, en el sistema inmune y en el desarrollo embrionario³

Las áreas de interés seleccionadas para este proyecto fueron las estaciones de SEBASTOPOL y VASCONIA de ECOPETROL S.A pertenecientes a la Vicepresidencia de Transporte; las cuales incluyen dentro de sus operaciones la recolección, el tratamiento, el almacenamiento y el bombeo o compresión de hidrocarburos; éstas plantas fueron consideradas de importancia debido a la extensión y complejidad del terreno ya que son Terminales industriales desde donde se manejan tanto crudo como productos derivados. SEBASTOPOL y VASCONIA están contempladas dentro del plan de eco-eficiencia de ECOPETROL S.A en donde se realizan planes piloto para todo tipo de actividades tales como emisiones atmosféricas, procesos de descarga, entre otras. Procesos como el almacenamiento de productos y crudo (llevado a cabo en ambas áreas) genera alto riesgo, debido a posibles fugas o el goteo permanente de hidrocarburos en válvulas y/o tuberías en mal estado. En años anteriores (2006), el Instituto Colombiano de Petróleos (ICP) en compañía de la empresa Servicios e Investigaciones Ambientales (SIAM), desarrolló para los sitios de interés la perforación de la red de pozos de monitoreo, así como la simulación de flujo de agua subterránea, dejando de ésta manera un precedente sobre el área de estudio y abriendo las puertas para poder realizar mejores y novedosas

³PELLINI, 2006.

investigaciones. En el año 2010 se realizó un estudio utilizando también la modelación de agua subterránea en Campo Palagua, ubicado en Puerto Boyacá con el fin de establecer una alternativa físico-química para la remediación de agua subterránea y suelos contaminados con hidrocarburos. En el año 2011 se desarrolló para estas mismas estaciones, la evaluación bajo el esquema de Acción Correctiva Basada en Riesgo (metodología RBCA). Hoy en día se han venido realizando constantes monitoreos y modelos de flujo de agua subterránea con Visual Modflow para diferentes áreas de interés de Ecopetrol S.A como medida de control del recurso hídrico subterráneo.

Afortunadamente la existencia de programas de modelamiento de flujo cada vez más eficientes ha permitido predecir el comportamiento de los contaminantes dentro del subsuelo y de esta manera tomar medidas preventivas y de remediación del recurso.

El modelamiento numérico es una herramienta que ayuda al entendimiento de sistemas afectados y a la solución de problemas de flujo. Estos programas de simulación, tales como Visual Modflow y Flowpath, entre otros, tienen su fundamento matemático en aproximaciones a las ecuaciones diferenciales parciales, que gobiernan el flujo de agua subterránea y el transporte. Además son de gran importancia porque aparte de simular el régimen de flujo de agua subterránea y contaminantes, proporciona la opción de visualizar a través de tiempos específicos el comportamiento de los fluidos dentro de una misma zona y conocer de antemano si existen o no receptores sensibles a eventos de contaminación.

El programa seleccionado (Visual Modflow) ofrece diversas funciones como rendimiento de pozos, diseño de sistemas de drenajes de pozos, evaluación de la atenuación natural, entre otras y específicamente para el presente proyecto, la

modelación de flujo de agua subterránea ante una eventual situación de contaminación con Diesel, y la aplicación de partículas para evaluar el comportamiento de la extensión de la pluma contaminante en diferentes tiempos de simulación. La selección de Visual Modflow como herramienta informática para el desarrollo del presente estudio, se basó principalmente en la rápida adquisición de dicho software a través del convenio existente entre el Instituto Colombiano de Petróleos (ICP) y la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB); en el aprovechamiento de cursos de capacitación ofrecidos por la Asociación Colombiana de Hidrogeólogos (ACH) y la empresa Schlumberger Water Services a los miembros de los semilleros de investigación interesados en temas de modelación, así como también en la experiencia que miembros del Departamento de Tecnologías Limpias del Instituto Colombiano de Petróleos (ICP) han adquirido en el desarrollo de modelos para diversas áreas de estudio.

El presente proyecto se desarrolló en 4 etapas definidas básicamente por los 4 objetivos específicos planteados: diagnosticar las condiciones iniciales de las áreas de interés, estudiar el comportamiento hidráulico de los piezómetros, establecer los parámetros hidráulicos requeridos para la simulación y finalmente simular los escenarios de contaminación; dichas etapas fueron soportadas por actividades que finalmente lograron dar cumplimiento a las metas propuestas al inicio del proyecto. Dentro de la primera fase de diagnóstico, los parámetros considerados en la caracterización físico-química de las aguas subterráneas presentes en los piezómetros de las estaciones industriales fueron: fenoles, grasas y aceites, compuestos BTEXs, pH, temperatura y oxígeno disuelto, de los cuales se esperaba un registro de valores por debajo de los límites establecidos en las normas, logrando de esta forma destacar la calidad del agua subterránea en las áreas de estudio. Los niveles de detección-cuantificación para dichos parámetros fueron: BTEX's (MCC); Benceno: 2.76 µg/L, Tolueno: 2.23 µg/L,

Etilbenceno: 1.82 µg/L, M,P-Xileno: 1.85 µg/L, Xileno: 2.30 µg/L. Para grasas y aceites (MCC) 1.07 mg/L, Fenoles (fotométrico) (MCC) 0.10 mg/L.

Finalmente en el proceso de simulación se esperaba generar un modelo de régimen de flujo adecuado que permitiera la interpretación del comportamiento actual del acuífero, y que características del agua subterránea; especialmente la velocidad, se caracterizara satisfactoriamente. A continuación se presenta la evaluación del comportamiento del régimen de flujo y del transporte de contaminantes para las instalaciones de Sebastopol y Vasconia respectivamente.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar del comportamiento de la pluma contaminante ante eventuales escenarios de contaminación por hidrocarburo liviano en aguas subterráneas dentro de dos instalaciones industriales pertenecientes a Ecopetrol S.A mediante el software visual ModFlow.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar las condiciones locativas, topográficas, de precipitaciones y calidad del agua en términos de grasas y aceites, fenoles y compuestos BTEXs en las estaciones industriales de estudio.
- Estudiar el comportamiento hidráulico de aguas subterráneas en los piezómetros ubicados dentro de las estaciones industriales de Sebastopol y Vasconia.
- Establecer los parámetros hidráulicos, topográficos y del suelo requeridos para simular eventuales escenarios de contaminación de agua subterránea en las áreas de estudio.
- Simular escenarios de contaminación con hidrocarburo liviano en aguas subterráneas de dos instalaciones industriales usando el software Visual ModFlow.

2. JUSTIFICACIÓN

Siendo los hidrocarburos una fuente energética primordial en el desarrollo y avance de las sociedades modernas, su explotación es cada vez más intensiva. Con esto se hacen cada vez más frecuentes eventos de contaminación causados por las actividades forzadas de explotación de este recurso. Debido a que la contaminación por petróleo se extiende rápidamente en el ecosistema, muchos de los procesos de descontaminación aplicados no alcanzan a cubrir todas las áreas afectadas y se realizan mucho después de que el crudo ha penetrado el ecosistema desconociendo así la dirección de la pluma contaminante⁴.

La simulación facilita conocer el desplazamiento del contaminante, su ubicación, el espesor del hidrocarburo y la velocidad de desplazamiento de las partículas transportadas por el agua subterránea. Igualmente es posible establecer los puntos específicos en los cuales se pueden presentar los eventos contaminantes, la afectación a receptores sensibles y al ecosistema en general dentro de estas áreas.

La aplicación de la simulación de la pluma contaminante en situaciones de derrames permitiría establecer áreas de contingencia y mitigación, además de ubicar puntos de exploración y construcción como los pozos de monitoreo. Finalmente la simulación realizada en las áreas de estudio dejará como resultado el mapa de flujo de aguas subterráneas que es necesario conocer en caso de un derrame.

⁴ VARGAS GALLEGOS Paola Andrea, CUÉLLAR René Ricardo, DUSSÁN Jenny; Biorremediación de residuos del petróleo. Apuntes científicos uniandinos no. 4 / Dic. 2004.

Dentro de las políticas que ECOPETROL S.A establece para dar cumplimiento a sus metas de producción de crudo, se consideran metas en optimización de costos; la realización del uso racional de los equipos, control en los consumos de combustibles y lubricantes, optimización del consumo de energía y mantenimiento preventivo a los equipos para bajar los costos de operación de las plantas.

Todo lo anterior puede generar una situación de alto riesgo, debido a la actividad intensificada de extracción, producción y transporte de crudo y sus derivados junto con la disminución de costos de mantenimiento y operación.

De esta manera se incentiva el desarrollo de un escenario de simulación utilizando el programa Visual Modflow en su versión 4.3, el cual permite visualizar de manera tridimensional la magnitud del impacto que genera un derrame de crudo o cualquier otro derivado ajustado a la realidad regional, cuando éste alcanza un objetivo y así plantear soluciones viables para contrarrestar dicho impacto.

Por las razones anteriormente mencionadas el presente trabajo se considera relevante, ya que marca una visión preventiva ante la situación de riesgo que la industria petrolera genera y a su vez, explora una nueva temática en cuanto a identificación y recuperación de las aguas subterráneas.

3. MARCO TEORICO

3.1. AGUAS SUBTERRANEAS.

El agua es un recurso natural muy importante para el hombre y los ecosistemas. Dentro del recurso hídrico, las aguas subterráneas constituyen un bien estratégico debido a que aportan el caudal base de las corrientes permanentes y regulan los niveles en los cuerpos lenticos. Además cumplen una importante función para el mantenimiento de ecosistemas acuáticos y éstas constituyen fuentes de abastecimiento para satisfacer las necesidades humanas, para consumos en actividades domésticas, agropecuarias e industriales.

Un suministro adecuado de agua es un requisito previo para el desarrollo de los asentamientos y las industrias, incluyendo la industria agrícola. Sin embargo, la explotación imprudente de las aguas subterráneas puede agotar este tipo de reserva y reducir su calidad⁵ agudizando la crisis ambiental a nivel mundial que amenaza su sostenibilidad.

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, ha destacado el agua como recurso vital, fundamental para el desarrollo sostenible, en particular para la integridad del medio ambiente y la erradicación de la pobreza y el hambre, y que es indispensable para la salud y el bienestar humano. La misma organización proclamó el periodo 2005 - 2015 como el Decenio Internacional para la Acción, “El agua, fuente de vida” (UNESCO, 2003). Esta declaratoria señala como objetivo primordial ocuparse más a fondo de los temas relacionados con el recurso hídrico, establecer y ejecutar programas y proyectos relativos al agua, que permitan un mejor conocimiento y proporcionen

⁵ HILLEL, DANIEL; (1998), Environmental Soil Physics. The United States of America; Edi. Academic Press. P.471.

elementos para la toma de decisiones relacionadas con la conservación y el mejoramiento de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Además de brindar la importancia que requiere el saneamiento básico, para lograr dar cumplimiento de la meta propuesta para el año 2015 en la Cumbre del Milenio de las Naciones Unidas celebrada en el año 2000 en la ciudad de Nueva York, para reducir a la mitad el porcentaje de personas que no tienen acceso al agua potable o no pueden costearla.

De acuerdo a lo anterior, es importante establecer prioridades para identificar y clasificar aquellas actividades potencialmente contaminantes y su interacción con la vulnerabilidad intrínseca del medio acuífero, de manera tal, que permita determinar el peligro de la contaminación de las aguas subterráneas. Esta determinación se convierte en el primer paso para lograr una aproximación a la evaluación de los impactos negativos que puede sufrir la población y el ecosistema, cual se beneficia de este recurso hídrico.⁶

Las mismas causas que llevan a un deterioro progresivo del recurso hídrico superficial pueden también afectar los acuíferos. La contaminación de los acuíferos ocurre cuando la carga de contaminantes sobre el subsuelo, generada por descargas o lixiviados de actividades urbanas, industriales, agropecuarias o mineras no es controlada adecuadamente, y excede en ciertos componentes la capacidad natural de atenuación del subsuelo y estratos suprayacentes. A escala mundial, las aguas subterráneas están experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y proyectos mineros, por ello existe una gran necesidad de llevar a cabo campañas proactivas y acciones prácticas destinadas a proteger la calidad natural

⁶GAVIRIA, J.I y BETANCUR, T. Avances metodológicos para evaluar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas Universidad de Antioquia. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental, Medellín, Antioquia.

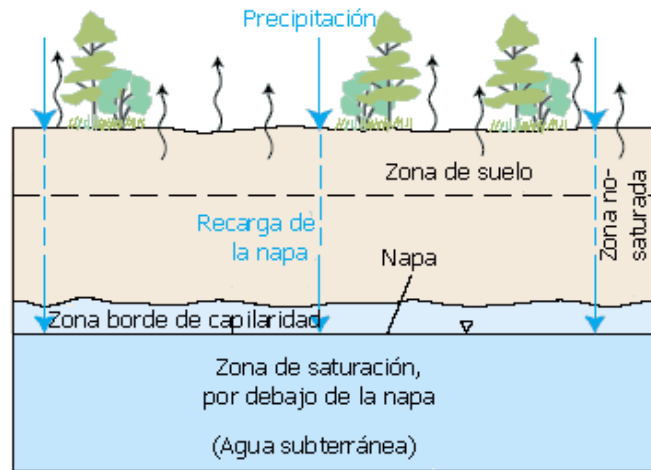
del recurso, las cuales se pueden justificar sobre la base tanto de criterios amplios de sustentabilidad ambiental como de criterios más estrechos de beneficio económico.⁷

Las aguas subterráneas se originan principalmente por exceso de precipitación que se infiltra directa o indirectamente a través de la superficie del suelo. La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el subsuelo. En esta primera etapa se satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, y posteriormente superado cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos. Así, toda el agua que se encuentra en forma natural por debajo de la superficie terrestre se llama agua subsuperficial, independientemente de que esté en la zona saturada o en la zona no saturada. El agua en la zona saturada, es decir la que se encuentra debajo del nivel freático, se le llama agua subterránea.

En la imagen 1 se observan la distribución de las zonas dentro del subsuelo donde se encuentra el agua subsuperficial y el agua subterránea propiamente dicha.

⁷ FOSTER, S. HIRATA, R. GOMES, D. D'ELIA, M. & PARIS, M. 2002 Groundwater quality protection. A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies."The World Bank.Washington, D.C. 88 p. (Foster et al. 2002).

Imagen 1. Agua subterránea



Fuente: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

Teniendo en cuenta la porosidad y estructura del suelo se logra determinar el tipo de acuífero y la circulación de las aguas subterráneas. El agua subterránea puede circular y almacenarse en el conjunto del estrato geológico: este es el caso de suelos porosos como los arenosos. Puede circular y almacenarse en fisuras o fallos de las rocas compactas que no son ellas mismas permeables, como la mayoría de rocas volcánicas y metamórficas. El agua corre a través de la roca y circula en fisuras localizadas y dispersas.⁸

3.2. ACUÍFEROS.

Un acuífero (literalmente, un portador de agua) se define generalmente en términos útiles como una formación geológica porosa que contiene, filtra y transmite agua en cantidad suficiente para servir como una fuente de suministro para fines humanos⁹.

⁸ LENNTECH, WATER TREATMENT SOLUTIONS. Origen y situación de las agua subterránea en la tierra [Consultada: 18-10-2011]; Disponible en <http://www.lennotech.es/agua-subterránea/origen-y-cantidad-agua-subterránea.htm>

⁹ Todd, 1967

3.2.1. Formaciones geológicas y su comportamiento frente al agua.

Los acuíferos deben ser entendidos como formaciones geológicas subterráneas permeables, susceptibles de almacenar y transmitir el agua. Así, cabe indicar que existe en la naturaleza una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua; desde el punto de vista hidrogeológico o según la permeabilidad, estas formaciones suelen dividirse en cuatro grupos principales. Una formación que, en contraste con un acuífero, no contiene ni transmite grandes cantidades de agua se llama acuífugo. Un ejemplo es una formación de granito apretado, impermeable. Entre los dos extremos; los acuíferos y acuífugo, los hidrólogos reconocen un tipo intermedio de la formación que contiene agua, pero debido a la permeabilidad, no pueden transmitir suficiente para servir como una fuente de alimentación (Ejemplo, las capas de arcilla y lutitas) esta formación se denomina acuicludo.¹⁰ Y se encuentran también los acuitardos que son formaciones las cuales con frecuencia son limos, arenas limosas de baja capacidad para transmitir el agua.

A continuación se señalan las principales características de éstas formaciones geológicas:

- **Acuíferos:** capaces de almacenar y transmitir el agua (gravas, arenas, materiales calizos, etc.); son formaciones con **capacidad de drenaje alta** en las que se pueden perforar pozos con el fin de satisfacer las necesidades humanas de abastecimiento, agricultura, industria, ganadería, etc.
- **Acuitardos:** capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la transmiten con dificultad; se suelen denominar con frecuencia

¹⁰HILLEL, DANIEL Op.Cit, p. 472

formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.), y su **capacidad de drenaje es media a baja**; no son de interés para la obtención de caudales que puedan servir a alguna necesidad hídrica, pero en la naturaleza juegan un papel muy importante como elementos transmisores del agua en recargas verticales a través de grandes superficies.

- **Acuicludos:** pueden almacenar el agua en grandes cantidades, pero no tienen la posibilidad de transmitirla y **se drenan con mucha dificultad**; el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.)
- **Acuifugos:** son formaciones incapaces de almacenar y de transmitir el agua; están representados por las rocas compactas, como granitos, y a veces incluso calizas muy compactas sin carstificar; se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que pueden permitir flujos.

3.2.2. Tipos de acuíferos y su comportamiento.

Los acuíferos se pueden clasificar dependiendo de su textura en:

- **Acuíferos Porosos:** en los que el agua circula a través de sus poros o espacios existentes entre las capas del terreno; buen ejemplo de ello son las arenas, areniscas, llanuras aluviales y cuencas terciarias. (Algunos autores prefieren denominarlos acuíferos detríticos).
- **Acuíferos Kársticos:** los cuales tienen heterogeneidad organizada: los huecos, y el propio flujo, se van jerarquizando; y presentan a la vez una función transmisiva, que gobierna el flujo, y una función capacitiva, que gobierna el almacenamiento.

- **Acuíferos Fisurados** cualquier formación geológica donde la circulación del agua se produce por entre fisuras o grietas consecuencia de una intensa fracturación.

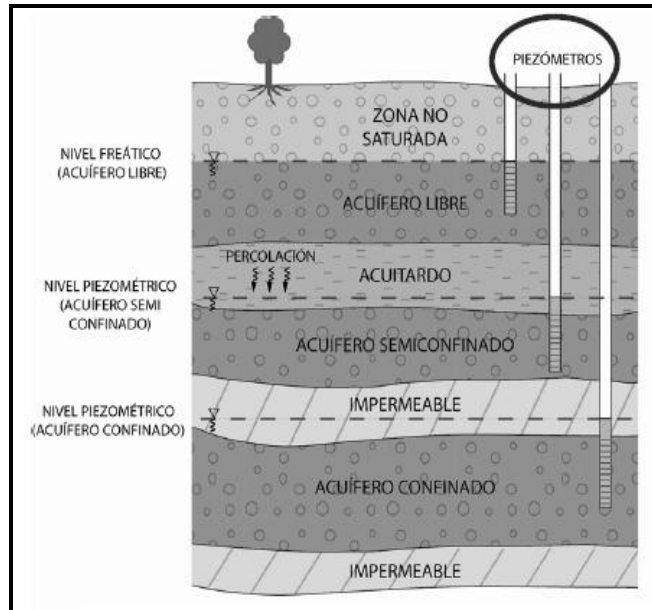
O dependiendo de su estructura:

- **Acuífero libre o freático:** en los acuíferos freáticos el agua satura los poros y fracturas de la formación y es liberada por drenaje (espontáneo o forzado por el hombre), y por lo tanto, se produce una simple desaturación. Los acuíferos libres se encuentran en contacto directo con la superficie del terreno y la superficie freática se encuentra sometida a la presión atmosférica. Buenos ejemplos son las terrazas y llanuras aluviales.
- **Acuífero confinado o cautivo:** Se encuentran rodeados en el subsuelo tanto por arriba como por abajo por materiales impermeables. El peso de los materiales superiores supone una carga o presión sobre el agua (tensión intersticial) y sobre el esqueleto físico del acuífero (tensión intergranular).
- **Acuífero semi-confinado:** Es un sistema físico integrado por un acuífero superior bien alimentado, un paquete semipermeable o acuitardo y un acuífero inferior en condiciones de semiconfinamiento.¹¹

En la imagen 2 se ilustra los diferentes tipos de acuíferos encontrados en el subsuelo.

¹¹VILLARROYA, FERMÍN. Jornadas técnicas sobre aprovechamiento de aguas subterráneas para riego. Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos. Departamento de Geodinámica, facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. Madrid, Junio 2009.

Imagen 2. Tipos de acuíferos.



Fuente:<http://ggyma.geo.ucm.es/docencia/hga->

lg/documentos/presentacion/present-hidro-pedro/tema%202%2009-10.pdf

3.3. CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.

El término contaminación se refiere a la incorporación de sustancias que provocan un cambio en la calidad del agua, afectando la salud del hombre, la calidad de vida o el funcionamiento natural del ecosistema.¹²

Las fuentes de contaminación del agua subterránea generalmente están asociadas con las actividades humanas. A través de éstas, los materiales o residuos pueden entrar en contacto con el agua subterránea, lo que puede causar su contaminación. Aunque la mayoría de las fuentes de contaminación de aguas subterráneas son origen humano, la contaminación también puede tener un origen natural. Las aguas subterráneas con sus grandes variaciones en la composición

¹² HENRY, J. Y HEINKE, G. Environmental science and engineering 2nd Edition. Prentice Hall, 1996.778 p. ISBN [0131206508](https://www.isbn-international.org/number/0131206508)

química contiene elementos que pueden ser considerados como nutrientes o sustancias esenciales para la vida humana, animal y de las plantas, pero en algunos casos también puede contener sustancias naturales que pueden ser perjudiciales para la salud humana y el ecosistema.¹³

La contaminación de aguas subterráneas con constituyentes orgánicos e inorgánicos se ha producido desde hace mucho tiempo, debido a manejos inadecuados de los materiales de desecho, derrames y fugas en tuberías, entre otros. Estos compuestos logran llegar a las aguas subterráneas por medio de infiltración e igualmente sus componentes volátiles pueden llegar al aire si es el caso de hidrocarburos livianos. Sin embargo el flujo del agua y el transporte de los contaminantes desde la superficie hasta el nivel del agua en el subsuelo tienden a ser un proceso lento, lo cual indica que puede pasar gran cantidad de tiempo sin que los episodios y los efectos de la contaminación sean detectados.

Los accidentes, los diversos eventos naturales y las actividades propias de la industria petrolífera han provocado contaminación por hidrocarburos, por ende, la generación de pasivos ambientales que a lo largo del tiempo han impactado de manera negativa las condiciones naturales del suelo, de las aguas superficiales y subterráneas, flora y fauna.

3.3.1. Fuente de contaminación por hidrocarburos.

Numerosos productos derivados del petróleo son utilizados como combustibles (suministro para vehículos y maquinas industriales; también para la generación de energía), como materia prima para la síntesis de plásticos y como lubricantes. En frecuentes ocasiones dichos productos se destinan al suelo, ya sea voluntaria o

¹³ZAPOROZEC, Alexander. Groundwater contamination inventory: a methodological guide 2002. Series on groundwater no.2, UNESCO [Consultada: 28-08-2011]; p. 25. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001325/132503e.pdf>

involuntariamente. Miles de tanques de combustible subterráneos pueden presentar fugas de su contenido (por ejemplo, la gasolina y fuel oil) en el subsuelo, donde estos materiales lograr migrar a las aguas subterráneas.¹⁴

Químicamente, los hidrocarburos son moléculas orgánicas compuestas por elementos de hidrógeno y carbono, que pueden clasificarse en: alcanos, alquenos, alquinos y aromáticos. Un tipo de contaminante muy común son los hidrocarburos líquidos en fase no acuosa **Non Aqueous Phase Liquid**, cuya sigla en inglés corresponde a NAPLs. Son líquidos inmiscibles con el agua, que por lo tanto no tienden a infiltrarse debido a que flotan sobre ésta. Los NAPLs pueden clasificarse en aquellos cuya densidad es mayor a la del agua **Dense Nonaqueous Phase Liquid** (DNAPLs) y aquellos más ligeros que el agua **Light Nonaqueous Phase Liquid** (LNAPLs)¹⁵

El mecanismo de infiltración de los hidrocarburos puede ser mediante el acceso directo del contaminante al acuífero o a capas profundas del suelo, ya sea por mecanismos antrópicos (pozos) o naturales (sumideros); o bien por un acceso difuso, a través de una infiltración del contaminante en el suelo.

El primer caso es más complejo a primera vista, puesto que afecta de forma mucho más rápida y completa a las aguas subterráneas, pero es más sencillo de solucionar a mediano-largo plazo. La infiltración, por su parte, suele implicar un menor grado de afectación a las aguas subterráneas, debido a la capacidad de atenuación del suelo, pero a su vez esto hace que el suelo quede afectado, lo que a menudo prolonga el problema en el tiempo y el espacio¹⁶.

¹⁴ HILLEL, DANIEL Op.Cit, p. 501

¹⁵ CELIS, H. BASTIÁN. Contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos líquidos livianos en fase no acuosa. Marzo 2009, n° 22 [Consultada: 28-08-2011]; Disponible en <http://www.cienciaahora.cl/Revista22/03ContaminacionAguasSubterranas.pdf>

¹⁶ Minería y medio ambiente. Restauración y remediación de Suelos y Aguas subterráneas. España.[Consultada: 18-10-2011]; Disponible en <http://www.uclm.es/users/higueras/mam/MMAM10.htm>

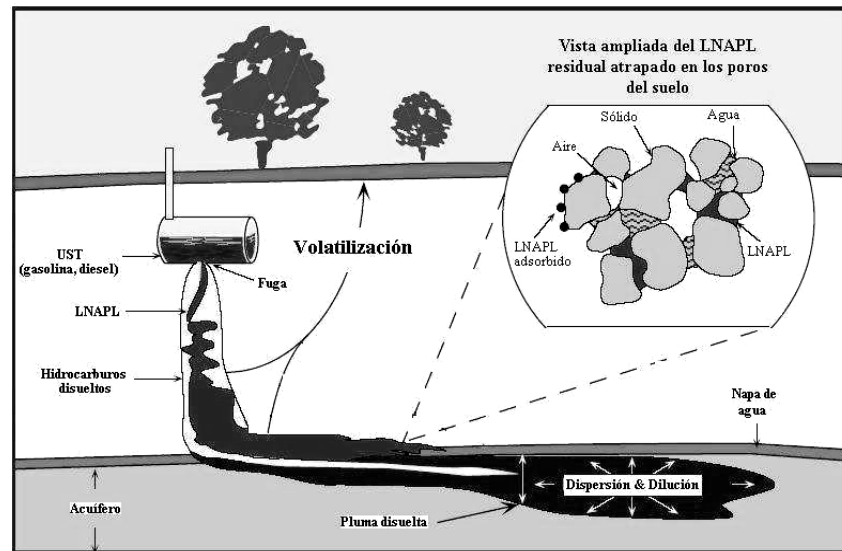
3.3.2. Comportamiento de los hidrocarburos en el subsuelo.

El proceso de transporte y movilidad de los líquidos de fase no acuosa (NAPLs) está gobernado por una variedad de parámetros. Entre ellos se pueden considerar las propiedades del propio LNAPL (densidad, viscosidad, solubilidad, presión de vapor, volatilidad y tensión interfacial), las características del suelo en el que se propagan (fuerza o presión capilar, distribución del tamaño de poros y contenido inicial en humedad, estructura geológica de los estratos, y velocidad del agua subterránea), y las funciones dependientes de la saturación (saturación residual y permeabilidad relativa).¹⁷

En la imagen 3 se esquematiza el derrame de hidrocarburo desde un tanque de almacenamiento subterráneo (UST). Cuando ocurre un derrame de LNAPL (ej. gasolina o diesel), éste producto empieza a lixiviar hacia el acuífero por acción de la gravedad; a medida que el LNAPL avanza en el suelo, va quedando retenido dentro de los poros y fracturas presentes debido a las fuerzas capilares, lo que significa que una fracción del LNAPL quedará atrapado de manera residual; el LNAPL no atrapado y móvil puede continuar migrando en el subsuelo. Simultáneo a esto, se genera una pluma gaseosa que contiene los compuestos volátiles del LNAPL residual y del LNAPL móvil que continúa avanzando en profundidad.

¹⁷ CELIS, H. Op. Cit.

Imagen 3. Dispersión de contaminantes a partir de una fuga de hidrocarburos.



Fuente: CELIS, H. BASTIÁN. Contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos líquidos livianos en fase no acuosa.

Si el derrame de LNAPL es de un volumen grande y constante, éste atravesará la zona vadosa hasta llegar a la napa de agua donde el avance vertical del LNAPL es finalmente detenido. Aquí la masa de LNAPL presiona contra el obstáculo que le ofrece la napa de agua, y el LNAPL se dispersa lateralmente moviéndose siempre en la dirección del flujo de agua subterránea.

Junto con ello, comienza a formarse una pluma de compuestos disueltos, a partir de un mecanismo de disolución, en que los contaminantes del LNAPL emigran de la fase inmisible a la fase acuosa. La extensión de las plumas de vapores volatilizados y compuestos disueltos está limitada por la presión de vapor y solubilidad, respectivamente (Kim y Corapcioglu, 2003).¹⁸

¹⁸CELIS, H. BASTIÁN. Op. Cit.

La contaminación por LNAPL's es uno de los principales problemas que aquejan a la industria de los hidrocarburos. Estos líquidos afectan la calidad de las aguas subterráneas en muchos lugares del mundo, donde el más común de los problemas es la liberación de productos derivados del petróleo hacia las napas de agua¹⁹. Estos compuestos son los contaminantes más comunes en la industria del petróleo, abarcando las refinerías, distribución, almacenamiento y estaciones de servicio.²⁰

3.3.3. Problemas ambientales causados por hidrocarburos.

Ambientalmente existen diversos problemas debido a la contaminación por hidrocarburos en las aguas subterráneas; la creciente demanda por abastecimiento de agua potable de aguas subterráneas pone a la luz la importancia que significa conocer si la calidad del agua subterránea está siendo alterada, pues esto puede repercutir a mediano y largo plazo en la salud de la población abastecida.

Estudios han comprobado que el benceno es un agente cancerígeno en humanos²¹. Por su parte, el petróleo en el suelo causa problemas ecotoxicológicos, debido al potencial tóxico, carcinogénico y mutagénico de los hidrocarburos que lo componen.²² Los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) son compuestos químicos altamente contaminantes y afectan de manera directa los

¹⁹ NEWELL *et al.*, 1995.

²⁰ NEWELL, C., ACREE, S. y ROSS, R. (1995). Light nonaqueous phase liquids. EPA, Office of Research and Development, EPA/540/S-95/500.

²¹ MAZARI, 2007

²² RIVERA-CRUZ, M., FERRERA-CERRATO, R., SÁNCHEZ-GARCÍA, P., VOLKE-HALLER, V., FERNÁNDEZ-LINARES, L. y RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ, R. (2004). Descontaminación de suelo con petróleo crudo mediante microorganismos autóctonos y pasto alemán [*Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchc.] *Agrociencia* 38:1-12.

tejidos vegetales, inhibiendo el crecimiento y ocasionando la muerte de las plantas debido a la ausencia de oxígeno.

Algunos compuestos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), ejemplo de ellos son los productos de combustión como el hollín que pueden encontrarse en el aire adheridos a partículas de polvo o como sólidos en el suelo o en los sedimentos; son acumulados por las plantas y durante la degradación metabólica son convertidos en compuestos más tóxicos, carcinogénicos y mutagénicos. Tanto en los vertebrados como en el ser humano, los hidrocarburos pueden ocasionar daños biológicos, los cuales dependen de la vía de acceso al organismo. En primera instancia actúan los hidrocarburos más volátiles produciendo irritaciones de las vías respiratorias y digestivas, así como hemorragias pulmonares y gastrointestinales, y además otras afecciones a nivel hepático, renal y del sistema nervioso central. En el ser humano puede incluso causar daños en los riñones, en el sistema inmune y en el desarrollo embrionario²³.

3.4. MODELACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

La exploración de aguas subterráneas se define como el conjunto de operaciones o trabajos que permiten la localización de acuíferos o embalses subterráneos de los que se puede obtener agua en cantidad y de calidad adecuada para el fin que se pretende.²⁴ Por esto es importante conocer el funcionamiento de herramientas informáticas (programas con información codificada conocidos como “**software**”) como Visual ModFlow por lo que puede ofrecer a los profesionales de aguas

²³ PELLINI, 2006.

²⁴ BETANCUR T., PALACIO C., MEJÍA O; Propuesta metodológica para acoplar la exploración y la investigación hidrogeológica; Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad de Antioquia; ISAGEN, Medellín.

subterráneas un completo conjunto de herramientas, para afrontar iniciativas de calidad, suministro y protección de aguas subterráneas.

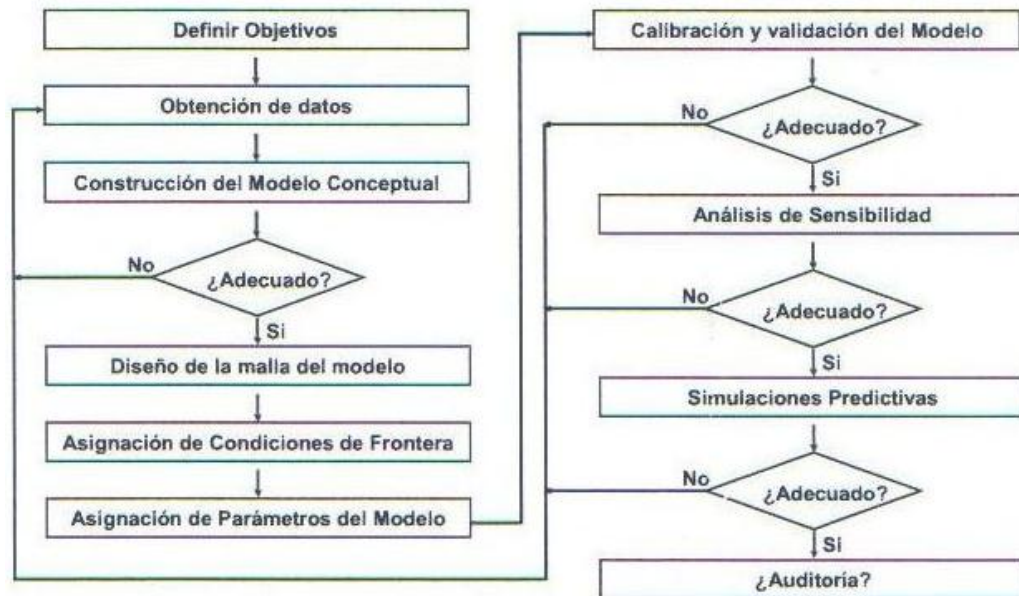
Dentro de la modelación aplicada de flujo y transporte de contaminantes en aguas subterráneas se puede encontrar una amplia gama de actividades tales como: la evaluación de recursos hídricos, investigación de campo de sitios contaminados, instalación de pozos de bombeo y de monitoreo hasta el diseño e implementación de la remediación. Para modelar este tipo de comportamientos también puede incluir el uso de los programas como MT3D, MODPATH y ZoneBudget.

Los sistemas de aguas subterráneas son evaluados para dos cosas principalmente; para saber si existe suficiente cantidad de agua y para saber si la calidad es adecuada. Dentro de las aplicaciones de los modelos de aguas subterráneas se encuentran:

- Rendimiento de pozos
- Interferencia entre pozos
- Diseño de sistemas de drenaje por pozos
- Delineación de zonas de captación de pozos para protección
- Evaluación del impacto de los contaminantes
- Evaluación de la atenuación natural
- Diseño de sistemas de remediación

En la figura 1 se representan los pasos básicos para la construcción de un modelo, teniendo definidos los objetivos para lograr decidir sobre los alcances y expectativas del modelo.²⁵

Figura 1. Diagrama de flujo de la modelación.



Fuente : Tomado de Anderson Y Woessner (1982)

En el orden de ideas contempladas en la figura anterior, es importante dar cumplimiento a cada uno de los pasos allí consignados, debido a que de esta forma es posible generar un modelo confiable de manera lógica y ordenada, evitando cometer errores que significarían comenzar un nuevo modelo.

Dentro de la modelación existen varias clases de modelos, entre ellos los modelos físicos, análogos, los conceptuales que muestran una representación de la geología e hidrología del sitio, y los matemáticos dentro de los cuales se

²⁵WATERLOO TRAINING COURSE SERIES. Applied groundwater flow & contaminant transport modeling. Manual Tomo I; Bogotá, Diciembre 15-18, 2009.

encuentran los analíticos y numéricos basados en ecuaciones de flujo y conservación de la masa para la simulación del flujo y comportamiento del soluto.

3.4.1. Modelo hidrogeológico.

Un modelo hidrogeológico es una representación matemática o numérica, que simplifica la compleja hidrología, hidrogeología y química de un sitio seleccionado. Utilizando las ecuaciones que gobiernan el flujo y conservación de la masa, para simular flujo de agua y transporte de sustancias contaminantes en el medio poroso.

La solución o resultado de un modelo de simulación hidrogeológico corresponde a la distribución de los niveles de agua (acuífero libre) o niveles de energía o piezométricos (acuífero confinado) a través del espacio y tiempo. Los resultados anteriores permiten determinar la magnitud y dirección del escurrimiento de agua subterránea, la que puede ser afectada por acciones externas o procesos naturales.

Se debe señalar que un modelo hidrogeológico contiene numerosas interpretaciones cualitativas y subjetivas y la prueba de su validez sólo se logra mediante la aplicación de técnicas de investigación específicas y luego de que se construya un modelo numérico y se comparen los resultados de la simulación con las observaciones de campo.

Un modelo numérico tiene como objetivo ayudar a entender la hidrodinámica del sistema acuífero, permitiendo al momento de alcanzar la calibración en estado estacionario, representar y explicar la hidrodinámica del sistema acuífero. Una vez definido este objetivo se procede al diseño e implementación de la modelación numérica.

3.4.1.1. Desarrollo de un modelo hidrogeológico. Se pueden identificar tres macro actividades o etapas para desarrollar un modelo. La primera etapa se orienta a elaborar un modelo conceptual de la zona de estudio (A). La segunda es la construcción del modelo propiamente dicho (B), y la tercera etapa incluye su uso posterior (C).

El modelo se construye con base a observaciones reales y percepciones sobre el sistema hidrogeológico y el problema a analizar (conceptualización).

Los modelos de aguas subterráneas suponen una oportunidad única de obtener datos; estimar parámetros, formular modelos, establecer métodos numéricos. La creación de modelos es por tanto, un arte que combina las técnicas de la informática científica, las matemáticas, la geología, la hidrología de aguas subterráneas, la geoquímica y la ingeniería.²⁶

3.4.1.2. Simulación de eventos contaminantes en modelos hidrogeológicos.

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real; es un proceso muy importante, debido a que con base en este tipo de aplicaciones se pueden estudiar situaciones extremas, simuladas y que difícilmente se pueden observar en la realidad; además de mejorar la manera de entender el funcionamiento de los sistemas hídricos naturales y el futuro del agua en el medio ambiente.

Para la implementación de un modelo numérico, se tienen en cuenta la extensión del área a modelar, el nivel de detalle de la información disponible y la escala de trabajo a la cual se desea construir el modelo hidrogeológico conceptual; para así definir, inicialmente, el número de capas y el espaciamiento nodal que arrojará un

²⁶LAGREGA, Michael, BUCKINGHAM, Phillip L; EVANS, Jeffrey; Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos.

número adecuado y a la vez razonable de celdas, en términos de la magnitud de memoria computacional a ocupar y del tiempo de ejecución de cada corrida del modelo.

Antes de iniciar el ejercicio de ajuste de fronteras y parámetros para correr el modelo en estado permanente, se practican pruebas de análisis de sensibilidad que permitan definir las condiciones iniciales y establecer los criterios de convergencia con los que se ejecutará el programa. Luego, aplicando fundamentalmente el método de ensayo y error, con ocasionales exploraciones mediante módulos de calibración automática, se busca la solución que reproduzca condiciones hidrológicamente lógicas y ajustadas lo mejor posible las condiciones de campo. Una vez lograda la calibración del modelo en estado permanente se realiza un nuevo análisis de sensibilidad de parámetros para cuantificar el peso de la incertidumbre asociada a la información disponible.²⁷

Gracias a las actividades que contempla una simulación de modelos hidrogeológicos, la modelación de aguas subterráneas es una herramienta que permite predecir la dirección del flujo del agua subterránea, siendo clave para el manejo, control y remediación de los recursos hídricos. Con lo anterior se puede establecer que un modelo de aguas subterráneas es una representación de un sistema acuífero natural. El resultado confiable de este tipo de modelos se logra cuando las condiciones reales que se están simulando son adecuadamente representadas dentro del modelo, entregando una copia casi exacta de las condiciones naturales del sistema hídrico que se está evaluando y cuando el porcentaje de error en la calibración del modelo es bajo.

²⁷BETANCUR, T., PALACIO, C. La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales. Caso de aplicación: Bajo Cauca antioqueño, grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín.

3.4.2. Visual Modflow

El software visual Modflow es un programa diseñado para simular el flujo de agua subterránea en condiciones específicas, complementado por otros programas como Modpath, el cual muestra la trayectoria descrita por las partículas de fluido que se le hayan indicado; ZoneBudge el cual calcula el balance hídrico de cada zona que se establece dentro del modelo, señala el transporte de solutos y se encarga de mostrar la simulación en tres dimensiones.

Dentro de la modelación aplicada de flujo y transporte de contaminantes en aguas subterráneas se puede encontrar una amplia gama de actividades tales como la evaluación de recursos hídricos, investigación de campo de sitios contaminados, instalación de pozos de bombeo y de monitoreo hasta el diseño e implementación de la remediación. Para modelar este tipo de comportamientos también puede incluir el uso de los programas anteriormente nombrados; MTD, MODPATH y ZoneBudget.

Uno de los modelos más ampliamente difundidos a nivel mundial para la modelación del flujo de aguas subterráneas es Visual Modflow, que en su versión comercial incorpora otros programas; MT3D y RT3D, los cuales resuelven problemas de transporte, degradación y atenuación de contaminantes respectivamente.

Visual Modflow es un programa desarrollado por el servicio geológico de los Estados Unidos de América (U.S.A) para simular el flujo del agua subterránea o más exactamente; la evolución de los niveles en las condiciones especificadas: bombes, ríos, drenes, infiltraciones de las precipitaciones, etc.

En su versión original la utilización no era precisamente sencilla. En cambio hoy día existen versiones que utilizando el motor de cálculo original, le añaden una

interfaz cómoda para el usuario, tanto para introducir las características del modelo como para observar los resultados finales. La versión más extendida de este software se llama **Visual Modflow**.

Modflow presenta ventajas en la representación gráfica de los sistemas a modelar, facilitando la entrada de datos para definir el escenario de simulación. Asimismo presenta ventajas en la representación de los resultados entregados. Es capaz de representar el fenómeno de manera casi tridimensional, esto debido a que el esquema de resolución numérico empleado por el software corresponde a una representación de diferencias finitas, la cual entrega soluciones aceptables a los problemas modelados, a través de una metodología numéricamente sencilla.²⁸

Los datos de salida entregados por el software generalmente son: cotas, velocidades, direcciones de flujo, balance hídrico del área. Es de ésta manera que se logra analizar el comportamiento del flujo de aguas subterráneas y el transporte de los contaminantes en el subsuelo.

3.4.2.1. Comportamiento de contaminantes. Los programas como Visual Modflow simulan los mecanismos de transporte de contaminantes empleando una técnica denominada “tracking” o seguimiento de partículas, basada en la representación del movimiento del contaminante en el agua por intermedio de partículas que actúan a manera de trazadores, simulando la trayectoria de desplazamiento del contaminante a través del tiempo. El proceso consiste en la asignación de un número de partículas trazadoras en un punto específico, que puede bien ser la fuente de contaminación o el sitio de detección del agente estudiado (en este caso; los piezómetros); posteriormente, para un intervalo de tiempo determinado las partículas se desplazan a la velocidad del flujo, calculada

²⁸SANCHEZ, SAN ROMÁN F. JAVIER. Manual introducción a Visual ModFlow. . [Citado 27/01/11]. Disponible en Internet: http://web.usal.es/~javisan/hidro/Complementos/manual_modflow.pdf

en el sitio de detección de la partícula; de esta manera, la nueva localización se considera como un punto de partida para un nuevo intervalo de tiempo.

3.4.2.2. Fuentes de contaminación (BACKWARD). La simulación con el programa Visual Modflow permite ubicar partículas en los sitios en los cuales se detectó contaminante (piezómetros), por lo tanto se puede predecir su comportamiento tanto futuro (forward) como pasado (backward). Esta última opción determina la posible trayectoria que la partícula ha tenido que recorrer para llegar hasta el sitio actual; de esta manera se puede seguir su trayectoria hacia atrás y sugerir la probable ubicación del foco de contaminación.

3.4.2.3. Predicción del comportamiento del contaminante (FORWARD). Bajo el mismo criterio anterior de la trayectoria “backward”, se puede determinar cuál será el desplazamiento futuro de una partícula de contaminante mediante el empleo de la segunda opción del programa Visual Modflow, ubicando como fuente del contaminante cada uno de los piezómetros. El programa define la trayectoria y el tiempo que invierte la partícula en desplazarse, de acuerdo con las direcciones y velocidades de flujo, sin considerar movimiento dispersivo, retardación u otros fenómenos de interacción con el agua y el suelo.²⁹

3.5 Surfer[®] 8

Surfer[®], es un programa que sirve para hacer mapas y trazar líneas de contorno en 3D para Windows únicamente. Con facilidad y rapidez, el programa convierte todos los sus datos en mapas con contorno, superficie, vector, imagen y sombras.

²⁹ Empresa Colombiana de Petróleos (ICP). Modelación régimen de flujo de agua y dispersión de contaminantes en la refinería de Cartagena (CAR); 1998.

Virtualmente todos los aspectos de los mapas generados se pueden personalizar dependiendo de las necesidades de quién utiliza el software.

3.6 TERMINALES INDUSTRIALES SELECCIONADAS

El proyecto se desarrolló en las Terminales de la Gerencia de Poliductos de Sebastopol ubicado en el municipio de Cimitarra, Santander y Vasconia que se encuentra en Puerto Boyacá - Municipio de Boyacá.

3.6.1. Terminal de Sebastopol

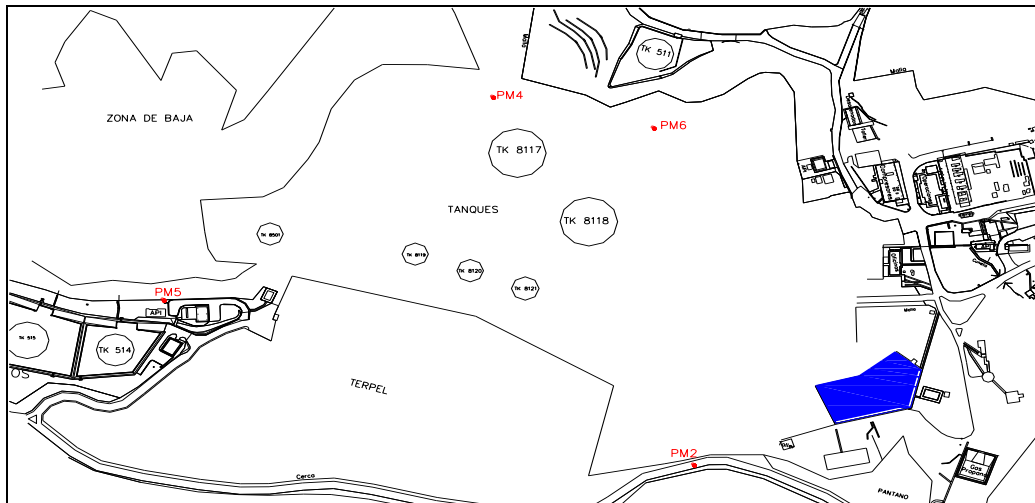
La Planta de Sebastopol se encuentra en el corregimiento de Puerto Olaya, municipio de Cimitarra - Santander, a dos kilómetros del municipio de Puerto Berrío- Antioquia, en el valle del Magdalena. La estación de Sebastopol hace parte del Departamento de Operaciones Antioquia; recibe productos refinados de la refinería en Barrancabermeja, almacena y distribuye productos refinados a Puerto Berrío, Puerto Salgar, Cisneros (oeste) y Medellín.

La Terminal cuenta con un área de 116 hectáreas y con 22 tanques para el almacenamiento de diferentes productos (en los términos de trabajo del personal que trabaja en la Estación es utilizado el término “TK” para referirse a los tanques). En la estación de Sebastopol se llevan a cabo los siguientes procesos: recepción, filtración y medición, almacenamiento, bombeo de productos refinados, mantenimiento, administración y suministro y procesos auxiliares como sistemas de fuego y tratamiento de aguas ³⁰

³⁰INSTITUTO COLOMBIANO DE PETROLEOS, CTP Ltda. Implementation Management and Capacity Development for Eco-Efficiency Programming, Sebastopol. Octubre 2010.

En la imagen 4 se observa el plano de la Estación Sebastopol en su extensión con sus respectivos piezómetros ubicados en color rojo.

Imagen 4. Estación Sebastopol.



Fuente: ICP

El área estudio se encuentra dentro de la denominada cuenca del Valle Medio del Magdalena, en la región afloran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias con edades desde el Precámbrico hasta el Holoceno; las rocas sedimentarias (areniscas, limonitas, calizas, lutitas, arcillolitas y conglomerados) se localizan en las regiones oriental central y occidental, con edades desde el Paleozoico a depósitos superficiales débilmente consolidados.

Teniendo como base la información registrada en el informe realizado por la empresa de Servicios e Investigaciones Ambientales (SIAM) en el año 2006 durante la perforación de la red de pozos de monitoreo, el área de estudio se caracteriza por presentar un primer cuerpo litoestratigráfico formado principalmente por limo arcilloso de color café a gris – rojizo de un espesor promedio de 1.5 m, suprayaciendo otro cuerpo conformado por arcillas limosas que presentan alguna aparición de gravas de tamaño menor a 5 cm, con un

espesor promedio de 1 m, por último en las perforaciones más profundas se encontró un tercer cuerpo litoestratigráfico formado por arenas finas a medias de color gris, con un espesor mayor a la longitud de los pozos de monitoreo, localmente no se observa un cambio lateral de facies, con base en esto y a la bibliografía encontrada de la geología de la zona, se puede inferir que se trata de la formación denominada Abanicos y Terrazas (Qtf).

Geomorfológicamente es una región de topografía suave y ondulada, cuyas alturas en su mayor parte no sobrepasan los 100 m.s.n.m. En esta región se destaca una zona de valles aluviotorrenciales, que corresponde a las partes más bajas y fértiles de los principales ríos que desembocan en el río Magdalena y que también está relacionado con su cauce actual. Esta zona presenta un clima cálido y la principal vocación económica de la región es la ganadera.

En esta zona se instalaron seis (6) pozos de monitoreo con el fin de obtener información del grado de contaminación de la zona vadosa, así como de las características geo-hidráulicas del acuífero más somero.³¹

3.6.2. Estación Vasconia

La Estación Vasconia se encuentra localizada en la vereda Calderón a una altura de 140 m.s.n.m, en el Magdalena Medio del departamento de Boyacá, a 17 kilómetros al norte del municipio de Puerto Boyacá, sobre la margen derecha del río Magdalena. Abarca una superficie de 170 hectáreas y 17 tanques (TK). Se encuentra bajo la administración de la Vicepresidencia de Transporte, que se encarga de la construcción de la estructura de transporte y operación, así como la distribución de los productos de hidrocarburos y sus derivados. En Vasconia

³¹SIAM s.a, construcción de la red de pozos de monitoreo en el terminal de sebastopol. Ecopetrol, 2006.

también se almacena diesel, que es una fuente alternativa de energía durante los apagones con el fin de ejecutar los principales equipos requeridos para las operaciones de bombeo de crudo.

La zona de interés presenta un clima promedio de 32°C. Por allí pasa cerca del 80% de la producción nacional, con excepción de la producción proveniente de Caño Limón y el que se transporta por el Oleoducto Transandino.³²

En la imagen 5 se observa el plano de la Estación Vasconia en su extensión con sus respectivos piezómetros ubicados en color verde.

³²CARTA PETROLERA EDICIÓN 114. Una historia con peso[En línea] Abril – Mayo 2010; http://portal.ecopetrol.com.co/especiales/Informe_Carta_Abr2006/rev_tecnologia2.htm[Citado en 31 de Agosto de 2011].

Imagen 5. Estación Vasconia.



Fuente: ICP

La zona de estudio se encuentra ubicada en la denominada cuenca del Valle Medio del Magdalena. Esta zona se caracteriza por presentar una gruesa secuencia de sedimentitas terciarias, las cuales son reservorios probados. A nivel de subsuelo se observa una serie de fallas, convergencia opuesta al patrón regional (es decir en sentido este oeste) de alto ángulo.

Geomorfológicamente, es una región de topografía suave y ondulada, cuyas alturas en su mayor parte no sobrepasan los 160 m.s.n.m. En esta región se

destaca una zona de valles aluvio-torrenciales, que corresponde a las partes más bajas y fértiles de los principales ríos que desembocan en el río Magdalena y que también está relacionado con su cauce actual.³³

Teniendo como base la información registrada en el informe realizado por la empresa de Servicios e Investigaciones Ambientales (SIAM) en el año 2006 durante la perforación de la red de pozos de monitoreo, la litología encontrada durante construcción de los pozos de monitoreo, se puede correlacionar de la siguiente manera: en el PM1, se observa una capa de arena de grano medio de matriz arcillosa de color café oscuro de alta plasticidad que igualmente aparece en el PM2 con un espesor de 2,20 m infrayacida por arena de grano muy fino a fino de color gris, de plasticidad media baja, de baja compactación, esta misma litología hace presencia en los PM N°. 4, 5, 6, 7 con un espesor promedio de 2,50 m, en los PM Nos, 5, 6 y 7 se presenta inferior a esta capa una arcilla de color gris – café, con matriz arenosa de plasticidad media y compactación media. Esta variación lateral local de facies reportada, es normal para este ambiente de formación y depende de la energía con la que se depositan los sedimentos. De acuerdo con los resultados, se puede deducir que el área de estudio corresponde a los depósitos cuaternarios denominados Abanicos y Terrazas (Q_{tf}).

La principal actividad económica de la región es la ganadería seguida del comercio con municipios circunvecinos de la zona del Magdalena medio. La zona de influencia hidrográfica de la estación Vasconia hace parte de la cuenca media del Río Magdalena y específicamente de la subcuenca del Caño Palagua, el cual nace en la parte occidental de la Serranía Las Quinchas, a una altura aproximada de 200 m.

Esta estación fue construida en el año de 1989, propiedad 100% de Ecopetrol, con el fin de recibir los crudos provenientes del centro, oriente y sur del país,

³³SIAM S.A, Construcción de la red de pozos de monitoreo en el terminal de Vasconia. ECOPETROL, 2006.

mezclarlos y bombearlos hacia Refinería de Barrancabermeja (Complejo Industrial de Barrancabermeja) para refinarlos y abastecer la demanda interna de combustibles.

4. MARCO NORMATIVO

Colombia no cuenta con normatividad específica referente a la contaminación de aguas subterráneas por lo tanto se hará referencia a disposiciones nacionales de protección y aprovechamiento de este recurso. El decreto 2811 de 1974 que estableció el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables (CNRN) y de Protección al Medio Ambiente, contempla párrafos donde se hace referencia al recurso hídrico subterráneo. A continuación se mostraran algunos de ellos:

Artículo 150º.- Se organizará la protección y aprovechamiento de aguas subterráneas.

Artículo 151º.- El dueño, poseedor o tenedor tendrá derecho preferente en el aprovechamiento de las aguas subterráneas existentes en su predio, de acuerdo con sus necesidades. Se podrá otorgar concesión de aprovechamiento de aguas subterráneas en terreno distinto al del peticionario, para los usos domésticos y de abrevadero, previa la constitución de servidumbres, cuando se demuestre que no existen en el suyo en profundidad razonable y cuando su alumbramiento no contraviene alguna de las condiciones establecidas con este título.

La concesión se otorgará sin perjuicio del derecho preferente del dueño, tenedor o poseedor del terreno en donde se encuentran las aguas, que podrá oponerse a la solicitud en cuanto lesione ese derecho, siempre que esté haciendo uso actual de las aguas o se obligue a hacerlo en un término que se le fijará según el tipo y la naturaleza de las obras necesarias y en cuanto el caudal subterráneo no exceda las necesidades de agua del predio.

Artículo 152º.- Cuando se compruebe que las aguas del subsuelo de una cuenca o de una zona se encuentran en peligro de agotamiento o de contaminación, o en

merma progresiva y sustancial en cantidad o calidad, se suspenderá definitiva o temporalmente el otorgamiento de nuevas concesiones en la cuenca o zona; se podrá decretar la caducidad de las ya otorgadas o limitarse el uso, o ejecutarse, por cuenta de los usuarios, obras y trabajos necesarios siempre que medie el consentimiento de dichos usuarios, y si esto no fuere posible, mediante la ejecución de la obra por el sistema de valorización.

Artículo 153º.- Las concesiones de aprovechamiento de aguas subterráneas podrán ser revisadas o modificadas o declararse su caducidad, cuando haya agotamiento de tales aguas o las circunstancias hidrogeológicas que se tuvieron en cuenta para otorgarlas hayan cambiado sustancialmente.

De la misma manera el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) en su PROGRAMA DE EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS propone una iniciativa para evaluar el potencial del recurso hídrico del subsuelo colombiano en cumplimiento de sus funciones como entidad del Estado y con la generación de conocimiento que aporte a la satisfacción de necesidades de la sociedad en cuanto agua potable, especialmente.

La Norma Técnica Colombiana NTC 5539 "Pozos Profundos " brinda los requisitos y especificaciones mínimas para la construcción de pozos profundos de agua subterránea, sin modificar las condiciones de los acuíferos y su calidad de agua. En el Artículo 38 del Decreto 1594/84, se decretan los criterios de calidad para la destinación del recurso al uso humano y doméstico.

La resolución 2115 de 2007 por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

A pesar de la ausencia de normatividad que regule los niveles máximos permisibles de TPHs en suelos y aguas subterráneas, se establece como valor base el recomendado por el Instituto Americano de Petróleo – API, de un 1% de P/P (10.000 ppm), basado en la toxicidad para plantas y movilidad de los hidrocarburos hacia aguas subterráneas, sin embargo, es posible tomar como referencia la norma Louisiana 29B, en la cual se establecen como valores máximos permisibles de TPHs un 3% de P/P.³⁴

Para establecer el grado de contaminación por compuestos nocivos ambientalmente como los BTEXs (benceno, tolueno, etilbenceno, o-xileno y m,p-xileno), se toma como referencia la legislación canadiense Alberta Risk Management Guide Lines For Petroleum Storage Tank Sites 2001.³⁵

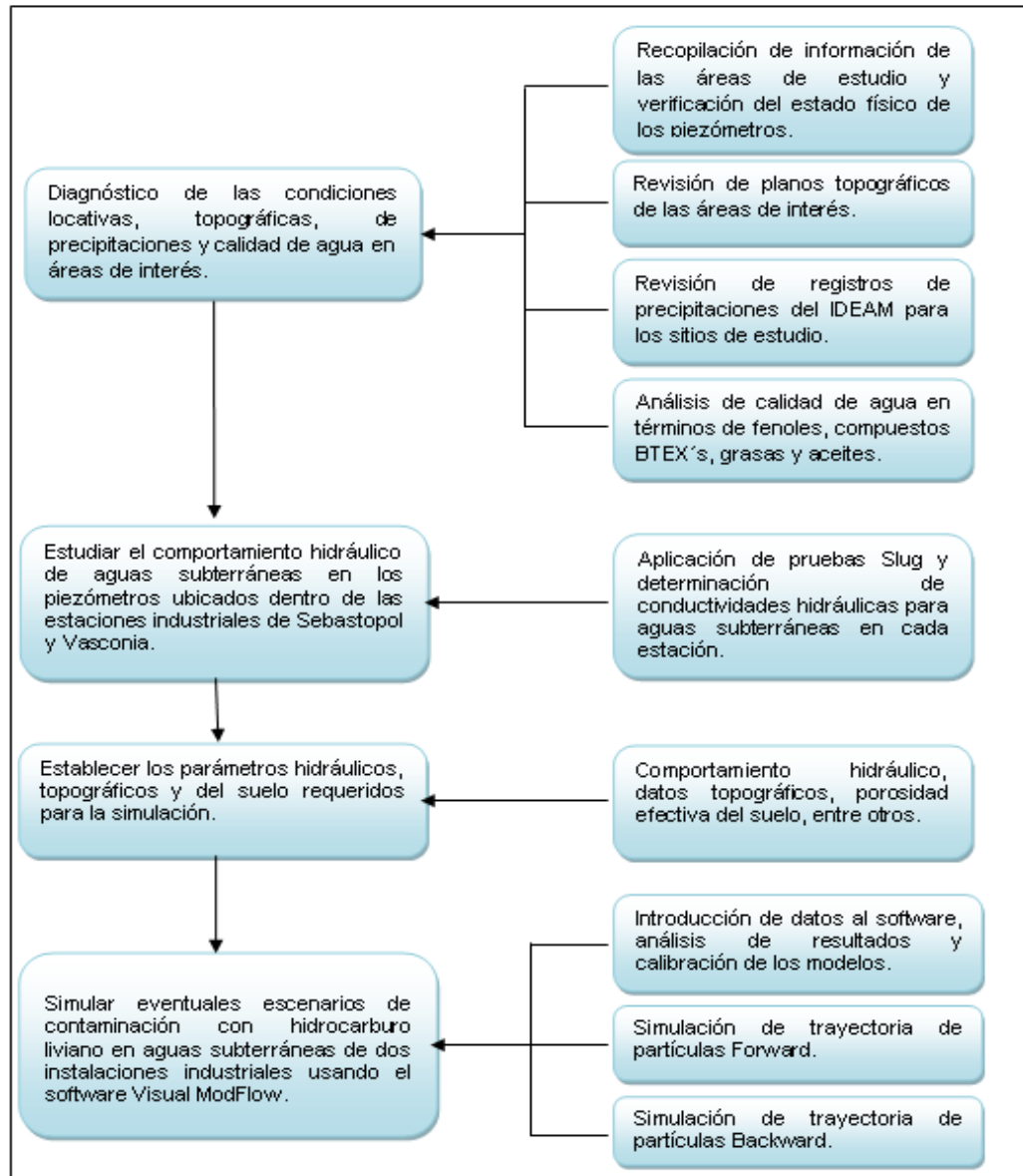
³⁴ IBARRA, Diana; Evaluación del potencial de degradación de hidrocarburos totales en suelos contaminados procedente de PetroSantander Colombia INC. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2008; 51-53p.

³⁵ ALBERTA ENVIRONMENT. 2001. Alberta Risk Management Guidelines for Petroleum Storage Tank Sites. Table 4. Generic Hydrocarbon Criteria for the Groundwater Ingestion Pathway. Alberta. Canadá.

5. METODOLOGIA

A continuación en la imagen 6 se ilustra de forma general la metodología aplicada en este proyecto.

Imagen 6. Metodología aplicada en el proyecto.



Fuente: Autor.

Para realizar la simulación de escenarios de contaminación de aguas subterráneas dentro de las áreas escogidas, se aplicó la misma metodología para las dos estaciones, la cual inició por la realización del diagnóstico de las condiciones locativas, topográficas, de precipitación y calidad del agua en las áreas de interés. Este diagnóstico se desarrolló teniendo en cuenta las respectivas visitas a campo realizadas y los análisis que se le practicaron a las muestras de agua. Seguido a esto se estudió el comportamiento hidráulico de las aguas subterráneas presentes en los pozos de monitoreo dentro de las áreas seleccionadas utilizando el método Hvorslev (explicado en el numeral 5.2 del presente documento) y se establecieron los parámetros necesarios para la simulación como: conductividades hidráulicas, datos topográficos y propiedades específicas del suelo, dando finalmente paso a la simulación propiamente dicha del modelo matemático. El resultado del modelo fue la simulación de la extensión de la pluma contaminante, a través de las trayectorias de partículas que pueden predecir el comportamiento de un contaminante tanto futuro (forward) como pasado (backward). A continuación se especifica cada uno de los pasos metodológicos realizados.

5.1. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES LOCATIVAS, TOPOGRÁFICAS, DE PRECIPITACIONES Y CALIDAD DE AGUA EN AREAS DE INTERÉS.

Para efectuar el diagnóstico de las condiciones locativas de las áreas de estudio, se verificaron los antecedentes históricos registrados en la documentación de la empresa y se realizaron las respectivas visitas de campo a cada una de las instalaciones industriales seleccionadas para este proyecto, con el fin de verificar el estado de los piezómetros, los cuales proporcionaron los parámetros de gran importancia en la simulación, así mismo se hizo la respectiva revisión de planos topográficos y compra de registros de precipitaciones proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM)

de las áreas elegidas, con las cuales se logró establecer las condiciones de recarga para los modelos.

Teniendo en cuenta la distribución de los tanques de almacenamiento y los piezómetros, en los cuales se realizan monitoreos constantes en cada uno de los sitios estudiados, se seleccionaron los puntos de muestreo de agua subterránea para realizar el análisis físico-químicos y de esta manera se logró obtener la información requerida para la posterior simulación del desplazamiento de la pluma contaminante.

Para la realización de las pruebas físico-químicas de las aguas subterráneas, se ejecutó un monitoreo dentro del cual se tomaron muestras de agua provenientes de los pozos para examinar los parámetros de interés (Fenoles, grasas y aceites y compuestos BTEXs). Los pozos seleccionados en la estación de Sebastopol se muestran en la fotografía 1: PM2 (Cerca de la salida del Pozo Séptico # 1), PM4 (Frente al tanque 17), PM5 (Frente al separador #3 tanque geodésico) y PM6 (Cerca al compresor poliducto Oriente). Estos piezómetros han sido sujeto de anteriores actividades de control y seguimiento por parte del ICP.

Fotografía 1. Pozos de monitoreo Estación Sebastopol.



Fuente: Autor.

Los pozos de monitoreo de la Terminal de Vasconia se muestran en la fotografía 2 así: PM1 (frente a la salida del API Vasconia I), PM2(frente al TK 603), PM4(frente al TK 703), PM5 (frente a la entrada del API Vasconia II), PM6 (frente al TK TC 601), PM7 (frente a la oficina de técnicos), PM8 (frente al TK 55000 área de Vasconia III), PM9 (frente al TK 606).

Fotografía 2. Pozos de monitoreo Estación Vasconia.



PM- 1



PM- 2



PM- 4



PM-5



PM- 7



PM- 8



PM- 9

Fuente: Autor.

En las dos instalaciones industriales, el análisis de calidad de las aguas subterráneas se realizó conforme a lo establecido en el Artículo 38 del Decreto 1594/84, donde se establecen los criterios de calidad para la destinación del recurso al uso humano y doméstico. Adicionalmente, teniendo en cuenta que en Colombia no se dispone de una normatividad que regule la contaminación de las aguas subterráneas por compuestos nocivos ambientalmente como los BTEXs (benceno, tolueno, etilbenceno, o-xileno y m,p-xileno), se tomó como referencia la legislación canadiense Alberta Risk Management Guide Lines For Petroleum Storage Tank Sites 2001.

A continuación se indican los métodos aplicados para el análisis de calidad de agua.

5.1.1. Ensayos físico-químicos de aguas subterráneas en Sebastopol.

La serie de ensayos descrita a continuación fueron realizados en el laboratorio del Instituto Colombiano de Petróleo (ICP), acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

Los análisis físico-químicos que se realizaron a las muestras de agua subterránea extraídas fueron los siguientes:

5.1.1.1. Determinación de pH. La determinación de pH se realizó usando un pH-metro Mettler Toledo 5936 calibrado con 3 soluciones buffer de pH (4.0, 7.0 y 10.0).

5.1.1.2. Oxígeno disuelto. Esta determinación se realizó mediante método Winkler in situ utilizando el kit de oxígeno disuelto Merck.

5.1.1.3. Fenoles. Compuestos analizados por determinación espectrofotométrica a 500 nm por desarrollo de color con 4-amino antipirina.

5.1.1.4. Compuestos BTEXs. Compuestos analizados por cromatografía de gases empleando un detector de ionización de llama (FID).

5.1.1.5. Grasas y aceites. Método gravimétrico, con extracción de las grasas y aceites usando como solvente n-hexano.

A continuación en la tabla 1 se relacionan las normas técnicas empleadas para los análisis de laboratorio.

Tabla 1. Normas técnicas empleadas.

PRUEBA	NORMA TECNICA
Fenoles (fotométrico) MCC	AWWA 5530 A, B, D/05
Grasas y aceites (MCC)	AWWA 5520 A, B/05
BTEXs (MCC)	US EPA, SW 846, METHODS 8000C/8021B/8260C/5000A/5021 A/3500C/3580A

MCC: mínima concentración cuantificable.

Fuente: ICP

5.1.2. Revisión de información topográfica del área de interés.

La topografía de las estaciones industriales seleccionadas se estableció directamente de acuerdo a la información con la que cuenta la empresa; por medio de archivos digitales y físicos se obtuvo los valores de cotas y coordenadas posteriormente interpoladas en Surfer[®] (definido en el numeral **3.5 del Marco Teórico**) e introducidas al modelo con el interpolador Kriging para lograr distribuir los datos topográficos de manera uniforme y más cercana a la realidad observada en campo. La topografía a nivel subterráneo se asumió de manera similar a la superficial, pero teniendo en cuenta la profundidad de cada pozo y el espesor de las capas asignadas; las dos capas para el modelo de Sebastopol cuentan con un espesor de 5 m cada una y para las dos capas de Vasconia un espesor de 3 m cada una.

El proceso de interpolación de las curvas de nivel y de la topografía del área de estudio es uno de los pasos primordiales para la simulación del flujo de agua subterránea. Este se realizó a través del software Surfer[®], en donde se importaron los datos topográficos georeferenciados y se estableció como valor del parámetro Z la cota de terreno.

5.2. ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DENTRO DE LAS ESTACIONES INDUSTRIALES

Con el fin de calcular la magnitud de la conductividad hidráulica del acuífero, que es el parámetro básico, el cual permite definir el rendimiento del mismo, se llevó a cabo la ejecución de pruebas de Slug o de cambio rápido de presión en cada uno de los pozos de monitoreo construidos; para lo cual se empleó un muestreador manual tipo Bailer de PVC.

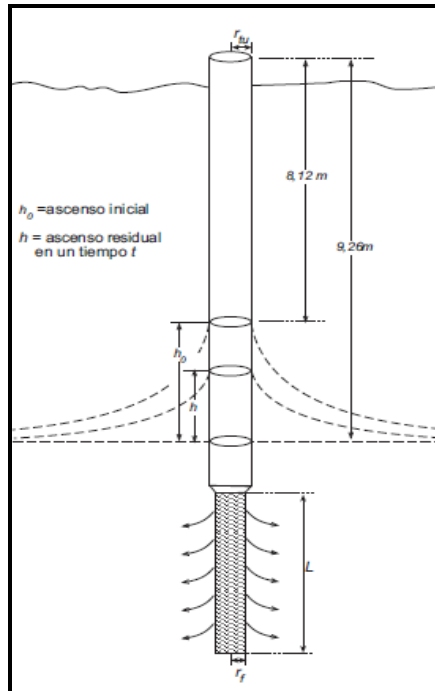
A través de una sonda eléctrica de nivel Geotech interface, la cual posee una cinta métrica que mide la profundidad del agua o del aceite mediante un sensor que emite un sonido constante al detectar aceite o un sonido intermitente si es agua, se logró establecer el nivel estático de cada pozo y así mismos e seleccionaron los tiempos apropiados para realizar la prueba slug dependiendo del comportamiento natural de recuperación de cada piezómetro construido. Utilizando el método Hvorslev, se generó un ascenso inicial y seguido a esto se midieron los niveles en función del tiempo (Ver imagen 8); es una técnica típica utilizada para piezómetros que no atraviesan el acuífero en su totalidad y trabaja en función de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{r_{tu}^2 \ln\left(\frac{L}{r_f}\right)}{2 L t_{37}}$$

Donde K = conductividad hidráulica, r_{tu} = radio de la entubación, L = longitud de la rejilla o parte ranurada de la perforación, r_f = radio de la zona filtrante y t_{37} = tiempo en el que aún perdura el 37% del ascenso instantáneo inicial³⁶

³⁶SANCHEZ, SAN ROMÁN F. JAVIER. Medidas puntuales de permeabilidad "Slugtests". Universidad de Salamanca, España. [Citado 27/09/11]. Disponible en Internet: http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Slug_tests.pdf

Imagen 7. Método Hvorslev para conductividad hidráulica.



Fuente: Sánchez, San Román F. Javier. Medidas puntuales de permeabilidad "Slug tests".

A su vez el procedimiento, arrojó una gráfica que muestra la relación entre el abatimiento adimensional y el tiempo, generando de ésta manera una línea de ajuste, cual que debe pasar lo más cercano posible a los puntos que representan los datos de campo. Se asignaron los valores para las conductividades X (m/d) y Y (m/d) de la misma manera, y para la conductividad Z (m/d) se tomó la décima parte del valor anterior.

Con esta serie de valores, el software Visual Modflow interpoló por el método de Distancia Inversa (Distance Inverse) las conductividades para ambos modelos. El método descrito anteriormente fue validado para estos datos porque al observar el mapa de contornos, distribuye de manera más uniforme el rango de valores; así mismo la calibración del modelo con este método de interpolación arroja un porcentaje de error más bajo comparado con la calibración del método Kriging.

5.3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS, TOPOGRÁFICOS Y DEL SUELO.

El modelo matemático Modflow requiere diversos parámetros del terreno como el comportamiento hidráulico de los piezómetros, datos topográficos, propiedades del suelo como porosidad, litografía. El criterio de la persona, la cual utiliza el software, genera compromiso entre la respuesta, precisión y procesamiento de la información del mismo.

Con base a los modelos anteriormente desarrollados por la empresa de Servicios e Investigaciones Ambientales (SIAM), los cuales simulan la dirección del flujo de agua subterránea en áreas de estudio con el fin de establecer los puntos para construir los pozos de monitoreo y los resultados obtenidos al introducir diferentes variables, se compararon y determinaron los parámetros hidráulicos, topográficos y del suelo necesarios para realizar la simulación del desplazamiento del contaminante dentro de las dos áreas de interés con el fin de mejorar el proceso de modelación.

Las medidas de porosidad se establecieron de manera teórica (valores estimados de la porosidad según Sanders. 1998) teniendo en cuenta el tipo de suelo registrado en los perfiles litológicos de cada uno de los pozos de monitoreo; ésta información fue proporcionada directamente por el Instituto Colombiano de Petróleos (ICP).

5.4. SIMULACION DE ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBURO LIVIANO

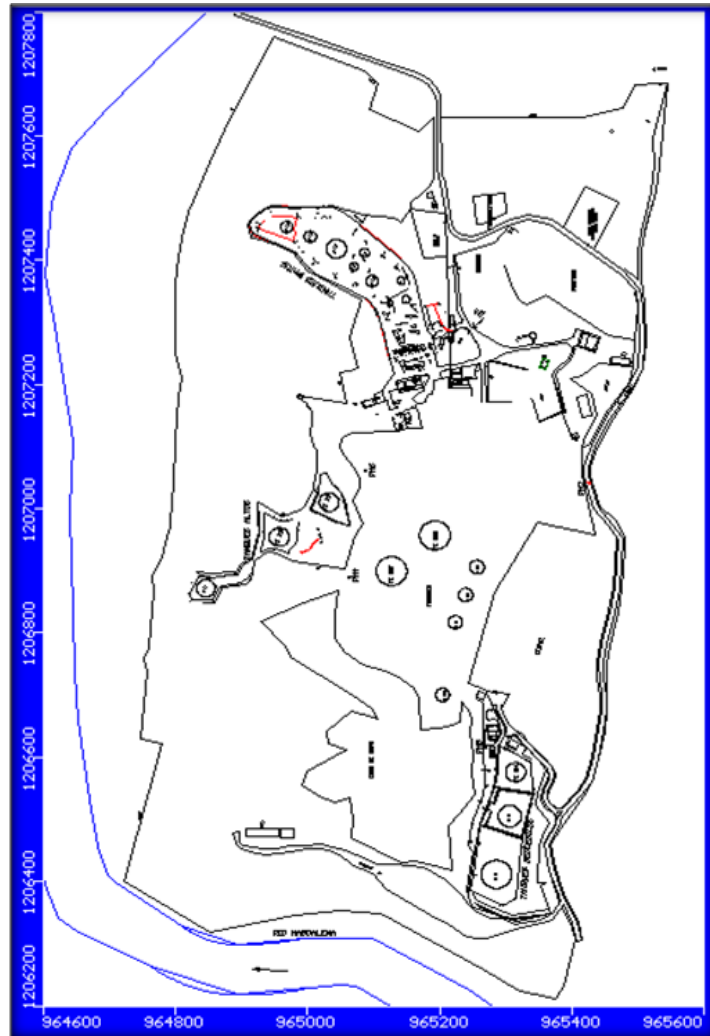
Teniendo como base la información anteriormente seleccionada y analizada, se asignaron los datos de niveles estáticos, conductividades hidráulicas, capas del subsuelo en estudio, propiedades del acuífero, condiciones de fronteras e información topográfica para empezar de esta manera el montaje del modelo

matemático. Además se tuvo en cuenta los cuerpos hídricos que se encuentran cercanos al área de influencia (espesor, conductividad hidráulica del lecho) para lograr así un mayor dimensionamiento del rango espacial que se trabajó.

Después de obtener los primeros resultados, se analizaron los modelos y así mismo se evaluó la calibración obtenida con el fin de contar con un modelo confiable. Seguido a esto se realizó la simulación de las trayectorias a 1, 2, 5 y 10 años utilizando las partículas forward y backward ubicadas en puntos estratégicos de la estación y finalmente se simuló la extensión de la pluma contaminante.

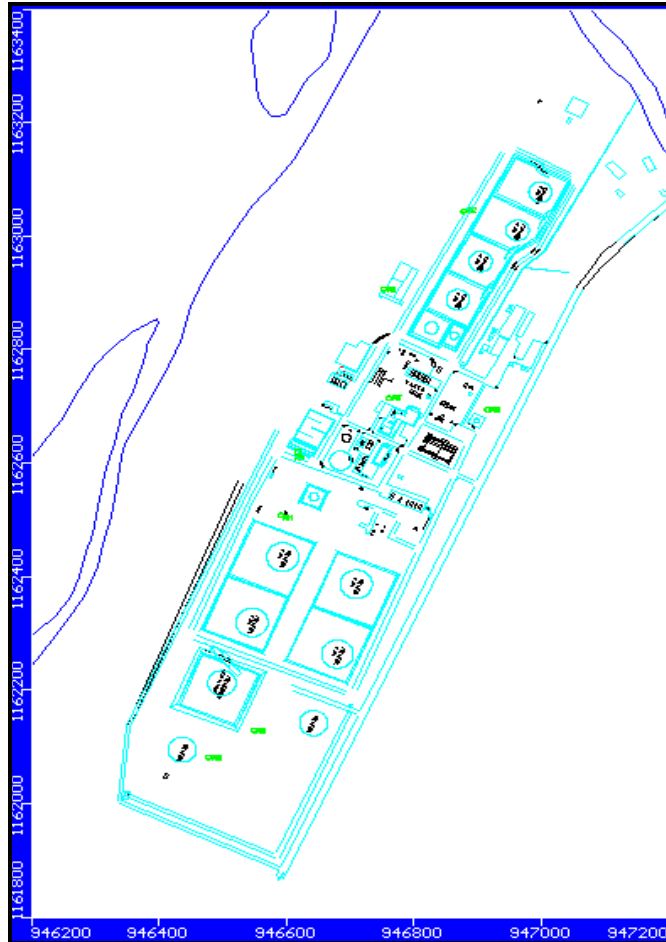
La modelación de flujo de agua subterránea y extensión de la pluma contaminante se realizó en las estaciones industriales de Sebastopol y Vasconia. Las áreas de modelación se muestran en la imagen 8 e imagen 9.

Imagen 8. Área de modelación Estación Sebastopol.



Fuente: Autor.

Imagen 9. Área de modelación Estación Vasconia.



Fuente: Autor.

Para la elaboración del modelo de aguas subterráneas en la estación Sebastopol se hizo necesaria la utilización de 3 software: Autocad, Surfer[®], y Modflow. Autocad se utilizó como herramienta para delimitar el área de interés y establecer coordenadas, Surfer[®], permitió la interpolación de curvas de nivel del terreno teniendo en cuenta los datos topográficos históricos de la estación, y Modflow que finalmente entregó el modelo propiamente dicho.

5.4.1. Discretización del Modelo

La malla general utilizada en Modflow tenía 20 columnas y 20 filas. Éstas últimas fueron refinadas por cuatro (4) y las columnas refinadas por cinco (5) para obtener finalmente una malla de 10 x 15. El área refinada incluyó la ubicación exacta de los pozos de monitoreo, zonas topográficamente altas y cuerpos hídricos representativos.

5.4.2. Dirección de Flujo de Agua Subterránea

Con el fin de obtener un modelo confiable en cuanto a extensión y trayectoria de la pluma contaminante, se hizo indispensable la utilización del software Visual Modflow; al cual se le suministró la información arrojada por Surfer[®], y a su vez los siguientes datos de entrada:

- Cantidad de pozos de monitoreo e información litológica de los mismos.
- Niveles estáticos actuales y cotas topográficas de los piezómetros.
- Elección de modelación en estado estacionario o permanente.
- Asignación de capas de modelación que admita la posibilidad de tener un acuífero libre o confinado.
- Tiempo de modelación (aplicado para 1095 días).

5.4.3. Calibración del Modelo

Para la calibración del modelo es importante tener en cuenta los valores que se introducen en el modelo (datos observados) y los valores que el software calcula bajo sus principios matemáticos (datos calculados) para realizar la respectiva comparación y establecer los porcentajes que error, los cuales estarán acompañados de la respectiva gráfica de calibración. La calibración del modelo es un indicio importante sobre la confiabilidad del modelo; por tanto, a partir de este

proceso y su resultado es posible establecer la necesidad de ajustar el modelo o de considerarlo totalmente confiable para un estudio.

5.4.4. Aplicación de Modpath y Pathlines para evaluación de las trayectorias de partículas Forward y Backward.

Las trayectorias de las partículas asignadas en el modelo desarrollado en la estación Sebastopol fueron evaluadas utilizando PATHLINES y MODPATH (sistemas integrados de MODFLOW). Éstos permiten asignar partículas cuyo recorrido se proyecta en un tiempo específico, dependiendo de las condiciones de flujo del agua subterránea. En Sebastopol se asignaron partículas radiales backward y forward en lugares específicos tales como los tanques 8118 y 8117, la entrada de los tanques geodésicos, el PM6 y el límite con la empresa Gases de Antioquia, donde anteriormente se había detectado presencia de producto debido a un evento de contaminación.

En Vasconia las partículas radiales y circulares se asignaron en los tanques 703 y 704, en los PM1, PM2, PM7 y en los tanques TP-601, TP-602, TP-603, al igual que al costado del API específicamente; debido a que son lugares propensos a sufrir algún tipo de contaminación ya sea por fuga o escape de producto. Todas las partículas se asignaron para tiempos de 1, 2, 5 y 10 años de simulación.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES LOCATIVAS, TOPOGRÁFICAS, DE PRECIPITACIONES Y CALIDAD DE AGUA EN PLANTA SEBASTOPOL.

A continuación en la fotografía 3 se muestra una vista panorámica de la planta Sebastopol – Puerto Berrio.

Fotografía 3. Panorámica Estación Sebastopol.



Fuente: ICP

En la visita a campo realizada a la Estación Sebastopol se recopiló información de los tanques ubicados dentro de la planta; el tipo de producto almacenado, capacidad, dimensiones y su vez se realizó el inventario del estado físico de los piezómetros y de las estructuras con las que cuenta el área de estudio. Los pozos de monitoreo PM1 y PM3 no se hallaron en el lugar que inicialmente estaban georeferenciados, por lo cual no fueron tenidos en cuenta para la simulación. Algunos de los otros piezómetros se encontraban un poco abandonados por lo cual fue necesario adecuar la zona para realizar las pruebas de conductividad.

Los registros de precipitaciones pedidos al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) para esta planta no fueron tenidos en cuenta debido a la suspensión de la estación meteorológica Los Pozos [N° 23090090], la cual se escogió por su cercanía a la planta; las otras estaciones meteorológicas del sector fueron descartadas por encontrarse lejos del área de interés o por no contar con datos representativos.

A continuación se interpretan los resultados obtenidos de los parámetros de interés para el desarrollo de este proyecto. **(VER ANEXO 1)**

6.1.1. Ensayos físico-químicos de aguas subterráneas en Sebastopol.

La serie de ensayos que se muestran a continuación fueron realizados en el laboratorio del Instituto Colombiano de Petróleo (ICP), acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para los parámetros de interés analizados dentro del proyecto y su respectiva interpretación.

Tabla 2. Caracterización físico-química de aguas subterráneas Sebastopol.

AGUAS SUBTERRANEAS PLANTA SEBASTOPOL	UNIDADES	PM-2	PM-4	PM-5	PM-6	DECRETO 1594/84 ART. 38
		CERCA DE LA SALIDA DEL POZO SEPTICO N°1 POLIDUCTO ORIENTE	FRENTE AL TK 8117	FRENTE AL SEPARADOR CPI N°3 TK GEODESICOS	CERCA AL COMPRESOR POLIDUCTO ORIENTE	
DATOS IN SITU						
PROFUNDIDAD	M	0,16	4,06	6,47	1,97	NR
OXIGENO DISUELTO	mg O ₂ /L	0,3	4,3	3,7	4,9	NR
PH	Uni. pH	5.74	5.83	5.5	5.79	5.0 -9.0
TEMPERATURA DEL AGUA	°C	30,3	32,3	31,7	31,8	NR
ANALISIS DE LABORATORIO						
FENOLES	mg/L	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0,002
GRASAS Y ACEITES	mg/L	<1.07	<1.07	14,1	<1.07	No se observa película visible
ANALISIS DE BTEXs						
BENCENO	microg/L	<2.76	<2.76	2,085	<2.76	NR
TOLUENO	microg/L	<2.23	<2.23	3,008	<2.23	NR
ETILBENCENO	microg/L	<1.82	<1.82	2,337	<1.82	NR
m+p-XILENO	microg/L	<1.85	<1.85	3,634	<1.85	NR
o-XILENO	microg/L	<2.30	<2.30	11,05	<2.30	NR

6.1.1.1. Determinación de pH. Como es posible observar: los valores de pH hallados en las aguas de los piezómetros ubicados dentro de la estación Sebastopol fluctuaron entre 5.5 – 5.8 unidades de pH, los cuales se hayan entre los niveles permitidos por el decreto señalado (5.0 – 9.0 unidades, Art. 38 Decreto 1594/84).

6.1.1.2. Oxígeno Disuelto. Los valores obtenidos de oxígeno disuelto en las aguas subterráneas monitoreadas en la Planta Sebastopol, oscilaron entre 0.3 – 4.9 mg O₂/L. Estas concentraciones bajas son consideradas normales (no incumplen la norma) para esta clase de aguas, cuyo nivel freático se encuentra a una profundidad que limita el contacto con el aire atmosférico.

6.1.1.3. Fenoles. En los piezómetros monitoreados de la estación Sebastopol se evidencia que las aguas presentes en ellos no se encuentran afectadas por los

contaminantes relacionados al petróleo, reportando de esta manera la mínima concentración cuantificable del método empleado en el laboratorio (<0.10 mg/L).

6.1.1.4. Grasas y Aceites. Las aguas subterráneas monitoreadas en la Planta Sebastopol reporta concentraciones de grasas y aceites < 1.07 mg/L para los pozos PM2, PM4 y PM6. Para el pozo PM5 se reporta un valor 14.1 mg/L, cual puede obedecer a la ubicación del piezómetro que se encuentra al costado del API; sitio donde se almacenan las aguas provenientes de procesos de perforación. A pesar de no existir una razón clara sobre el valor de grasas y aceites registrado, se podría plantear la hipótesis de una fuga o daño en la estructura a nivel de las formaciones y por ende el resultado en dicho parámetro. El análisis de Hidrocarburos no polares en los puntos monitoreados registraron valores del orden de la mínima concentración detectable <1.07 mg/L, resultan que infieren la no afectación de la calidad de esta agua subterráneas por este tipo de compuestos.

6.1.1.5. Compuestos BTEXs. Con respecto a los análisis de BTEXs en el PM-6 (cerca al compresor Poliducto Oriente), PM2 y PM4, las concentraciones son inferiores a la mínima cuantificable del método usado y en el PM5 se detecta la presencia este tipo de componentes, sin embargo las concentraciones son inferiores a los niveles establecidos en la legislación canadiense (Alberta Risk. 2001), lo cual significa que no hay indicios de contaminación del agua subterránea en la estación Sebastopol a causa de este tipo de compuestos.

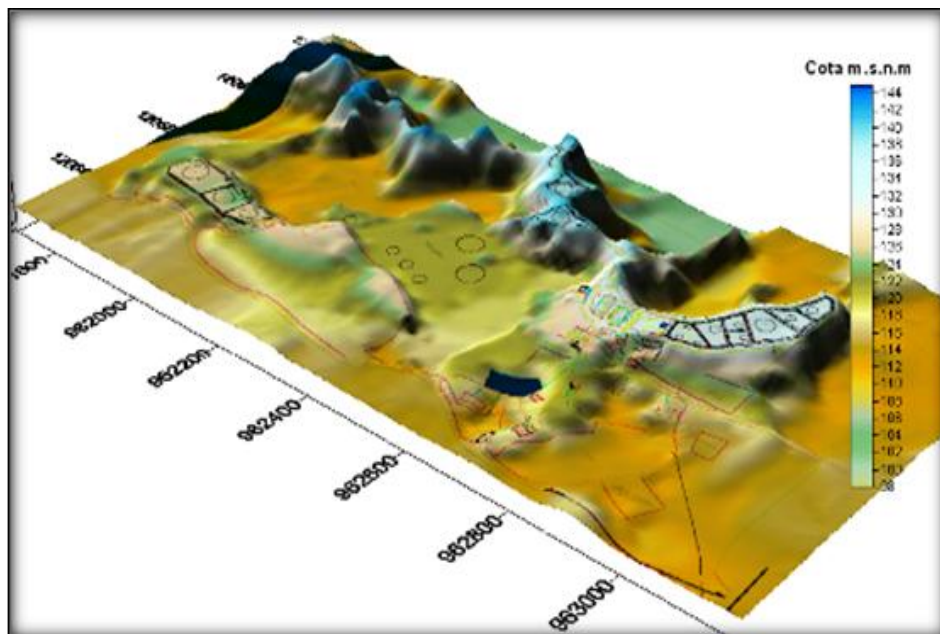
6.1.3. Interpolación de curvas de nivel en el programa Surfer®

La grilla se estableció con coordenadas mínimas de 964600 E – 1206200 N y máximas de 965600 E – 1207800 N para la estación Sebastopol, determinadas previamente en AutoCad, las cuales representaron un mapa de contornos utilizando el método de interpolación Kriging de Surfer®, debido a su aproximación a las condiciones del entorno visualizado en las visitas de campo.

El conocimiento de las elevaciones del terreno contribuye a una mejor conceptualización del modelo hidrogeológico, pues permite el manejo de magnitudes reales y a escala en el proceso de definición de la geometría del área de estudio. A continuación se muestra la interpolación realizada para las curvas de nivel como un mapa de contornos en 3D por medio del software Surfer®

En la imagen 10 se resalta el sistema de coordenadas y cotas correspondientes al área de interés, así como algunos puntos importantes del terreno. De la misma manera se muestra la diferencia de alturas en el terreno por medio de la escala de colores ubicada a la derecha de la imagen, en la cual los tonos azules representan las partes más altas con cotas de 144 m y los tonos verdes los cuales muestran las partes bajas del terreno con cotas aproximadas de 98 m. Se observa que la topografía del terreno es muy quebrada con dos pendientes muy marcadas, una en sentido Noroeste - Sureste y Noreste- Sur Oeste.

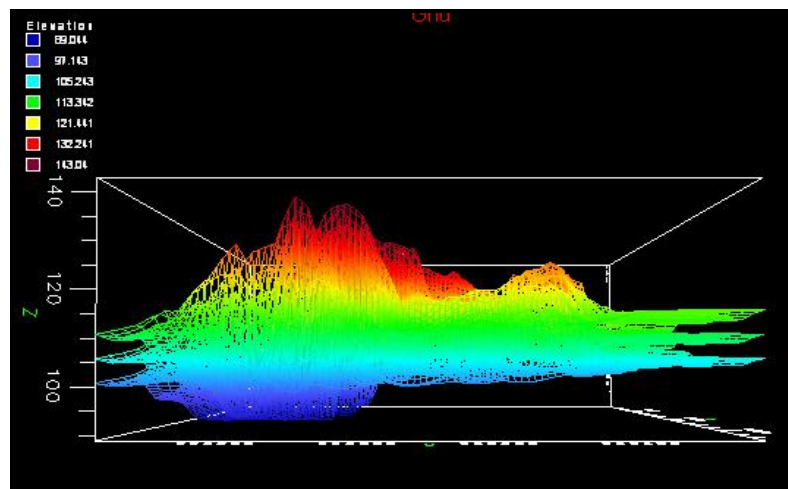
Imagen 10. Modelo digital del terreno en Sebastopol.



Fuente: Autor.

La topografía del área de estudio se incluyó dentro del software Modflow tanto para la superficie como para el subsuelo. La imagen 11 muestra de manera tridimensional la topografía de la capa superficial y de las capas subterráneas, teniendo en cuenta el espesor de cada una de ellas. Se logra observar la variación del terreno haciendo la relación con la escala de colores, en la cual los tonos rojos representan las partes altas y los tonos violetas las partes más bajas de la topografía interpolada.

Imagen 11. Topografía Estación Sebastopol en Visual Modflow.



Fuente: Autor

Con esta imagen es posible deducir entonces que no es una topografía en su totalidad tosca pero presenta algunas ondulaciones, las cuales se podrían relacionar con el comportamiento y desplazamiento de la pluma contaminante.

6.2. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Al iniciar el proceso de simulación se debe tener la información disponible confiable sobre una serie de factores, algunos de los cuales formarán parte de las bases de datos (conductividad hidráulica, porosidad, coeficiente de almacenamiento, etc.) y sus valores incidirán directamente en los resultados

finales, mientras que otros contribuirán a dar mayor claridad al modelo conceptual (topografía), pero que no provocan cambios mayores en las salidas de los modelos. En la fotografía 4 se aprecia la realización de las pruebas Slug para determinación de la conductividad hidráulica en Sebastopol.

Fotografía 4. Pruebas slug en campo.



Fuente: Autor – Pozos de monitoreo estación Sebastopol.

Los datos de conductividades de los pozos PM1 y PM3 registrados en la tabla 3 son históricos, ya que al realizar el monitoreo éstos no se encontraron en el lugar donde inicialmente estaban georeferenciados. En el **ANEXO 2** se muestran los cálculos y gráficas del método Hvorslev para estimar la conductividad hidráulica requerida.

En la tabla 3 es posible apreciar que los valores de conductividades hallados se encuentran en un rango aceptable propios para los tipos de material encontrados en cada uno de los pozos y según la literatura consultada. Teniendo en cuenta lo anterior y con la necesidad de definir los valores de conductividad iniciales, se establecieron los respectivos datos para éste parámetro así:

Tabla 3. Condiciones iniciales de conductividad hidráulica.

POZO No.	X	Y	Kx (m/d)	Ky (m/d)	Kz (m/d)
1	965220	1207320	0.971	0.971	0.097
2	965425	1207042	0.017	0.017	0.002
3	965140	1207320	0.981	0.981	0.098
4	965064	1206890	0.152	0.152	0.015
5	965268	1206615	0.007	0.007	0.001
6	965087	1207060	0.217	0.217	0.022

Fuente: Autor.

Donde **(X)** es la coordenada Este, **(Y)** la coordenada Norte, **(Kx)** y **(Ky)** son valores de la conductividad obtenidos de las pruebas slug cuyas unidades están dadas en m/día y **(Kz)** es la décima parte del valor de cada conductividad.

6.3. PARÁMETROS PARA SIMULAR EVENTUALES ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN.

La corrida del modelo se realizó en estado estacionario, saturado con densidad constante; ésta es una característica que trae el software preestablecida y se asumieron valores para las cabezas constantes (valores donde el área de estudio presenta aporte de agua continuamente) de 133.3 m y 111.7 m respectivamente. Estos valores corresponden a las cotas de la parte más alta de la estación, la cual representa un área de mayor recarga hídrica para la zona de interés y de un canal que se encuentra al costado este de la estación. En la tabla 4 se relacionan los datos de los pozos de monitoreo los cuales sirvieron como condiciones iniciales del modelo.

Tabla 4. Datos iniciales de pozos de monitoreo.

POZO No.	X	Y	PROFUNDIDAD POZO (m)	COTA TERRENO (m)	NIVEL ESTÁTICO (m)	CABEZA CONSTANTE (m)
PM2	965425	1207042	107.50	113.00	0.18	112.82
PM4	965064	1206890	112.50	123.00	3.99	119.00
PM5	965268	1206615	109.30	119.80	6.42	113.38
PM6	965087	1207060	112.50	122.50	1.94	120.56

Fuente: Autor

Donde **(X)** es la coordenada Este, **(Y)** la coordenada Norte, **(Cota Terreno)** es el valor determinado en campo con GPS, **(Nivel Estático)** es el valor registrado con la sonda en campo y **(Cabeza Constante)** es el valor de la cota del terreno menos el nivel estático registrado en campo.

En la tabla 5 se pueden observar los datos representativos que se tuvieron en cuenta para establecer las características de la parte del río Magdalena que pasa por el costado sur-oeste de la estación.

Tabla 5. Datos iniciales y finales del Río Magdalena – Puerto Berrío.

RIVER	INICIAL	FINAL
Tiempo de modelación (días)	1095	1095
Nivel del río (m)	110.1	109.1
Nivel inferior del río (m)	107	106.1
Grosor del cauce del río (m)	7	7
Ancho del cauce del río(m)	750	750
Conductancia del cauce del río (m/d)	1200	1200

Fuente: Autor

Los valores de porosidad (Ver tabla 6) para las dos capas asignadas al modelo; arena fina y arcilla respectivamente, fueron determinados de manera teórica (valores estimados de la porosidad según Sanders. 1998); los pozos de monitoreo fueron ubicados en diferentes capas debido a la diferencia de la porosidad por material presente en cada uno de ellos (arena y arcilla), la porosidad es una característica que influye directamente en el comportamiento del contaminante permitiendo que este se desplace a mayor o menor velocidad; la principal característica para determinar la ubicación de cada pozo es la cota en la que se encuentra el filtro en cada uno de ellos.

Tabla 6. Valores de porosidad modelo Sebastopol.

ARCILLA CAPA 1						
POZO No.	X	Y	Ss	Sy	Pe	P
PM2	965425	1207042	0.0011	0.11	0.11	0.42
PM3	965220	1207320	0.00075	0.19	0.19	0.35
PM6	965087	1207060	0.0011	0.11	0.11	0.42
ARENA CAPA 2						
POZO No.	X	Y	Ss	Sy	Pe	P
PM1	965220	1207320	0.00075	0.19	0.19	0.35
PM4	965064	1206890	0.0011	0.11	0.11	0.42
PM5	965268	1206615	0.0019	0.21	0.05	0.20

Fuente: Autor

Donde **(X)** es la coordenada Este, **(Y)** la coordenada Norte, **(Ss)** almacenamiento específico, **(Sy)** rendimiento específico, **(Pe)** Porosidad Efectiva y **(P)** Porosidad Total.

Una vez introducidos en el software los parámetros anteriormente mencionados y calibrado el modelo, se obtuvo el modelo de agua subterránea, el cual indica la dirección y la velocidad del flujo.

6.4. SIMULACION DE ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS LIVIANOS

A continuación se relacionan los resultados obtenidos de la modelación de flujo de agua subterránea y de la extensión de la pluma contaminantes en la estación Sebastopol.

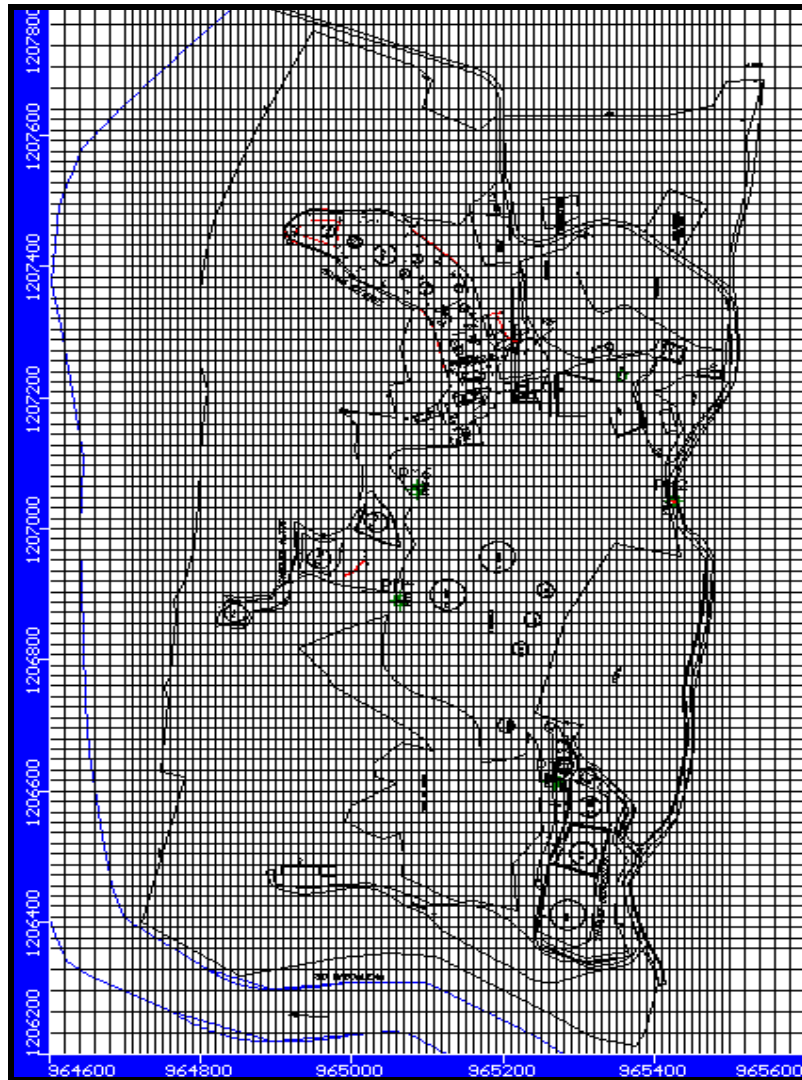
Inicialmente el modelo requirió información primaria necesaria para la creación del nuevo modelo donde se tuvieron en cuenta las siguientes características: simulación de flujo tipo saturado con densidad constante; modelo de flujo designado por Modflow, la elección negativa de simulación de transporte debido a que es un modelo en estado estacionario y en el cual no se considera la concentración del contaminante, y finalmente la elección de las unidades de los parámetros evaluados.

Se utilizó una grilla inicial de 20 filas x 20 columnas y se asignaron dos capas cada una de 5 m de profundidad; las cuales se establecieron de ésta manera, teniendo en cuenta el registro litográfico de la construcción de la red de pozos de monitoreo. (**VER ANEXO 3**)

6.4.1. Discretización del Modelo

La imagen 12 muestra el área de interés de la Estación Sebastopol con la malla escogida que fue refinada en filas por cuatro (4) y las columnas por cinco (5), buscando de ésta manera abarcar los puntos específicos tales como: pozos de monitoreo, partes topográficamente altas y cuerpos hídricos representativos. La malla finalmente queda compuesta por celdas; por cada una de las cuales el modelo ejecuta una serie de ecuaciones e iteraciones que determinan la calidad de la calibración. El resto del dominio del modelo queda con el mallado inicial.

Imagen 12. Mallado para simulación.

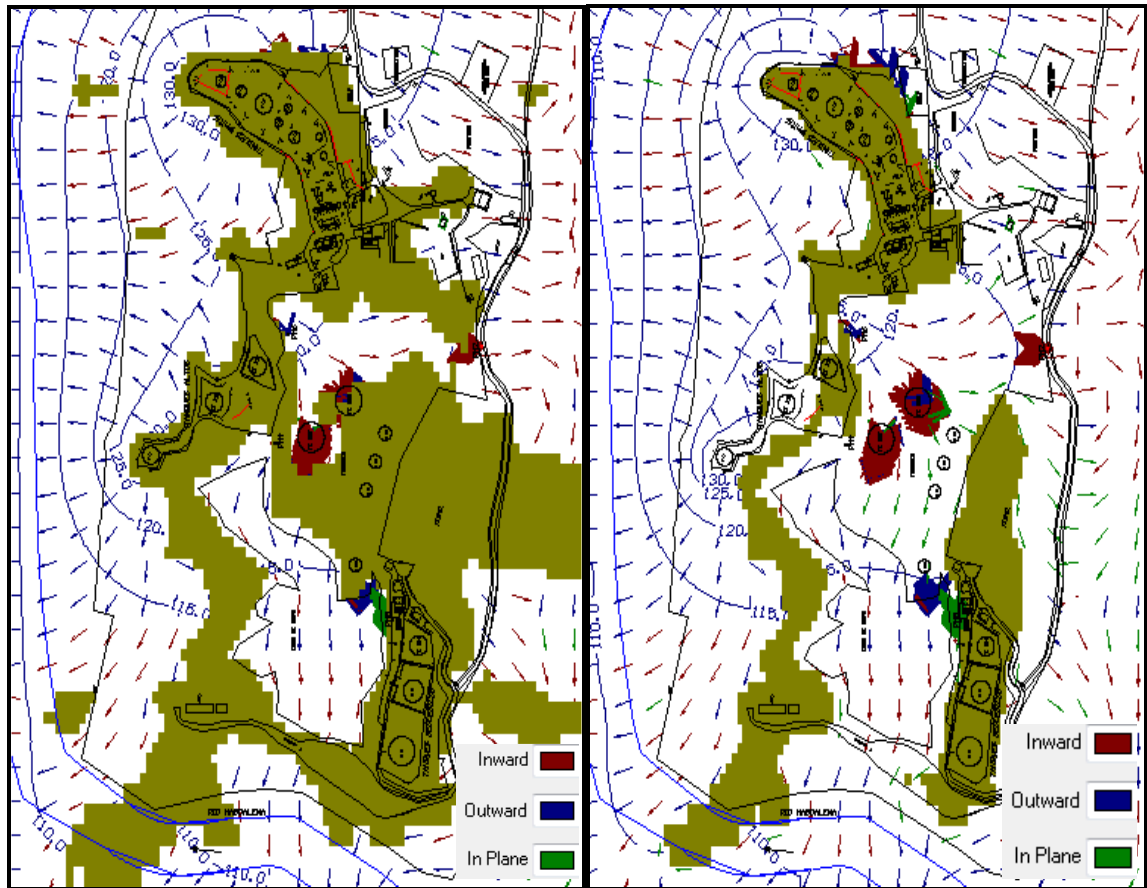


Fuente: Autor

6.4.2. Dirección Flujo Agua Subterránea Estación Sebastopol.

Definidas las condiciones de simulación, se pasó a la etapa de ejecución del modelo para lo cual se utilizó el programa de modelamiento Visual MODFLOW, el cual genera regímenes de flujo en estado estacionario y transicional, empleando el método numérico de las diferencias finitas. Finalmente el mapa de flujo de agua subterráneo obtenido se presenta a continuación en la imagen 13

Imagen 13. Modelo de dirección de flujo Sebastopol.



Fuente: Autor.

En la imagen anterior se observan las dos capas con las que cuenta el modelo, en las cuales se aprecian zonas de color verde que indican los lugares donde a través del tiempo de simulación el modelo generó áreas secas; que en el caso de la primera capa (izquierda) es mayor que en la segunda capa (derecha), suponiendo así que a mayor profundidad existe mejor régimen de flujo de agua subterránea. De acuerdo a los resultados obtenidos, el flujo de agua subterránea en Sebastopol presenta un comportamiento variable debido a la topografía del terreno; ya que cuenta con pendientes en la mayoría de las direcciones, la máxima velocidad de flujo obtenida en la simulación fue de 0.68 m/d.

Los colores que se encuentran sobre las trayectorias de las partículas y que se aprecian en la imagen, son los diversos niveles que logran dichas partículas en el subsuelo y descritos así: rojo: Inward (Interior), azul: Outward (Hacia el exterior), verde: In plane (en el plano). Las zonas rojas, azules y verdes claras que se alcanzan a percibir son las partículas asignadas al modelo, las cuales se describirán en el numeral **6.4.4** del presente documento.

En la representación gráfica del proceso de calibración, se puede apreciar la relación existente entre las cabezas observadas y las calculadas (Ver tabla 7). Nótese que, a pesar de no existir rangos establecidos que determinen si una calibración es buena, regular o mala, los valores calculados son similares a los observados, lo que permite calificarla como buena.

Tabla 7. Valores de datos observados y calculados Modelo Sebastopol.

POZO #	X	Y	OBS. (m)	CALC. (m)
PM2	965425	1207042	112.85	112.73
PM4	965064	1206890	119.00	116.25
PM5	965268	1206615	113.38	114.20
PM6	965087	1207060	120.56	121.46

Fuente: Autor.

Donde **(X)** es la coordenada Este, **(Y)** la coordenada Norte, **(OBS)** datos de campo y **(CALC)** los datos calculados por directamente por el software

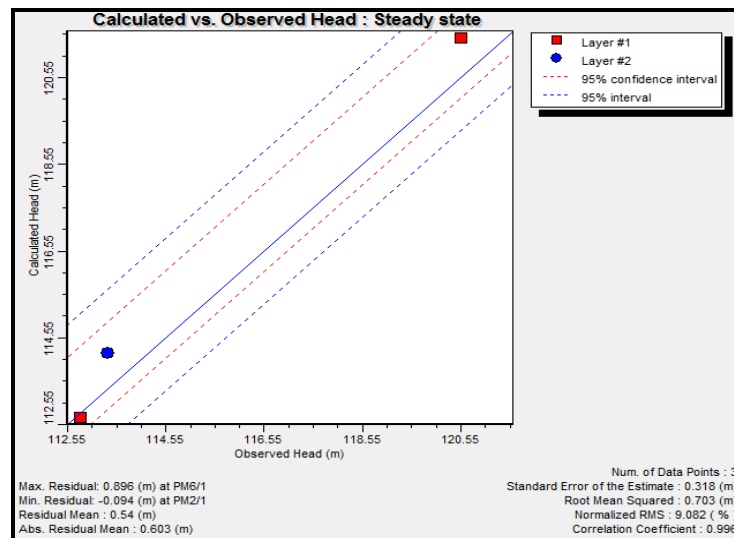
Sin embargo cabe resaltar el comportamiento inesperado del PM4, debido a que registró diferencias hidráulicas con respecto al PM6, que es el pozo de monitoreo más cercano a éste, pero que se hallaban separados por un relleno de material desconocido, lo cual pudo influir en los cálculos realizados. Es por esto que la primera calibración del modelo se realizó teniendo en cuenta los datos del PM4

(activo) y posteriormente se efectuó una segunda calibración omitiendo los valores del mismo (inactivo). El anterior procedimiento no se realiza regularmente de esta manera a menos que el modelo lo requiera para comparar los porcentajes de error generados; se podría afirmar entonces que sólo en este caso fue utilizado este tipo de calibración.

6.4.3. Calibración del Modelo

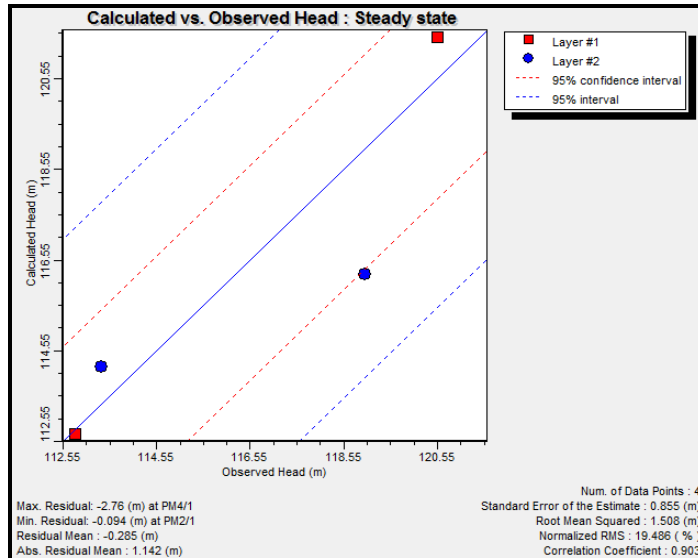
A continuación se muestran las imágenes 14 y 15 obtenidas durante la calibración del modelo de la Estación Sebastopol.

Imagen 14. Calibración modelo (PM4 inactivo)



Fuente: Autor

Imagen 15. Calibración modelo (PM4 activo)



Fuente: Autor.

El valor del promedio residual (Residual Mean) obtenido en la calibración es de 0.54 (m) con el PM4 inactivo y de -0.285 (m) con el PM4 activo. Los valores del promedio absoluto residual (Abs. Residual Mean) fueron de 0.603 (m) con el PM4 inactivo y de 1.142 (m) con el PM4 activo respectivamente. El porcentaje para el promedio de la raíz cuadrada (Normalized Root Mean Squared) fue de 19% con el PM4 activo y finalmente de un 9% con el PM4 inactivo. El error presente en esta calibración se encuentra en los datos de las cabezas observadas y calculadas del PM4, diferencias que hipotéticamente, podrían ser aceptadas puesto que el área de influencia a éste piezómetro no cuenta con una topografía homogénea, además del relleno ubicado a un costado puede estar interfiriendo en el comportamiento hidráulico del mismo. Sin embargo cabe mencionar que si se realiza un ajuste en los datos de campo, es posible lograr una mejor calibración del modelo.

Es importante destacar que para la extensión del dominio del modelo la cantidad de pozos construidos no es la adecuada, teniendo en cuenta que desaparecieron dos (2) de los seis (6) piezómetros iniciales que existían en la estación. No

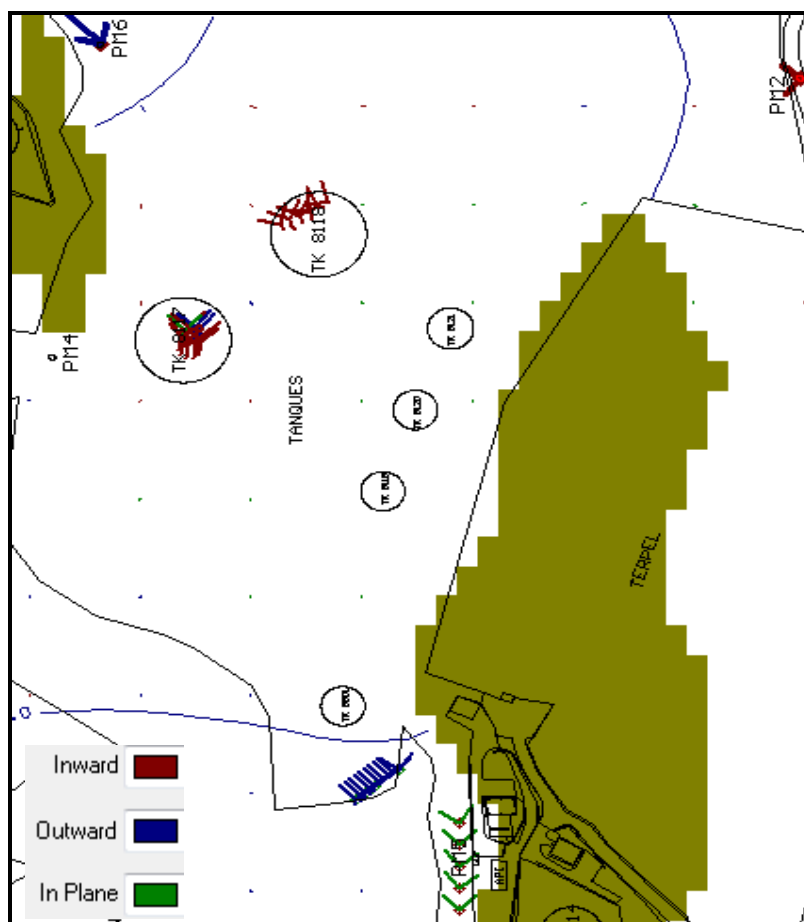
obstante la dirección del flujo al ser comparado con modelos anteriores realizados por la empresa, logró coincidir con las condiciones iniciales observadas en campo.

6.4.4. Aplicación de Modpath y Pathlines para evaluación de las trayectorias de partículas Forward y Backward.

Los resultados de proyección y trayectoria de las partículas Forward y Backward utilizando el programa de apoyo MODPATH para 1 año (365 días) se muestra a continuación en la imagen 17.

Las partículas fueron ubicadas en el TK 8117 y TK 8118, en el PM6, PM5 (tanques geodésicos), PM2 y el TK 8501 (entrada geodésicos) específicamente; ya que son lugares propensos a sufrir algún tipo de fuga o escape de producto.

Imagen 16. Proyección y trayectoria partículas 1 año (365 días)

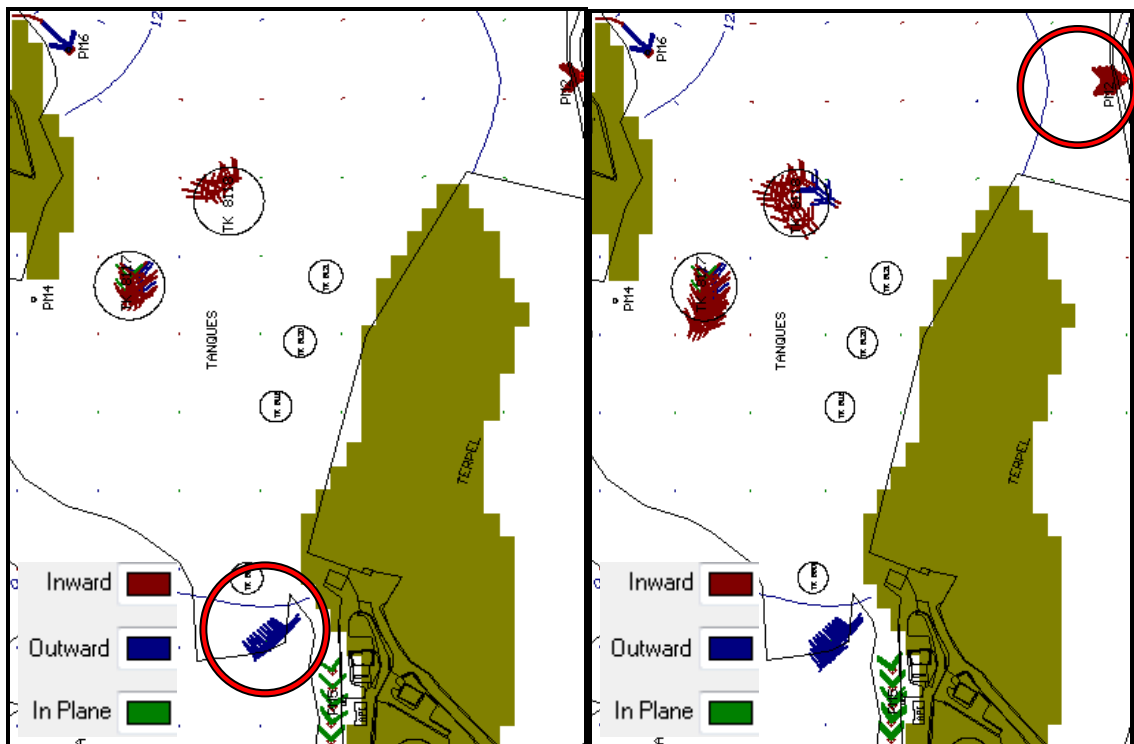


Fuente: Autor.

La extensión de la pluma contaminante como se puede apreciar anteriormente; representada por las líneas cortas de colores azul, rojo y verde claro, no es representativa a 365 días de simulación; tiempo relativamente corto, sin embargo cabe mencionar que el movimiento de pluma contaminante mantiene la misma dirección del flujo de agua subterránea y sigue el dominio de la topografía del área en estudio. A pesar de esto, la extensión de las partículas no logra alcanzar ningún cuerpo hídrico representativo ni afectar la zona de bajos. En esta misma imagen se ve una mancha verde la cual representa las áreas que se encuentran secas en el modelo de la Estación.

La imagen 17 es un acercamiento al área donde se ubicaron las partículas y en ella se presentan las trayectorias de partículas asignadas para tiempos de 2 años (730 días) y 5 años (1825 días) respectivamente, en donde es posible ver que la afectación a cuerpos hídricos y zonas de bajos (señalados en los círculos rojos) continua siendo mínima.

Imagen 17. Proyección y trayectoria partículas forward para 2 años (izquierda) y 5 años (derecha)

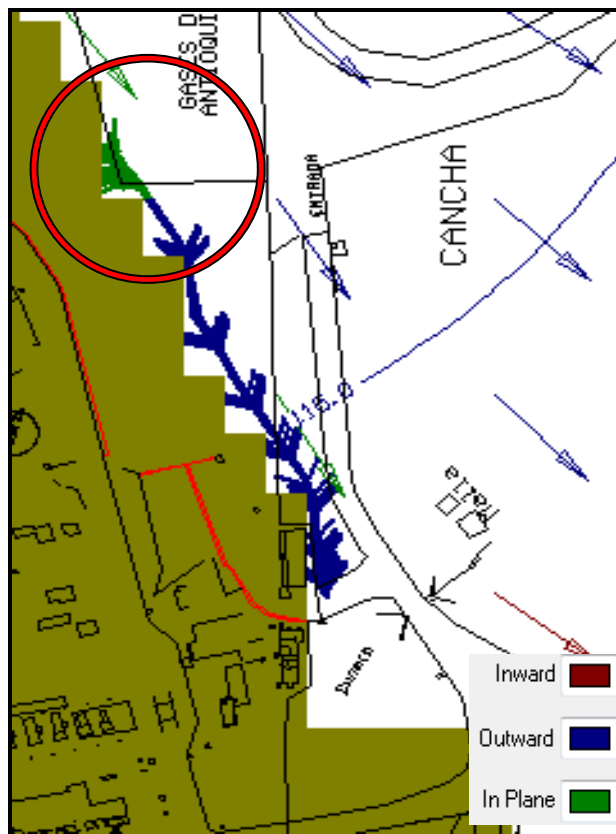


Fuente: Autor.

Sin embargo, en la imagen 18 se muestran las partículas ubicadas en el TK 505 cerca de la empresa Gases de Antioquia y se hace evidente como la presencia del producto liberado en el transcurso de 1 a 2 años logra afectar la zona, generando un panorama de contaminación en la Estación Sebastopol como anteriormente se había presentado en el año 2009. Esto ocurrió cuando producto proveniente del TK 505 logró, a través de una fuga, desplazarse por el subsuelo drenando y

llegando a las instalaciones de dicha empresa y cuyo impacto aún se logra evidenciar. Por información verbal obtenida en campo, en época de lluvias se facilita el drenaje de dicho contaminante, y por el estado del agua que llega a la piscina de la empresa Gases de Antioquia es visible una película aceitosa y olor característico de hidrocarburo.

Imagen 18. Proyección pluma contaminante en Gases de Antioquia.

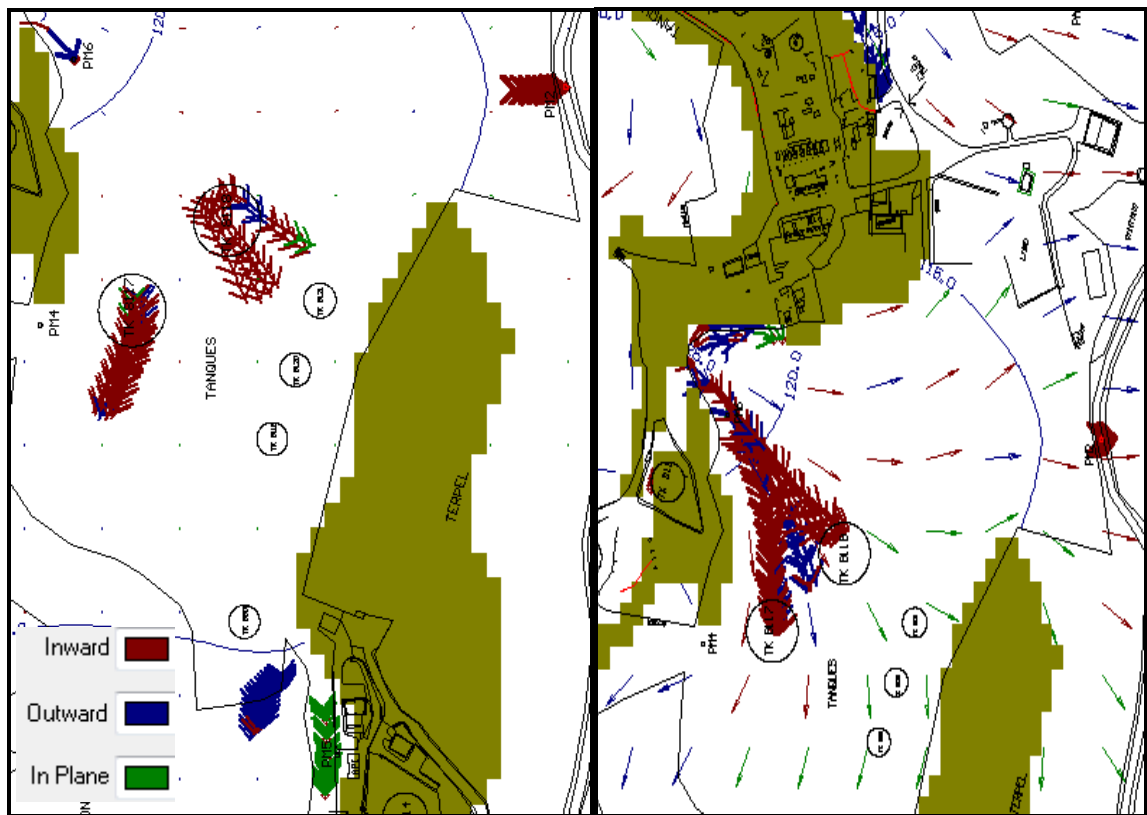


Fuente: Autor

Finalmente en la imagen 19 se aprecia la proyección y trayectoria de las partículas asignadas a 10 años de simulación, así mismo se observa como dichas partículas mantienen a través del tiempo la misma dirección con el flujo de agua subterránea. En algunas zonas donde el terreno se encuentra seco, es posible que el desplazamiento del contaminante se vea afectado ya que no dispondrá de la misma velocidad de infiltración en el subsuelo y dependerá exclusivamente de las

propiedades del terreno y del mismo contaminante. Los colores que se encuentran sobre las trayectorias de las partículas y que se aprecian en la imagen, son los diversos niveles que logran dichas partículas en el subsuelo y descritos así: rojo: Inward (Interior), azul: Outward (Hacia el exterior), verde: In plane (en el plano); así mismo la zona de color verde indica el lugar donde a través del tiempo de simulación el modelo generó área con poca cantidad de flujo del recurso subterráneo. En el campo actualmente (finales 2011) ningún piezómetro registró presencia de hidrocarburo.

Imagen 19. Proyección y trayectoria partículas 10 años (3650 días)



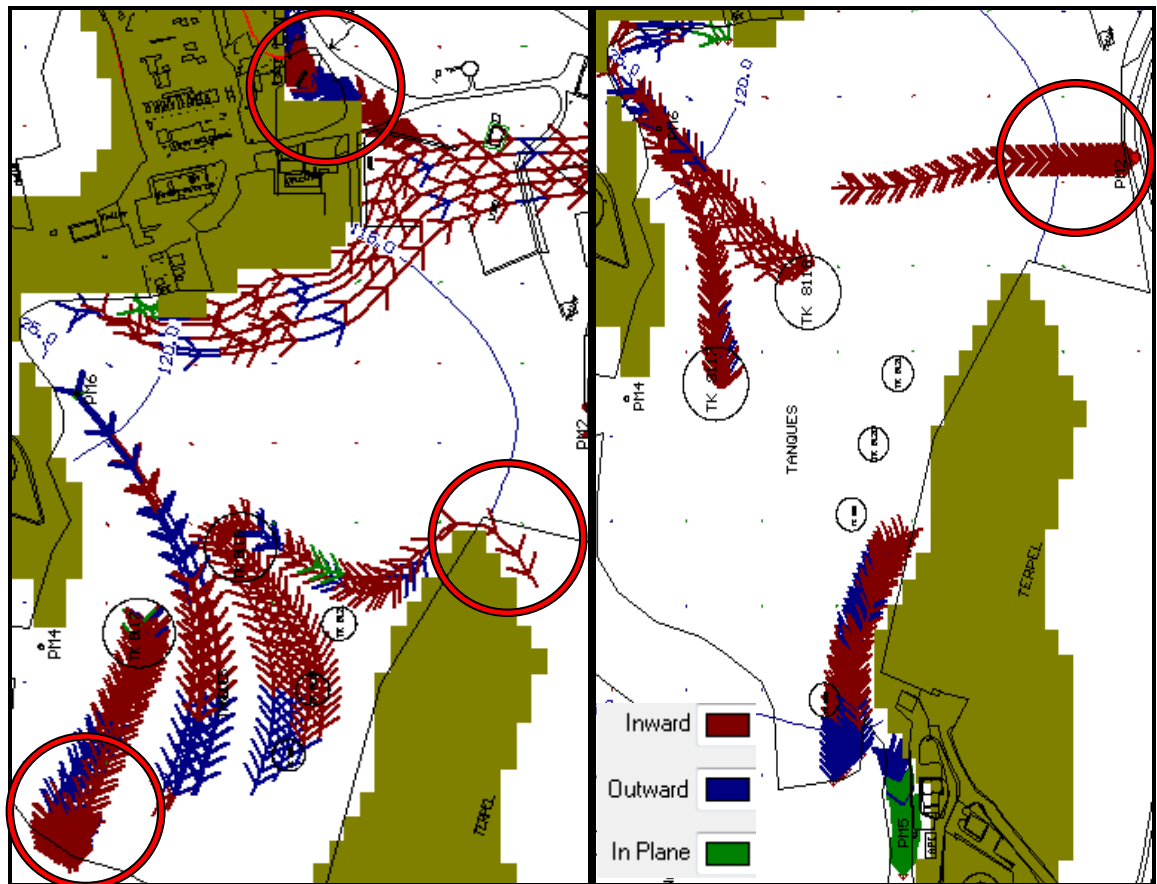
Fuente: Autor.

Los dos planos anteriores son zonas de proyección tanto para partículas forward (izquierda) como de partículas backward (derecha) para la misma área de influencia de los tanques TK 8117 y TK 8118.

En un escenario más complejo y asignando un tiempo estimado de 20 a 25 años, es posible que la trayectoria y proyección de las partículas forward asignadas indique un evento contaminante de importancia, como se aprecia en la parte izquierda de la imagen 20, la afectación podría alcanzar el cuerpo hídrico ubicado al costado Este de la estación, afectar un área de la empresa Terpel, así como una parte de la zona de bajos (ver círculos rojos).

En la parte derecha de la imagen se logra ver el comportamiento Backward de las partículas y debido a esto es posible predecir que si se llegase a presentar un evento de contaminación en los tanques 8117 ó 8118 en un escenario de simulación de aproximadamente 25 años, el PM2 lograría verse afectado y mostrar trazas del producto accidentalmente liberado. A su vez la zona de entrada a los tanques geodésicos también lograría verse afectada si los tanques 8119, 8120 y 8121 sufrieran algún tipo de daño estructural. Esta serie de predicciones podrían significar la necesidad de implementar a largo plazo un sistema de monitoreo, control y/o remediación en la zona afectada.

Imagen 20. Proyección partículas Forward (izquierda) y partículas Backward (derecha) aprox. 20 años.



Fuente: Autor.

6.5. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES LOCATIVAS, TOPOGRÁFICAS, DE PRECIPITACIONES Y CALIDAD DE AGUA EN LA PLANTA VASCONIA.

A continuación en la fotografía 5 se muestra una vista lateral de algunos tanques de la planta Vasconia – Puerto Boyacá.

Fotografía 5. Panorámica Estación Vasconia.



Fuente: ICP

En la visita a campo realizada a la Estación Vasconia se recopiló información de los tanques ubicados dentro de la planta; el tipo de producto almacenado, capacidad, dimensiones y a su vez se realizó un inventario del estado físico de las estructuras con las que cuenta el área de estudio y de los piezómetros en el cual se evidenció que el PM3 fue removido del lugar inicial, pero se construyeron dos nuevos pozos nombrados en este proyecto como PM8 y PM9, el PM4 se encontraba seco en su totalidad, el PM5 tenía el filtro dañado, por lo cual no se pudo realizar prueba slug. Debido a esta serie de antecedentes no fueron tenidos en cuenta para la simulación en Modflow.

Los registros de precipitaciones comprados al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) para esta planta se encuentran en el **ANEXO 4**. La estación meteorológica escogida fue Puerto Niño [N° 23110030], la cual aún se encuentra en servicio y permitió recopilar datos de precipitaciones en el periodo comprendido entre Diciembre de 2009 a Diciembre del 2010

A continuación se interpretan los resultados obtenidos de los parámetros de interés para el desarrollo de este proyecto (**VER ANEXO 5**).

6.5.1. Ensayos físico-químicos de aguas subterráneas en Vasconia.

La serie de ensayos que se muestran fueron realizados en el laboratorio del Instituto Colombiano de Petróleo (ICP), acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

A continuación en la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos para los parámetros de interés analizados dentro del proyecto y su respectiva interpretación.

Tabla 8. Caracterización físico-química de aguas subterráneas Vasconia.

AGUAS SUBTERRÁNEAS PLANTAS VASCONIA I Y II	UNIDADES	PM-1 UBICADO FRENTE A LA SALIDA DEL SEPARADOR API VASCONIA I	PM-2 UBICADO FRENTE AL TANQUE TK-603	PM-3 UBICADO FRENTE AL TANQUE TC-701	PM-4 UBICADO FRENTE AL TANQUE TK-703	PM-5 UBICADO FRENTE A LA ENTRADA DEL SEPARADOR API VASCONIA II	PM 7 UBICADO DETRAS DE LAS OFICINAS DE TÉCNICOS	DECRETO 1594/84 ART. 38
ANÁLISIS IN SITU								
PROFUNDIDAD	m	3,41	3,35	1,49	4,17	3,71	2,04	NR
OXIGENO DISUELTO	mg O2/L	2,5	2,1	0,0	1,6	0,6	1,3	NR
PH	Uni. pH	6.90	6.79	6.63	7.03	6.44	6.57	5.0-9.0
TEMPERATURA AGUA	°C	30,9	26,8	32,7	33,4	32,2	32,6	NR
ANÁLISIS DE LABORATORIO								
FENOLES	mg/L	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0,002
GRASAS Y ACEITES	mg/L	1,18	1,27	<1.07	<1.07	<1.07	<1.07	No se acepta película visible
ANÁLISIS DE BTEX								
BENCENO	µg/L	<2.76	<2.76	<2.76	<2.76	<2.76	<2.76	NR
TOLUENO	µg/L	<2.23	<2.23	<2.23	<2.23	<2.23	<2.23	NR

Tabla 8. Caracterización físico-química de aguas subterráneas Vasconia.

AGUAS SUBTERRÁNEAS PLANTAS VASCONIA I Y II	UNIDADES	PM-1 UBICADO FRENTE A LA SALIDA DEL SEPARADOR API VASCONIA I	PM-2 UBICADO FRENTE AL TANQUE TK-603	PM-3 UBICADO FRENTE AL TANQUE TC-701	PM-4 UBICADO FRENTE AL TANQUE TK-703	PM-5 UBICADO FRENTE A LA ENTRADA DEL SEPARADOR API VASCONIA II	PM 7 UBICADO DETRAS DE LAS OFICINAS DE TÉCNICOS	DECRETO 1594/84 ART. 38
ETILBENCENO	µg/L	<1.82	<1.82	<1.82	<1.82	<1.82	<1.82	NR
m+p-XILENO	µg/L	<1.85	<1.85	<1.85	<1.85	<1.85	<1.85	NR
o-XILENO	µg/L	<2.30	<2.30	<2.30	<2.30	<2.30	<2.30	NR

6.5.1.1. Determinación de pH. Los valores de pH reportados en las aguas subterráneas se encontraron entre 6.44 y 7.03 unidades de pH, los cuales se hallan dentro del rango estipulado por el artículo 38 del decreto referenciado.

6.5.1.2. Oxígeno Disuelto. El oxígeno disuelto registrado en los piezómetros valorados varió entre 0.0 y 2.5 mgO₂/L, concentraciones consideradas normales para aguas subterráneas, cuyo nivel freático se encuentra a una profundidad que limita el contacto con el aire atmosférico.

6.5.1.3. Fenoles. En los piezómetros monitoreados de la estación Vasconia se evidenció que las aguas presentes en ellos no se encontraron afectadas por los contaminantes relacionados al petróleo, reportando de esta manera la mínima concentración cuantificable del método empleado en el laboratorio (<0.10 mg/L).

6.5.1.4. Grasas y Aceites. Con respecto a grasas y aceites, el PM2 presentó una concentración de 1.27 mg/L, el PM1 de 1.18 mg /L y en los pozos restantes una concentración <1.07 mg/L. El análisis de hidrocarburos no polares en los puntos monitoreados registraron contenidos del orden de la mínima concentración cuantificable <1.07 mg/L, resultados que infirieron en la no afectación de la calidad de esta aguas subterráneas dado que no generan matices ni películas visibles de material graso.

6.5.1.5. Compuestos BTEXs. En los resultados obtenidos de las aguas subterráneas presentes en los pozos monitoreados, la concentración BTEXs es inferior a la mínima cuantificable del método empleado en el laboratorio para su determinación; valores que además son inferiores a los máximos permisibles por la norma canadiense (Alberta Risk. 2001). Esto significa que no hay indicios de contaminación del agua subterránea en la Estación Vasconia a causa de este tipo de compuestos.

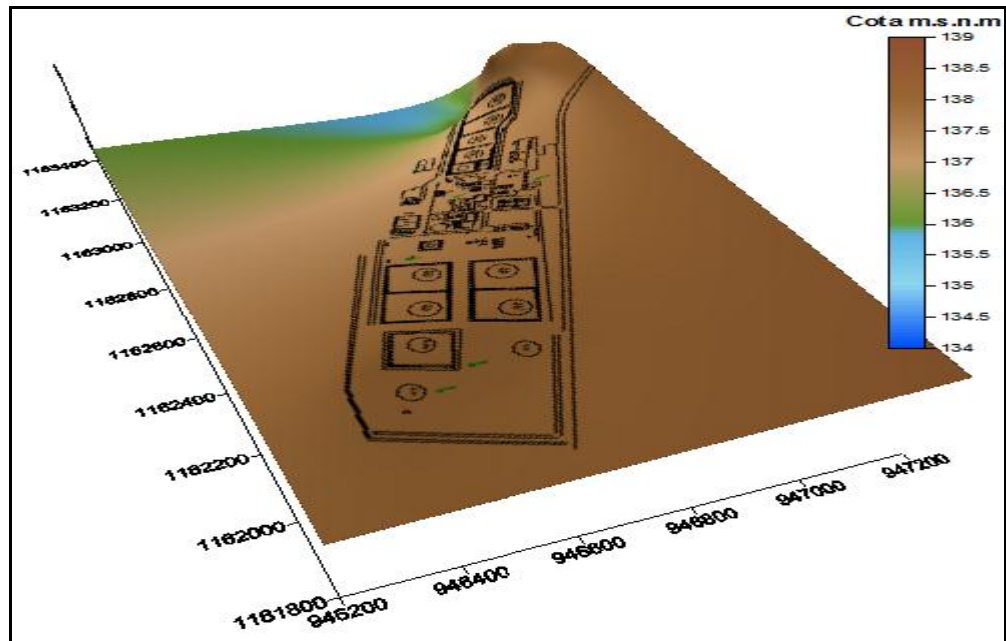
6.5.2 Interpolación de curvas de nivel en el programa Surfer®

El conocimiento de las elevaciones del terreno contribuyó a una mejor conceptualización del modelo hidrogeológico pues permitió el manejo de magnitudes reales y a escala en el proceso de definición de la geometría del área de estudio. A continuación se muestra la interpolación realizada para las curvas de nivel como un mapa de contornos en 3D por medio del software Surfer®.

La grilla se estableció con coordenadas mínimas de 946200 E – 1161800 N y máximas de 947200 E – 1163400 N, determinadas previamente en AutoCad, las cuales representan un mapa de contornos utilizando el método de interpolación Kriging de Surfer® debido a su aproximación a las condiciones del entorno visualizado en las visitas de campo.

En la imagen 21 se resalta el sistema de coordenadas y cotas correspondientes al área de interés, así como algunos puntos importantes del terreno. De la misma manera se muestra la diferencia de alturas en el terreno por medio de la escala de colores ubicada a la derecha de la imagen, en la cual los tonos azules representan las partes más altas con cotas de 149.81 m y los tonos verdes los cuales muestran las partes bajas del terreno con cotas aproximadas de 136 m. Se observa que la topografía del terreno es muy plana con una pendiente muy marcada, en sentido nor-oeste.

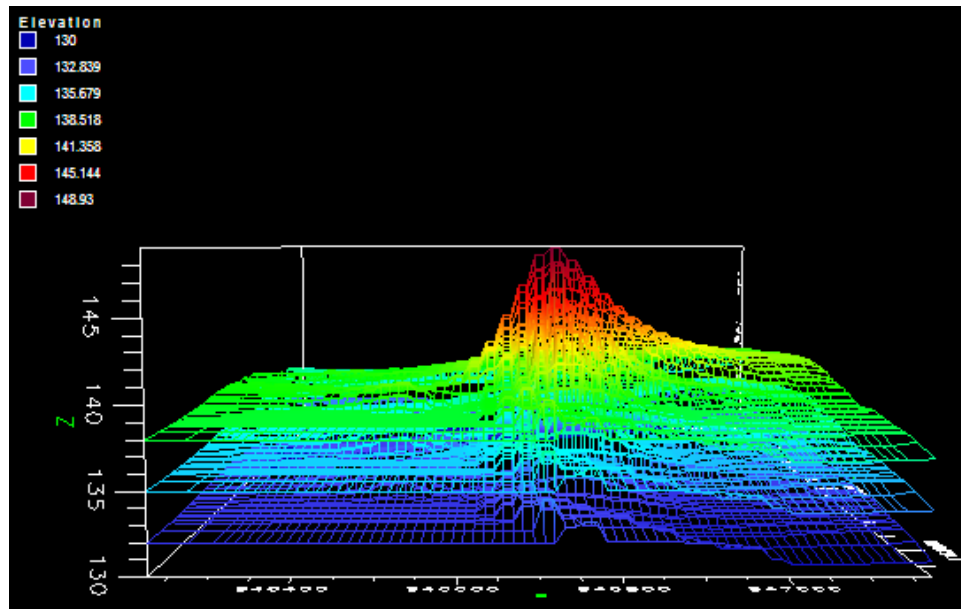
Imagen 21. Modelo digital del terreno en Vasconia.



Fuente: Autor.

La topografía del área de estudio se incluyó dentro del software tanto para la superficie como para el subsuelo. La imagen 22 muestra de manera tridimensional la topografía de la capa superficial y de las capas subterráneas, teniendo en cuenta el espesor de cada una de ellas. Se logra observar la variación del terreno haciendo la relación con la escala de colores, en la cual los tonos rojos representan las partes altas y los tonos violetas las partes más bajas de la topografía interpolada.

Imagen 22. Topografía Estación Vasconia en Visual Modflow.



Fuente: Autor

6.6. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Al iniciar el proceso de simulación se debe tener la información disponible confiable sobre una serie de factores, algunos de los cuales formarán parte de las bases de datos (conductividad hidráulica, porosidad, coeficiente de almacenamiento, etc.) y sus valores incidirán directamente en los resultados finales, mientras que otros contribuirán a dar mayor claridad al modelo conceptual (topografía), pero que no provocan cambios mayores en las salidas de los modelos.

A continuación en la fotografía 6 se muestran las pruebas slug realizadas en campo durante la visita en la estación Vasconia.

Fotografía 6. Pruebas slug en campo.



Fuente: Autor.

El valor de las conductividades se determinó mediante el método Hvorslev mencionado anteriormente en la metodología del proyecto. En el **ANEXO 6** se muestran los cálculos y gráficas del método Hvorslev para estimar la conductividad hidráulica requerida.

En la tabla 9 es posible apreciar que los valores de conductividades hallados se encuentran en un rango aceptable propios para los tipos de material encontrados en cada uno de los pozos y según la literatura consultada.

Tabla 9. Condiciones iniciales de conductividad hidráulica.

POZO No.	X	Y	KX(m/d)	KY(m/d)	KZ(m/d)
PM1	946758	1162904	0.0104	0.0104	0.0010
PM2	946881	1163043	0.493	0.4930	0.0493
PM7	946761	1162714	0.0133	0.0133	0.0013
PM8	946549	1162129	0.398	0.3980	0.0398
PM9	946478	1162081	0.0056	0.0056	0.00056

Fuente: Autor.

Donde **(X)** es la coordenada Este, **(Y)** la coordenada Norte, **(Kx)** y **(Ky)** son valores de la conductividad obtenidos de las pruebas slug cuyas unidades están dadas en m/día y **(Kz)** es la décima parte del valor de cada conductividad.

6.7. PARÁMETROS PARA SIMULAR EVENTUALES ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN.

La corrida del modelo se realizó en estado estacionario, saturado con densidad constante y se asumieron valores para las cabezas constantes de 137.08 m y 135.5 m respectivamente. Estos valores corresponden a las cotas de los dos cuerpos hídricos que se encuentran al costado nor-oeste y nor-este de la estación respectivamente. En la tabla 10 se registran los datos iniciales hallados en campo de los pozos de monitoreo de la estación Vasconia.

Tabla 10. Datos iniciales de pozos de monitoreo.

POZO No.	X	Y	PROFUNDIDAD	COTA TERRENO	NIVEL ESTÁTICO	CABEZA CONSTANTE
PM1	946758	1162904	131.80	138.30	1.58	136.72
PM2	946881	1163043	130.30	136.80	4.40	132.40
PM7	946761	1162714	133.90	140.40	3.15	137.25
PM8	946549	1162129	132.20	138.20	6.22	131.98
PM9	946478	1162081	132.00	138.00	6.96	131.04

Fuente: Autor

Donde **(X)** es la coordenada Este, **(Y)** la coordenada Norte, **(Cota Terreno)** es el valor determinado en campo con GPS, **(Nivel Estático)** es el valor registrado con la sonda en campo y **(Cabeza Constante)** es el valor de la cota del terreno menos el nivel estático registrado en campo.

El cuerpo hídrico más representativo es la parte del río Magdalena que pasa por el costado nor-oeste de la estación, y por el costado nor-este, una parte del Caño Palagua el cual fue considerado como una cabeza constante al igual que el río Magdalena.

Tabla 11. Datos iniciales y finales del Río Magdalena – Puerto Boyacá.

RIVER	INICIAL	FINAL
Tiempo de modelación (días)	1095	1095
Nivel del río (m)	135.5	135
Nivel inferior del río (m)	137	136
Grosor del cauce del río (m)	7	7
Ancho del cauce del río (m)	750	750
Conductancia del cauce del río (m/d)	1200	1200

Fuente: Autor

La porosidad para las dos capas asignadas al modelo; arena fina y arcilla respectivamente, fue determinada de manera teórica; primero conociendo el tipo de material presente en el subsuelo gracias a los registros litográficos de los piezómetros y después comparándolo con la literatura consultada. Los pozos de monitoreo fueron ubicados en diferentes capas debido a la diferencia de la porosidad por material presente (arena y arcilla), la principal característica para determinar la ubicación de cada pozo es la cota en la que se encuentra el filtro en cada uno de ellos.

Tabla 12. Valores de porosidad modelo Vasconia.

ARCILLA CAPA 1						
POZO No.	X	Y	Ss	Sy	Pe	P
PM1	946758	1162904	0.0001	0.02	0.025	0.4
PM2	946881	1163043	0.00009	0.0200	0.0250	0.4000
PM7	946761	1162714	0.00012	0.018	0.0024	0.41
PM8	946549	1162129	0.0001	0.02	0.025	0.4
PM9	946478	1162081	0.00009	0.0200	0.0250	0.4000
ARENA FINA CAPA 2						
POZO No.	X	Y	Ss	Sy	Pe	P
PM1	946758	1162904	0.0001	0.025	0.025	0.4
PM2	946881	1163043	0.00009	0.028	0.025	0.45
PM7	946761	1162714	0.00011	0.028	0.0024	0.41
PM8	946549	1162129	0.00012	0.02	0.025	0.4
PM9	946478	1162081	0.00009	0.03	0.030	0.46

Fuente: Autor.

Donde **(X)** es la coordenada Este, **(Y)** la coordenada Norte, **(Ss)** el almacenamiento específico, **(Sy)** rendimiento específico, **(Pe)** Porosidad Efectiva y **(P)** Porosidad Total.

Esta serie de datos varían uno de otro dependiendo del registro litográfico que presenta cada piezómetro, de ahí que cada material presente diferencias en cuanto a la influencia que tienen en la movilidad del contaminante en el subsuelo, acelerando o disminuyendo la contaminación del recurso hídrico, el cual es importante en este proyecto.

Una vez introducidos al software los parámetros anteriormente mencionados y calibrado el modelo, se obtuvo el modelo de agua subterránea, el cual indica la dirección y la velocidad del flujo.

6.8. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS LIVIANOS

A continuación se relacionan los resultados obtenidos de la modelación de flujo de agua subterránea y de la extensión de la pluma contaminantes en la Estación Vasconia – Puerto Boyacá.

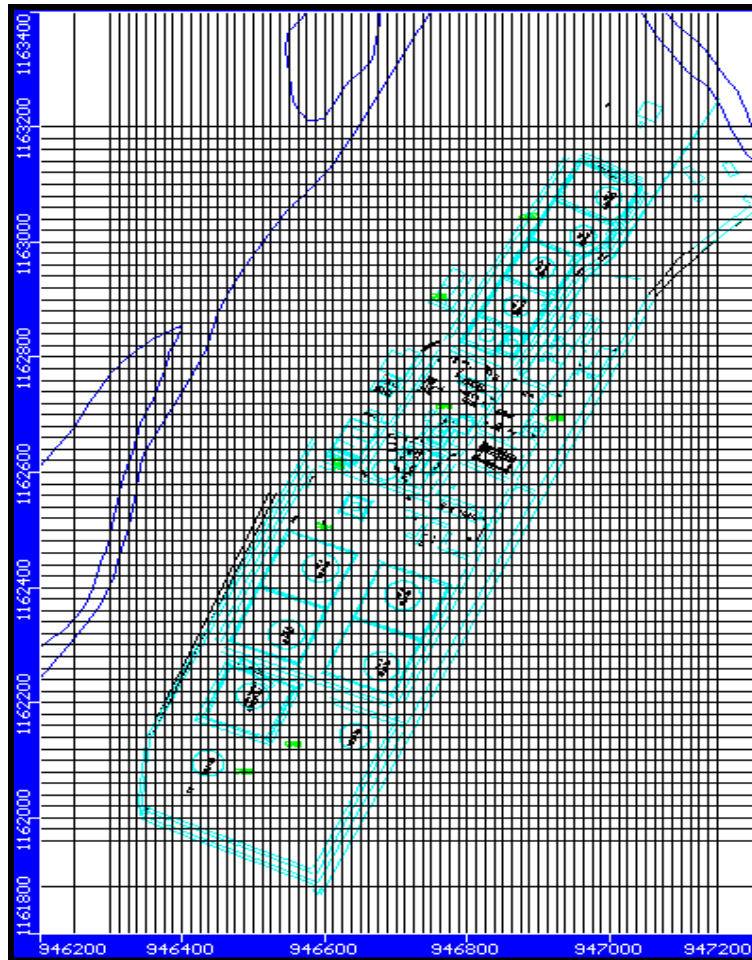
Inicialmente el modelo requirió información primaria necesaria para la creación del nuevo modelo donde se tuvieron en cuenta las siguientes características: simulación de flujo tipo saturado con densidad constante; modelo de flujo designado por Modflow, la elección negativa de simulación de transporte debido a que es un modelo en estado estacionario y en el cual no se considera la concentración del contaminante, y finalmente la elección de las unidades de los parámetros evaluados.

Se utilizó una grilla inicial de 20 filas y 20 columnas y se asignaron dos capas cada una de 3 m de profundidad; las cuales se establecieron de ésta manera, teniendo en cuenta el registro litográfico de la construcción de la red de pozos de monitoreo. **(VER ANEXO 7)**

6.8.1. Discretización del Modelo

La imagen 23 muestra el área de interés de la Estación Vasconia con la malla escogida que fue refinada en filas por cuatro (4) y las columnas por cinco (5), buscando de ésta manera abarcar los puntos específicos tales como: pozos de monitoreo, partes topográficamente altas y cuerpos hídricos representativos. La malla finalmente quedó compuesta por celdas; por cada una de las cuales el modelo ejecutó una serie de ecuaciones e iteraciones que determinaron la calidad de la calibración. El resto del dominio del modelo quedó con el mallado inicial.

Imagen 23. Mallado para simulación.

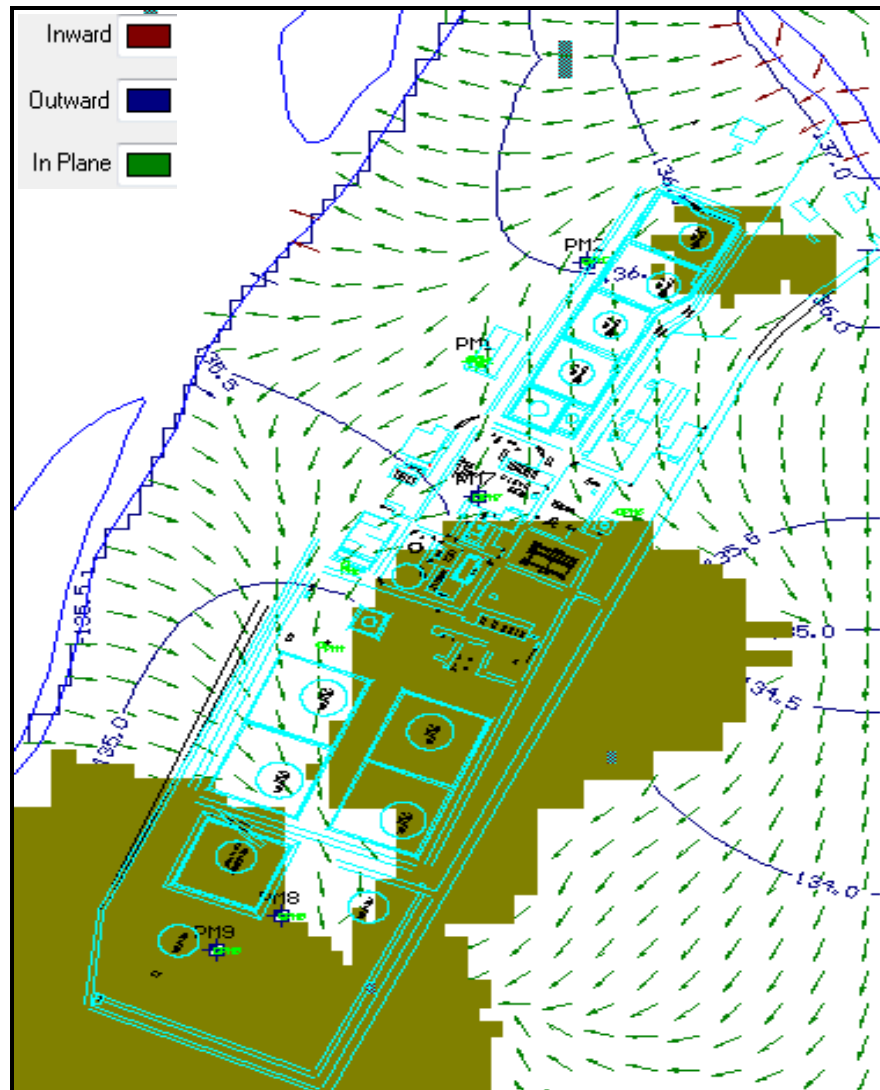


Fuente: Autor.

6.8.2. Dirección flujo agua subterránea estación Vasconia

Definidas las condiciones de simulación, se pasó a la etapa de ejecución del modelo para lo cual se utilizó el programa de modelamiento Visual Modflow, el cual modela regímenes de flujo en estado estacionario y transicional, empleando el método numérico de las diferencias finitas. Finalmente el mapa de flujo de agua subterránea obtenido se presenta a continuación en la imagen 24.

Imagen 24. Modelo de dirección de flujo Vasconia.



Fuente: Autor.

En la imagen aparece solamente la segunda capa del modelo, ya que la primera capa para esta modelación se obtuvo seca en gran parte del área de interés, por esto la mancha de color verde que se aprecia anteriormente. De acuerdo como se observa, la dirección preferencial de flujo subsuperficial es en sentido sur – noroeste obedeciendo a la única pendiente que topográficamente presenta el terreno. De ahí que el flujo de agua subterránea pueda desplazarse en este sentido. No obstante, es posible ver una zona completamente seca en el resultado de la modelación. La máxima velocidad de flujo obtenida para la simulación fue de

0.42 m/día. Los colores que se encuentran sobre las trayectorias de dirección del flujo y que se aprecian en la imagen, son los diversos niveles que logra en agua en el subsuelo y descritos así: rojo: Inward (Interior), azul: Outward (Hacia el exterior), verde: In plane (en el plano).

En el proceso de calibración se logra apreciar la relación entre las cabezas observadas y las calculadas (Tabla 13). A pesar de no existir rangos establecidos que reporten la calidad de una calibración, los valores observados no difieren mucho de los calculados por el software, lo que podría ser un buen indicio para evaluar la calibración. Sin embargo es importante verificar el porcentaje de error evaluado por el software y de ésta manera tener un concepto más acertado de este proceso.

Tabla 13. Valores de datos observados y calculados Modelo Vasconia

POZO #	X	Y	OBS. (m)	CALC. (m)
PM1	946758	1162904	136.72	135.82
PM2	946881	1163043	132.40	136.03
PM7	946761	1162714	136.86	135.65

Fuente: Autor

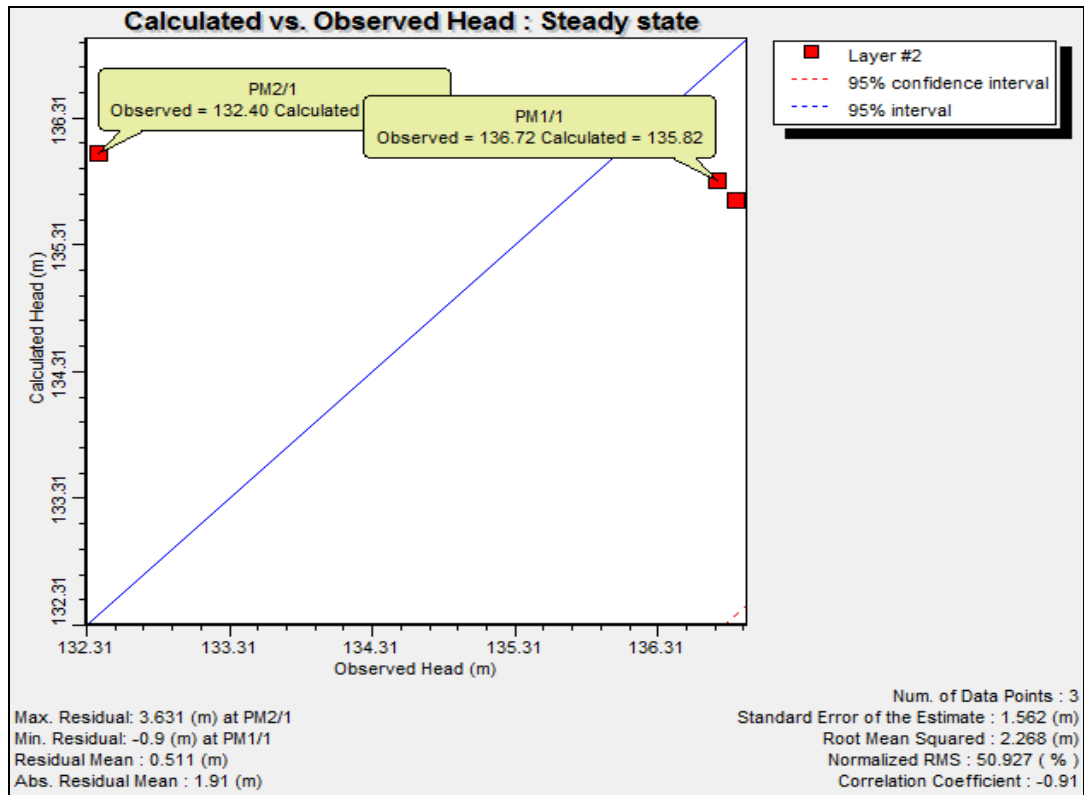
Donde **(X)** es la coordenada Este, **(Y)** la coordenada Norte, **(OBS)** datos de campo y **(CALC)** los datos calculados por directamente por el software.

Los pozos PM8 y PM9 no registraron datos en la calibración debido a que aparecen secos en las dos capas asignadas para el modelo, por lo tanto el flujo de agua no es representativo para estos puntos. Esta serie de acontecimientos hacen que la calibración no sea 100% confiable y supone la necesidad de realizar un ajuste en los datos tomados en campo y/o analizar si existe la posibilidad de una nueva y mejorada calibración.

6.8.3. Calibración del modelo

A continuación en la imagen 25 se presenta la imagen de los resultados obtenidos en la calibración del modelo para la Estación Vasconia.

Imagen 25. Calibración Modelo Vasconia.



El valor de promedio residual (Residual Mean) obtenido en la calibración es de 0.511 (m), el valor del promedio absoluto residual (Abs. Residual Mean) fue de 1.9 (m). El porcentaje para el promedio de la raíz cuadrada (Normalized Root Mean Squared) fue del 50% y en vista de éste valor, es posible indicar que el error presente en esta calibración se encuentra en los datos de las cabezas observadas y calculadas para los PM8 y PM9, diferencias que hipotéticamente podrían ser aceptadas puesto que éstos pozos fueron recientemente construidos y el control de ellos no es el más adecuado.

Las líneas punteadas de tendencias no se logran apreciar claramente en la gráfica, aunque la regresión si fue realizada por el modelo; evidencia de esto son los valores registrados. Es probable que esto suceda debido a que los datos resultaron tan dispersos de los límites de confiabilidad, que estas líneas quedaron por fuera del área del gráfico.

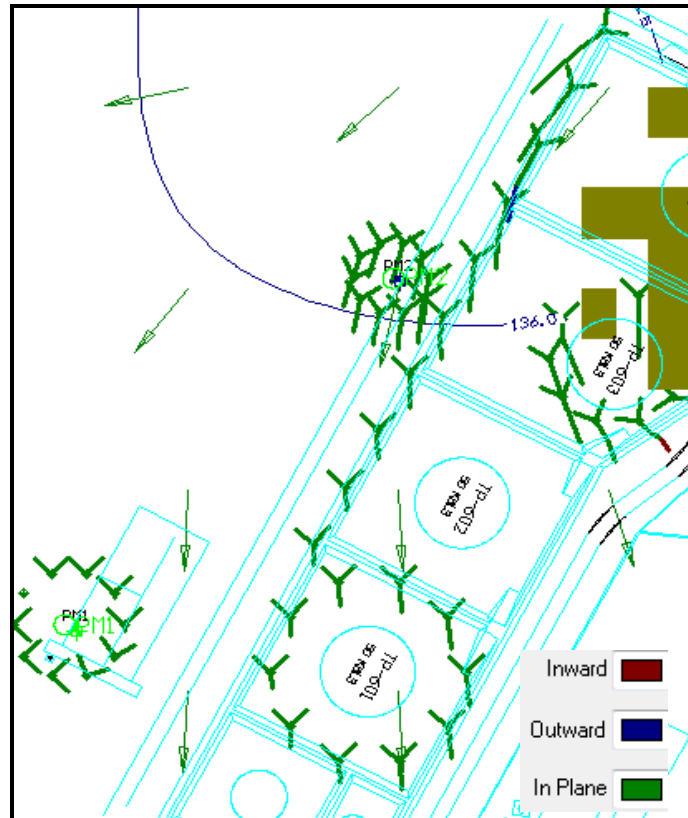
Es importante mencionar que el estado de los piezómetros no es óptimo debido a que algunos de ellos se encuentran secos o con sus filtros en mal estado, lo cual es de cuidado si se desea realizar una buena simulación ya que los datos registrados de ellos en campo son los puntos de partida para el proceso de modelación. No obstante la dirección del flujo al ser comparado con modelos anteriores realizados por la empresa, logró coincidir con las condiciones iniciales observadas en campo.

6.8.4. Aplicación de Modpath y Pathlines para evaluación de las trayectorias de partículas Forward y Backward.

Los resultados de proyección y trayectoria de las partículas Forward y Backward utilizando el programa de apoyo MODPATH para 1 año (365 días) se muestran a continuación en la imagen 26.

Las partículas fueron ubicadas en los TK - 703 y TK - 704, en el PM1, PM2, PM7 y en los tanques TP - 601, TP - 602, TP - 603, al igual que al costado del API específicamente; debido a que son lugares propensos a sufrir algún tipo de contaminación ya sea por fuga o escape de producto.

Imagen 26. Proyección y trayectoria partículas 1 año (365 días)

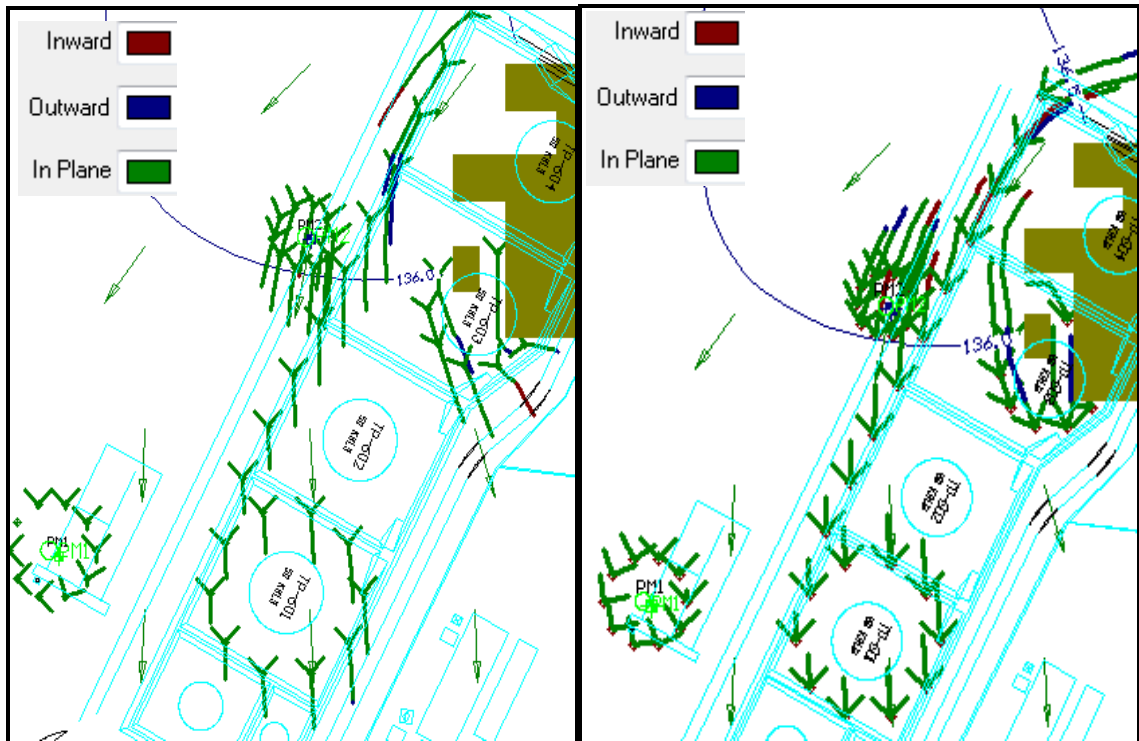


Fuente: Autor

En el tiempo establecido para estas partículas (365 días) se observa que la afectación por un evento contaminante a los cuerpos hídricos en el área de interés es mínima, ya que la extensión no es representativa para un periodo corto. Sin embargo el comportamiento del contaminante logra mantener la misma dirección del flujo de agua subterránea y a su vez sigue el dominio de la topografía del área en estudio.

En la imagen 27 se presentan las trayectorias de las partículas Forward y Backward asignadas para un tiempo de 2 años (730 días); tiempo en el cual la extensión de las trayectorias incrementa considerablemente en el área de influencia de los tanques TP - 601, TP - 602 y TP - 603.

Imagen 27. Proyección y trayectoria partículas forward (izquierda) backward (derecha) a 2 años (730 días)

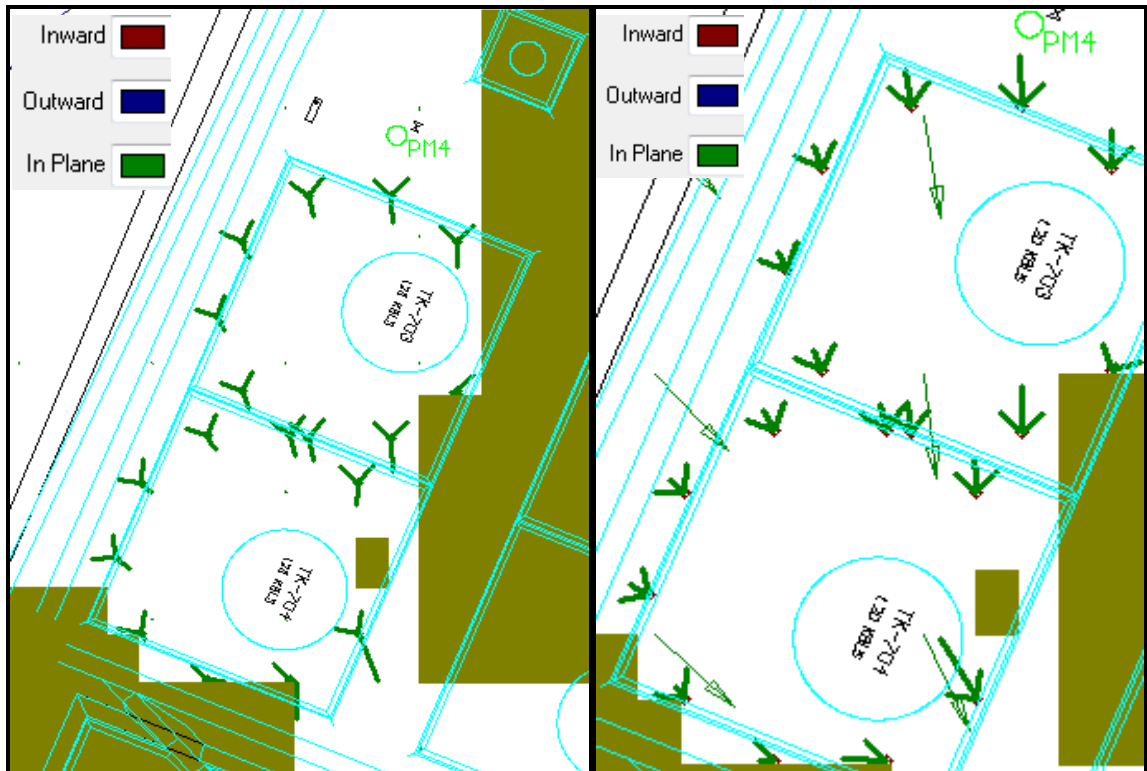


Fuente: Autor

Aunque la pluma contaminante no es muy extensa para este periodo, es evidente la ubicación estratégica de los pozos PM1 y PM2 puesto que como se observa son dos controles importantes ante una eventual situación de contaminación en el área. El buen estado de estos piezómetros permite indicar que es posible tener registros confiables del estado de las aguas subterráneas allí presentes, así como de la magnitud de la afectación generada al recurso suelo; por ello es indispensable caracterizar de manera periódica dichos elementos. Las partículas forward (izquierda) como las partículas backward (derecha) ubicadas de manera circular alrededor de los tanques de almacenamiento, conservan el mismo comportamiento del flujo de agua subterránea.

A continuación en la imagen 28 se muestra la proyección de partículas Forward (izquierda) y Backward (derecha) para el área de influencia de los tanques TK 703 y TK 704.

Imagen 28. Proyección y trayectoria partículas circulares a 2 años TK 703 - TK 704.

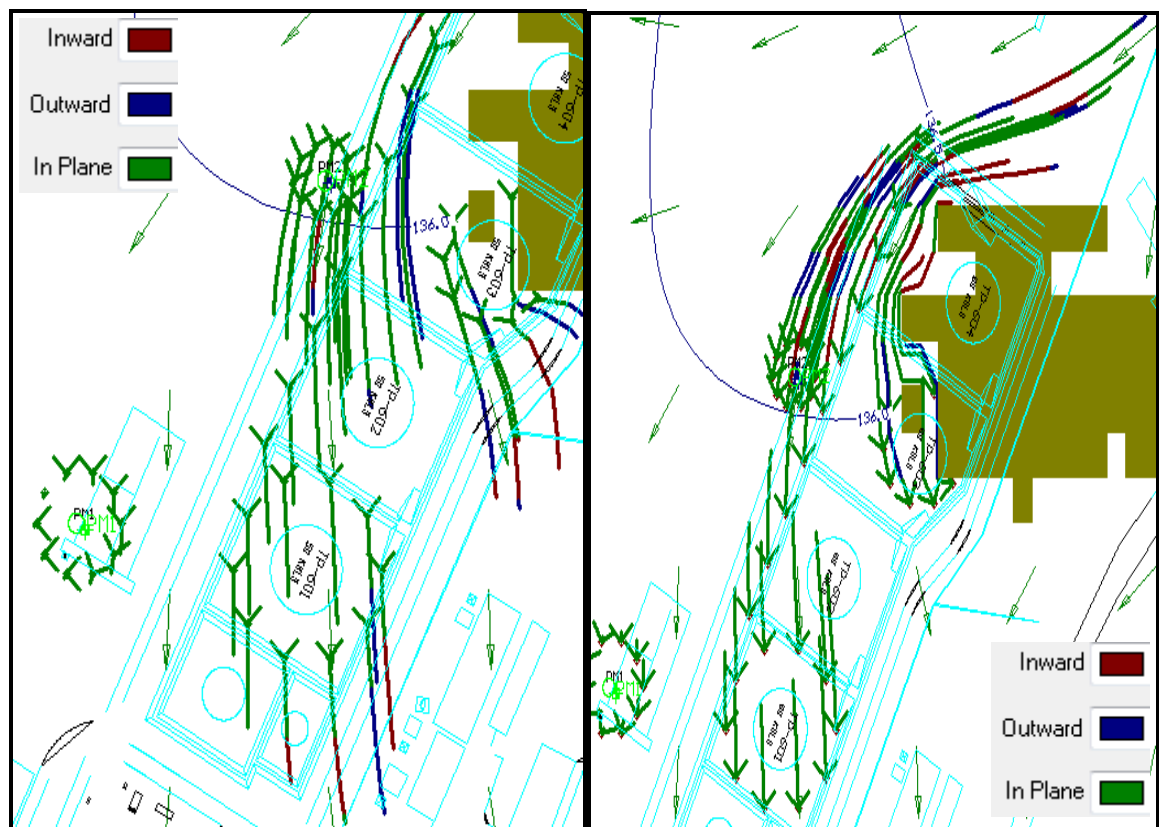


Fuente: Autor.

Se puede observar que la afectación que los tanques TK 703 y TK 704 pueden generar en el tiempo establecido es mínimo por tanto no generan un alto riesgo si se llegara a presentar un evento de derrame o fuga de producto. Sin embargo es necesario establecer todas las medidas de contingencia para dicha emergencia y de ésta manera evitar que el producto contamine aguas subterráneas y avance en el subsuelo a medida que pasa el tiempo.

Siguiendo con la evaluación de la simulación en cuanto a trayectorias de partículas incluidas en el modelo, se muestra a continuación en la imagen 29 la proyección de partículas para un tiempo estimado de 5 años (1825 días) para el área de influencia de los tanques TP - 601, TP - 602 y TP - 603 así como de los piezómetros PM1 y PM2.

Imagen 29. Proyección y trayectoria partículas forward (izquierda) backward (derecha) a 5 años (1825 días)



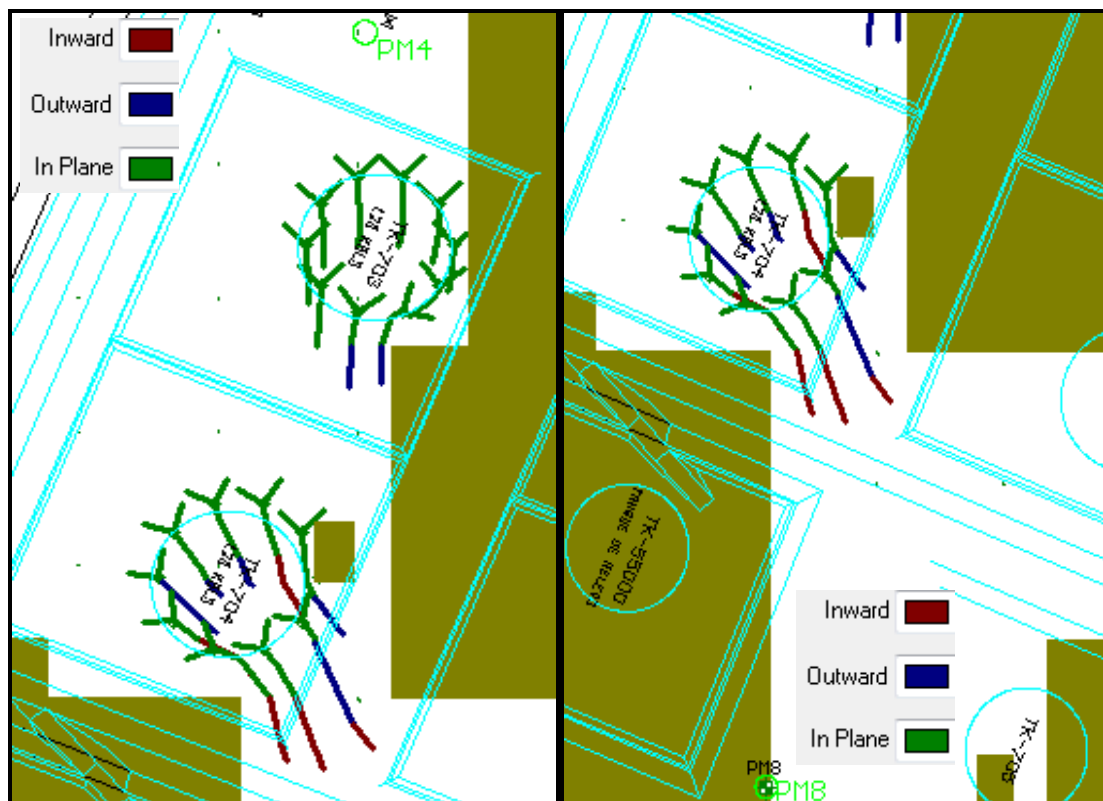
Fuente: Autor.

Tal como se observa en la imagen anterior la extensión de la pluma contaminante en este punto es representativa en cuanto a la afectación que los tanques TP - 603, TP - 602 y TP- 603 podrían generar dentro del área de estudio. Conservan la misma dirección del flujo de agua subterránea sin afectar de manera directa algún cuerpo hídrico o de importancia relevante dada las condiciones de la zona. Los

colores que se encuentran sobre las trayectorias de las partículas y que se aprecian en la imagen, son los diversos niveles que logran dichas partículas en el subsuelo y descritos así: rojo: Inward (Interior), azul: Outward (Hacia el exterior), verde: In plane (en el plano)

En la imagen 30 se aprecia la proyección y trayectoria de las partículas forward asignadas en el área de los tanques TK – 703 y TK – 704 para un periodo de 5 años

Imagen 30. Proyección y trayectoria partículas forward K 703 - TK 704



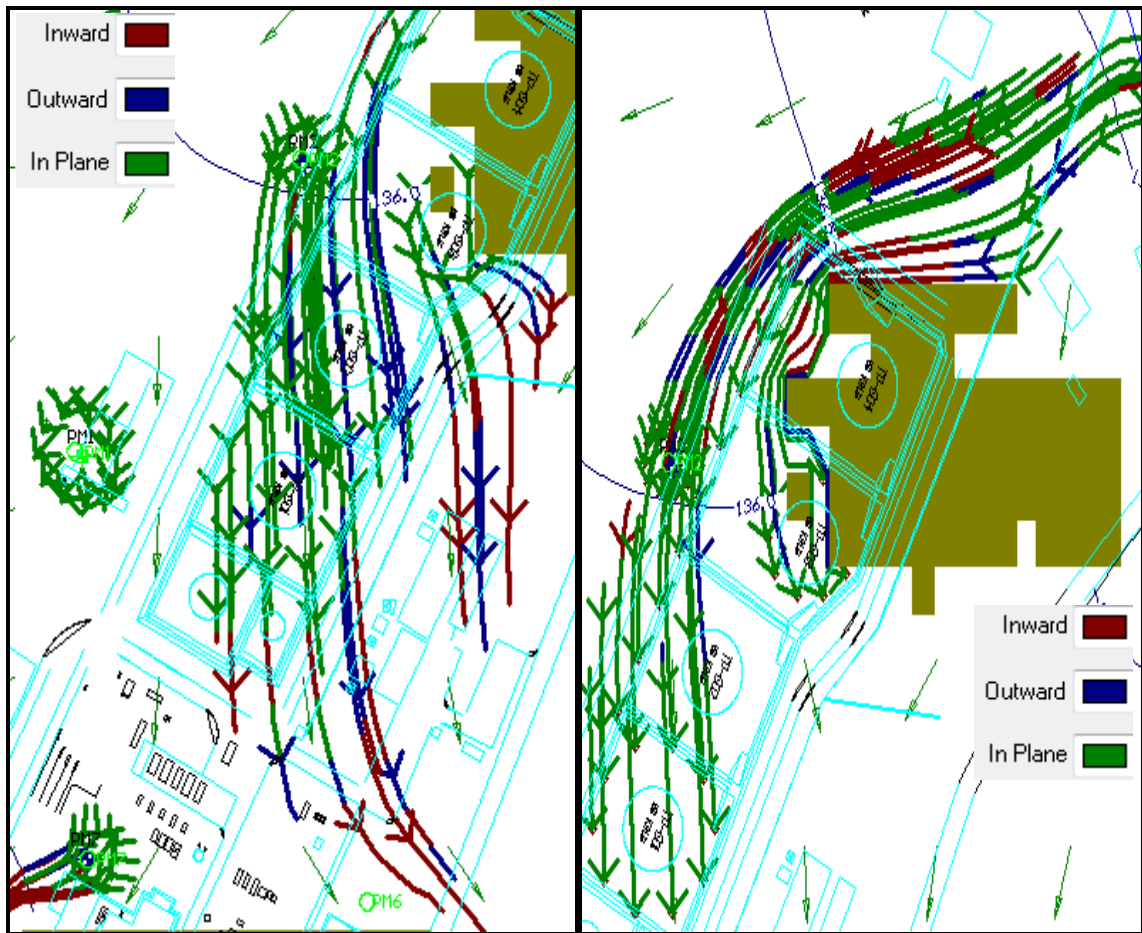
Fuente: Autor.

Tal como se aprecia en la imagen y dado el caso que se presentara evento de contaminación en el área señalada, los piezómetros PM8 y PM9 estarían en la capacidad de registrar dicho acontecimiento, ya que el producto migraría en la

misma dirección del flujo de agua subterránea. Sin embargo en el presente estudio ambos pozos se encuentran en áreas secas, por tanto supone la necesidad de realizar control y monitoreo de estas estructuras para establecer las condiciones hidráulicas con las que cuentan o si existe la necesidad de reubicar estos puntos. Los dos piezómetros fueron construidos en el 2011 y no se tenía un historial del control de ellos. Dadas las condiciones topográficas de la zona, es posible que el desplazamiento del contaminante; y como soporte el valor de la velocidad de flujo obtenida (0.42 m/d), sea muy lento para el periodo señalado.

La extensión de la pluma contaminante evaluada para un periodo de 10 años (3650 días) se aprecia en la imagen 31.

Imagen 31. Proyección Forward (izquierda) y Backward (backward) 10 años (3650 días)



Fuente: Autor.

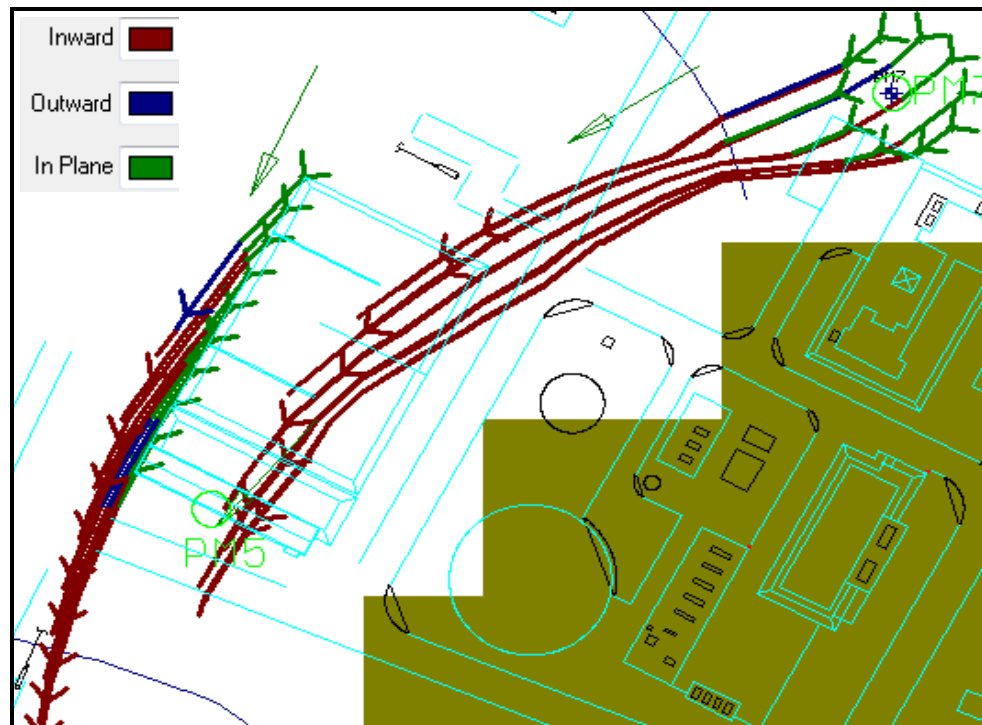
Los colores que se encuentran sobre las trayectorias de las partículas y que se aprecian en la imagen, son los diversos niveles que logran dichas partículas en el subsuelo y descritos así: rojo: Inward (Interior), azul: Outward (Hacia el exterior), verde: In plane (en el plano).

Como se puede observar con las partículas forward para 10 años de modelación (izquierda), el PM6 debería registrar en este tiempo una posible contaminación con hidrocarburo en el área, sin embargo éste piezómetro no tiene una buena recuperación y fue por esto que no se le pudo realizar pruebas de conductividad.

De igual forma se ve claramente un aumento representativo de la extensión de la pluma contaminante, permitiendo de ésta manera establecer un escenario desafortunado para el recurso hídrico y para el subsuelo, pues en 10 años de simulación el recorrido realizado por un agente contaminante (Diesel) es amplio y ha abarcado gran parte del área de interés; todo lo anterior sin tener en cuenta las propiedades del contaminante.

En la imagen 32 se presenta el comportamiento de la pluma contaminante en el área del API y de los piezómetros PM5 y PM7 para 10 años de simulación.

Imagen 32. Trayectoria partículas forward 10 años PM7, PM5 y API



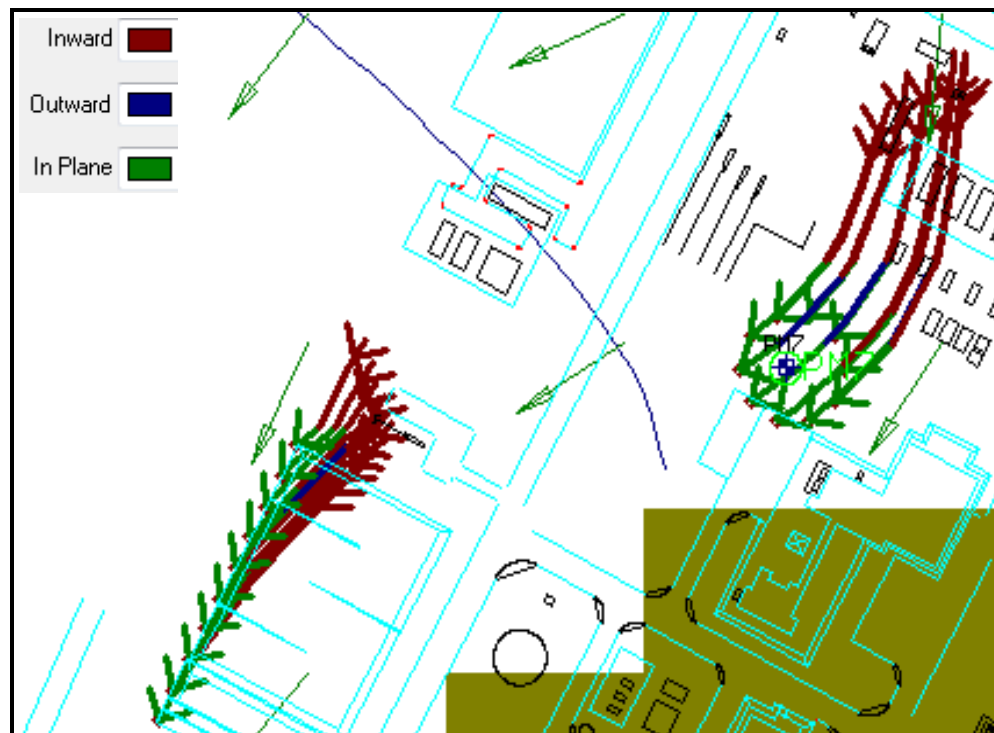
Fuente: Autor.

En vista de lo observado y si dado el caso el PM7 no registrara signos de contaminación provenientes de los tanques TP - 603, TP - 602 y TP- 603 en los 10 años establecidos, el PM5 lograría entrar a cubrir ésta necesidad. A pesar de esto,

cabe resaltar que el estado del pozo de monitoreo no es óptimo y por tanto se esperaría que para dicho tiempo (10 años), éste ya contara con una mejora en su estructura; específicamente en el filtro que se encontraba dañado cuando se realizó la visita de campo, frenando de ésta manera la posibilidad de practicarle prueba de conductividad a dicho pozo. Al contar con buenas condiciones estructurales, es posible también realizar un monitoreo continuo del nivel del agua subterránea.

Finalmente para el modelo Vasconia se analizó la extensión de la pluma contaminante a través de la aplicación de partículas backward con el fin de conocer la procedencia del contaminante en el área del PM7 y el API, dicho proceso se muestra a continuación en la imagen 33.

Imagen 33. Trayectoria partículas backward 10 años PM7 y API



Fuente: Autor.

Es evidente en la imagen que cualquier evento de fuga o derrame de hidrocarburo proveniente de los tanques TP - 603, TP - 602 y TP- 603 podría ser registrado por el PM7. Sin embargo es de vital importancia evitar este tipo de acontecimientos puesto que la idea es realizar todos y cada uno de los procesos productivos de la manera más adecuada posible.

Debido a que algunos de los resultados obtenidos en la caracterización físico-química de Vasconia reportaron valores en cuanto a concentración de grasas y aceites, éstos no generaron una película visible en la muestra tal como lo establece la norma; además de esto, no es posible definir que tipo de aceite fue encontrado en las muestras ya que este parámetro puede referirse a aceites de origen tanto vegetal como animal. Los valores de los compuestos BTEXs encontrados en algunos análisis no se reportan como indeseables ya que no superan los límites establecidos en la normatividad aplicada.

En resumen y según las derivaciones obtenidas de la aplicación de Pathlines para las estaciones industriales, es posible concluir que la contaminación en estas áreas presenta un comportamiento irregular e inesperado debido a que tarda un tiempo considerable para lograr registrarse en los pozos de monitoreo. En primera instancia, el producto liberado penetra de manera vertical el terreno y luego se extiende horizontalmente a lo largo del subsuelo; esto puede deberse al tipo de material presente en el suelo o a las mismas propiedades del contaminante. También es importante destacar los diferentes valores de velocidad de flujo de agua subterránea obtenidos a través de la modelación realizada tanto para la estación Sebastopol y Vasconia (0.68 m/d y 0.42 m/d respectivamente), ya que indica que la probabilidad del avance y movilidad de un contaminante; en este caso Diesel, sea mayor.

7. CONCLUSIONES

- Según las visitas de campo realizadas y la revisión de documentos existentes respecto a las instalaciones de la Estación Sebastopol y la Estación Vasconia, es posible afirmar que cuentan con las estructuras, el manejo y los controles adecuados para el almacenamiento y demás procesos que allí realizan, disminuyendo de ésta manera la probabilidad de ocurrencia de un evento contaminante dentro de las áreas de interés.
- La caracterización físico – química realizada por el Instituto Colombiano de Petróleos (ICP) a las muestras de aguas subterránea extraídas de las estaciones industriales, indicó que la calidad de las mismas es óptima debido a que no se reportaron valores significativos de hidrocarburo dentro de las áreas de estudio, según lo establecido en la norma colombiana vigente (Fenoles <0.10 mg/L, grasas y aceites <1.07 mg/L y BTEXs cuyas concentraciones son inferiores a la mínima cuantificable).
- La modelación de flujo de aguas subterráneas y trayectoria de partículas forward y backward que simularon la extensión de la pluma contaminante en la estación Sebastopol determinaron la dirección del flujo como “variable” con sentido preferencial sur-oeste debido a la topografía del terreno; ya que cuenta con pendientes en la mayoría de las direcciones y su velocidad de 0.68 m/d dentro del área de interés; resultados esperados teniendo en cuenta el modelo anteriormente desarrollado por parte de la empresa de Servicio e Investigaciones Ambiental (SIAM) en el año 2006.
- La dirección del flujo de agua subterránea y el comportamiento de las trayectorias generadas por la aplicación de partículas forward y backward, variaron en función de factores tales como la topografía, niveles freáticos y características específicas del suelo como granulometría, porosidad, litografía,

entre otras, además de la influencia de cuerpos hídricos presentes en el área de influencia de ambas instalaciones industriales como ríos, lagos, caños, quebradas. Esto se ve reflejado en los valores de las velocidades obtenidas y por qué difieren tanto una de otra.

- Teniendo en cuenta que la topografía de área de interés (Estación Vasconia) es plana, cualquier diferencia de nivel en las cotas del terreno y niveles freáticos registrados, puede generar la variación en los resultados obtenidos; es también importante mencionar la influencia que tiene el río sobre la dirección del flujo y es por esto que la calibración del modelo podría no ser para éste caso la más adecuada.
- La modelación de flujo de aguas subterráneas y trayectoria de partículas que simularon la extensión de la pluma contaminante en la estación Vasconia determinó la dirección del flujo subsuperficial preferencial en sentido sur – noroeste. Así mismo se determinó la velocidad de flujo de agua subterránea arrojando un valor de 0.42 m/d.
- En vista de la dirección que asume la trayectoria de las partículas asignadas para el modelo de la Estación Vasconia, es posible concluir que la ubicación de los piezómetros es la adecuada para mantener un control del comportamiento y calidad del recurso hídrico subterráneo, pese a esto necesario el mantenimiento de estas estructuras para preservar y asegurar un monitoreo en calidad de agua confiable.
- El ejercicio de la simulación observado en las dos áreas de interés debe ser entendido como la fase inicial de todo un proceso que involucra la estimación del movimiento de sustancias contaminantes en el subsuelo desde sus

respectivas fuentes, por lo tanto este tipo de estudio puede servir como base a futuros trabajos de investigación.

8. RECOMENDACIONES

- La calibración del modelo de Vasconia al no arrojar un resultado altamente confiable es preciso sugerir un nuevo ajuste en los valores tomados en campo para generar en estudios futuros un porcentaje de error mínimo que se encuentre dentro de un límite aceptable de confiabilidad.
- Es apropiado realizar mediciones periódicas de los niveles de agua en los piezómetros para lograr controlar de manera más eficaz el comportamiento y calidad del agua, además es importante proteger y mantener en buenas condiciones los puntos de monitoreo
- Realizar un levantamiento topográfico de todos los pozos de los cuales se utiliza información, igualmente es de gran importancia que la medición de los niveles estáticos sean tomados regularmente desde el punto exacto donde fue geo-referenciado inicialmente.
- Ajustar el modelo de flujo de aguas subterráneas teniendo en cuenta nuevos monitoreos, utilizando el software Visual Modflow para verificar la calibración del mismo y que ésta sea óptima.
- Se recomienda controlar y monitorear el estado del suelo y agua subterránea de la zona nor-este de la estación Sebastopol (donde se encuentran ubicadas empresa adyacentes) a diferentes profundidades para lograr establecer el impacto que aún podría presentar el evento de contaminación que se generó en el año 2009 y establecer igualmente la variabilidad de los componentes del contaminante.

BIBLIOGRAFIA

- ATDSR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, División de Toxicología, 1999.
- BETANCUR T., PALACIO C., MEJÍA O; Propuesta metodológica para acoplar la exploración y la investigación hidrogeológica; Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad de Antioquia; ISAGEN, Medellín. 2004
- BETANCUR, T., PALACIO, C. La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales. Caso de aplicación: Bajo Cauca antioqueño, grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín. 2006
- CARTA PETROLERA EDICIÓN 114. Una historia con peso [En línea] Abril – Mayo 2010; http://portal.ecopetrol.com.co/especiales/Informe_Carta_Abr2006/rev_tecnologia2.htm [Citado en 31 de Agosto de 2011].
- CELIS, H. BASTIÁN. Contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos líquidos livianos en fase no acuosa. Marzo 2009, n° 22 [Consultada: 28-08-2011]; Disponible en <http://www.cienciaahora.cl/Revista22/03ContaminacionAguasSubterranas.pdf>
- Empresa Colombiana de Petróleos (ICP). Modelación régimen de flujo de agua y dispersión de contaminantes en la refinería de Cartagena (CAR); 1998.

- FOSTER, S. HIRATA, R. GOMES, D. D'ELIA, M. & PARIS, M. 2002 Groundwater quality protection. A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. The World Bank. Washington, D.C. 88 p. (Foster et al. 2002).
- GAVIRIA, J.I y BETANCUR, T. Avances metodológicos para evaluar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas Universidad de Antioquia. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental, Medellín, Antioquia. 2006.
- HENRY, J. Y HEINKE, G. Environmental science and engineering 2nd Edition. Prentice Hall, 1996. 778 p. ISBN 0131206508
- HILLEL, DANIEL; (1998), Environmental Soil Physics. Academic Press. P.471.
- IBARRA, Diana; Evaluación del potencial de degradación de hidrocarburos totales en suelos contaminados procedentes de Petro Santander Colombia INC. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2008; 51-53p.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE PETROLEOS, CTP Ltda. Implementation Management and Capacity Development for Eco-Efficiency Programming, Sebastopol. Octubre, 2010.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE PETROLEOS, CTP Ltda. Implementation Management and Capacity Development for Eco-Efficiency Programming, Vasconia. Octubre, 2010.
- LAGREGA, Michael, BUCKINGHAM, Phillip L; EVANS, Jeffrey; Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos. Volumen I Mc. Graw Hill, 1996, Pág.: 208, 209, 523, 524, 558 - 588, 589.

- LENNTECH, WATER TREATMENT SOLUTIONS. Origen y situación de las agua subterránea en la tierra [Consultada: 18-10-2011]; Disponible en <http://www.lenntech.es/agua-subterranea/origen-y-cantidad-agua-subterranea.htm>
- Minería y medio ambiente. Restauración y remediación de Suelos y Aguas subterráneas. España. [Consultada: 18-10-2011]; Disponible en <http://www.uclm.es/users/higueras/mam/MMAM10.htm>
- NEWELI, C., ACREE, S. y ROSS, R. (1995). Light nonaqueous phase liquids. EPA, Office of Research and Development, EPA/540/S-95/500.
- PELLINI, Leandro. Biorremediación estimulada por efluentes cloacales tratados de suelos contaminados con hidrocarburos. Escuela superior de Salud y Ambiente, Universidad Nacional de Comahue, 2006. Disponible en Internet: <http://www.tesis.bioetica.org/lp.htm>
- RIVERA-CRUZ, M., FERRERA-CERRATO, R., SÁNCHEZ-GARCÍA, P., VOLKE-HALLER, V., FERNÁNDEZ-LINARES, L. y RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ, R. (2004). Descontaminación de suelo con petróleo crudo mediante microorganismos autóctonos y pasto alemán [*Echinochloa polystachya*(H.B.K.) Hitchc.]. *Agrociencia* 38:1-12p.
- SANCHEZ, SAN ROMÁN F. JAVIER. Manual introducción a Visual ModFlow. [Citado 27/01/11]. Disponible en Internet: http://web.usal.es/~javisan/hidro/Complementos/manual_modflow.pdf
- SANCHEZ, SAN ROMÁN F. JAVIER. Medidas puntuales de permeabilidad “Slug tests”. Universidad de Salamanca, España. [Citado 27/09/11]. Disponible en Internet: http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Slug_tests.pdf

- Saval Bohórquez, S. 1995 “Remediación y restauración”; en PEMEX Ambiente y energía. Los retos del futuro, México, UNAM-Petróleos Mexicanos.
- SIAM S.A, Construcción de la red de pozos de monitoreo en el terminal de Sebastopol. ECOPETROL, 2006.
- SIAM S.A, Construcción de la red de pozos de monitoreo en el terminal de Vasconia. ECOPETROL, 2006.
- VARGAS GALLEGO Paola Andrea, CUÉLLAR René Ricardo, DUSSÁN Jenny; Biorremediación de residuos del petróleo. Apuntes científicos uniandinos no. 4 / Dic. 2004.
- VILLARROYA, FERMÍN. Jornadas técnicas sobre aprovechamiento de aguas subterráneas para riego. Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos. Departamento de Geodinámica, facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. Madrid, Junio 2009.
- WATERLOO TRAINING COURSE SERIES. Applied groundwater flow & contaminant transport modeling. Manual Tomo I; Bogotá, Diciembre 15-18, 2009.
- ZAPOROZEC, Alexander. Groundwater contamination inventory: a methodological guide 2002. Series on groundwater no.2, UNESCO [Consultada: 28-08-2011]; p. 25. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001325/132503e.pdf>

ANEXOS

1. Resultados Laboratorio Aguas Sebastopol.

AGUAS SUBTERRANEAS PLANTA SEBASTOPOL	IDENTIFIC. MUESTRA	PM-2	PM-4	PM-5	PM-6	DECRETO 1594/84 ART. 38	Alberta Risk Management guidelines for Petroleum storage tank sites 2001. (Table 4. GenericHydrocarbonCriteriafortheGroundwaterIngestionPathway)
		CERCA DE LA SALIDA DEL POZO SEPTICO N°1 POLIDUCTO ORIENTE	FRENTE AL TK 8117	FRENTE AL SEPARADOR CPI N°3 TK GEODESICOS	CERCA AL COMPRESOR POLIDUCTO ORIENTE		
SUBMISSION: 100100061	FECHA DE MUESTREO	26-oct-10	26-oct-10	26-oct-10	26-oct-10		
Componente	Unidad	200568130	200568131	200568132	200568133		
DATOS IN SITU							
PROFUNDIDAD	m	0,16	4,06	6,47	1,97	NR	NR
OXIGENO DISUELTO	mg O2/L	0,3	4,3	3,7	4,9	NR	NR
PH / T (GR C)	Uni. pH	5.74/30.3	5.83/32.3	5.59/31.7	5.79/31.8	5.0 -9.0	NR
TEMPERATURA DEL AGUA	°C	30,3	32,3	31,7	31,8	NR	NR
ANALISIS DE LABORATORIO							
CONDUCTIVIDAD	uS/cm/°C	295/21.1	168/21.1	251/21.3	77.0/21.6	NR	NR
FENOLES	mg/L	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0,002	NR
GRASAS Y ACEITES	mg/L	<1.07	<1.07	14,1	<1.07	No se observa película visible	NR
SOLIDOS DISUELTOS	mg/L	245	211	197	149	NR	NR
ANALISIS DE BTEXs							
BENCENO	microg/L	<2.76	<2.76	2,085	<2.76	NR	5*
TOLUENO	microg/L	<2.23	<2.23	3,008	<2.23	NR	24*
ETILBENCENO	microg/L	<1.82	<1.82	2,337	<1.82	NR	2.4*
m+p-XILENO	microg/L	<1.85	<1.85	3,634	<1.85	NR	300
o-XILENO	microg/L	<2.30	<2.30	11,05	<2.30	NR	
NR: No Reporta (*) Aun cuando la norma reporta las concentraciones en mg/L, se hace la conversión a microg/L debido a las bajas concentraciones de las muestras analizadas							

2. PRUEBAS SLUG ESTACION SEBASTOPOL

PRUEBAS DE SLUG POZO DE MONITOREO No. 2 TERMINAL PUERTO BERRIO

ANÁLISIS DE PRUEBAS DE SLUG MÉTODO DE HVORSLEV PM2			
DATOS DE LA PRUEBA DE SLUG			PUNTOS AUXILIARES PARA ANÁLISIS
NE =	0,18		0
So =	4,1		2400
Rw =	0,06985	m	3,10E-01
Rc =	0,0254	m	
b =	3	m	
			RESULTADOS
			pendiente= -2,12E-04
			Intercep = 1,00E+00
			To = 2,05E+03
			K (m/día) = 1,71E-02
t(seg)	s(m)	s/so	
0	4,1	1	
60	3,97	0,967	
120	3,87	0,941	
180	3,76	0,913	
240	3,67	0,890	
300	3,56	0,862	
360	3,46	0,837	
420	3,37	0,814	
480	3,27	0,788	
540	3,18	0,765	
600	3,14	0,755	
900	2,78	0,663	
1200	2,44	0,577	
1500	2,1	0,490	
1800	1,85	0,426	
2100	1,62	0,367	
2400	1,54	0,347	

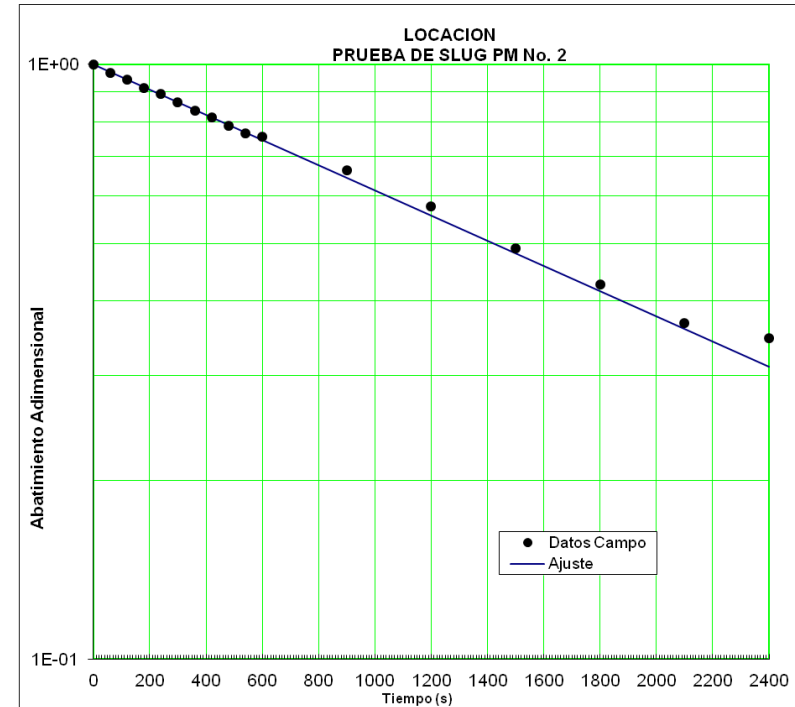
NE: Nivel estático

So: Nivel de abatimiento instantáneo

Rw: Radio de la zona filtrante (2")

Rc: Radio CASING (1")

b: longitud de filtro



PRUEBAS DE SLUG POZO DE MONITOREO No. 4

TERMINAL PUERTO BERRIO

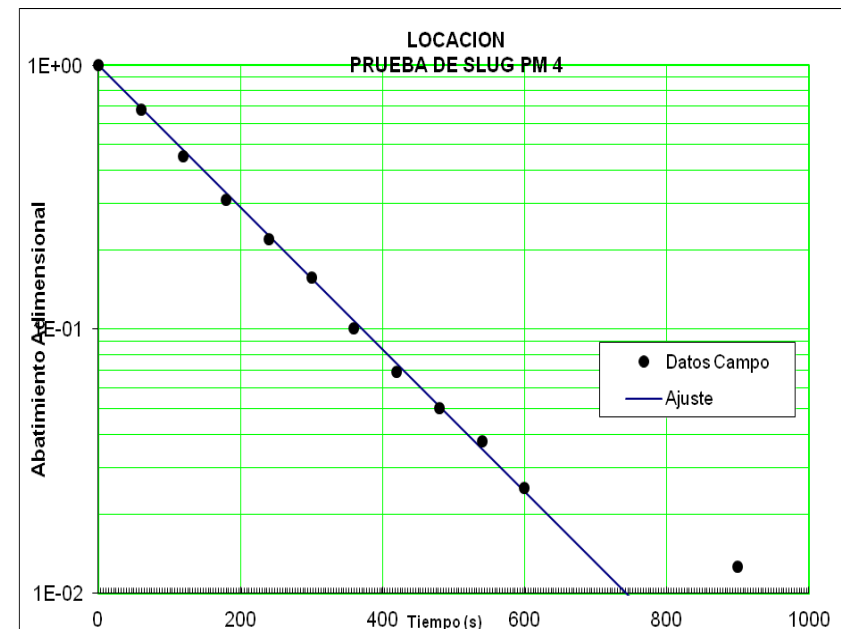
ANÁLISIS DE PRUEBAS DE SLUG METODO DE HVORSLEV PM4				
DATOS DE LA PRUEBA DE SLUG			PUNTOS AUXILIARES PARA ANÁLISIS	
NE =	3,99		0	1,00E+00
So =	4,24		1000	1,30E-02
Rw =	0,06985	m		
Rc =	0,0254	m		
b =	3	m		
			RESULTADOS	
			pendiente=	-1,89E-03
			Intercep =	1,00E+00
			To =	2,30E+02
			K (m/día) =	1,52E-01
t(seg)	s(m)	s/so		
0	4,24	1		
60	4,17	0,720		
120	4,12	0,520		
180	4,1	0,440		
240	4,08	0,360		
300	4,07	0,320		
360	4	0,240		
420	4,04	0,200		
480	4,04	0,200		
540	4,03	0,160		
600	4,03	0,160		
900	4,01	0,080		

So: Nivel de abatimiento instantáneo

Rw: Radio de la zona filtrante (2")

Rc: Radio CASING (1")

b: longitud de filtro



NE: Nivel estático

PRUEBAS DE SLUG POZO DE MONITOREO No. 5

TERMINAL PUERTO BERRIO

ANÁLISIS DE PRUEBAS DE SLUG METODO DE HVORSLEV PM5

DATOS DE LA PRUEBA DE SLUG			PUNTOS AUXILIARES PARA ANÁLISIS	
NE =	6,42		0	1,00E+00
so =	9,95		3600	4,80E-01
rw =	0,06985	m	RESULTADOS pendiente= -8,85E-05 Intercep = 1,00E+00 To = 4,90E+03 K (m/día) = 7,12E-03	
rc =	0,0254	m		
b =	3	m		
t(seg)	s(m)	s/so		
0	9,95	1		
60	9,88	0,980		
120	9,85	0,972		
180	9,8	0,958		
240	9,76	0,946		
300	9,72	0,935		
360	9,69	0,926		
420	9,65	0,915		
480	9,61	0,904		
540	9,58	0,895		
600	9,54	0,884		
900	9,37	0,836		
1200	9,21	0,790		
1500	9,04	0,742		
1800	8,88	0,697		
2400	8,58	0,612		
3000	8,3	0,533		
3600	8,13	0,484		

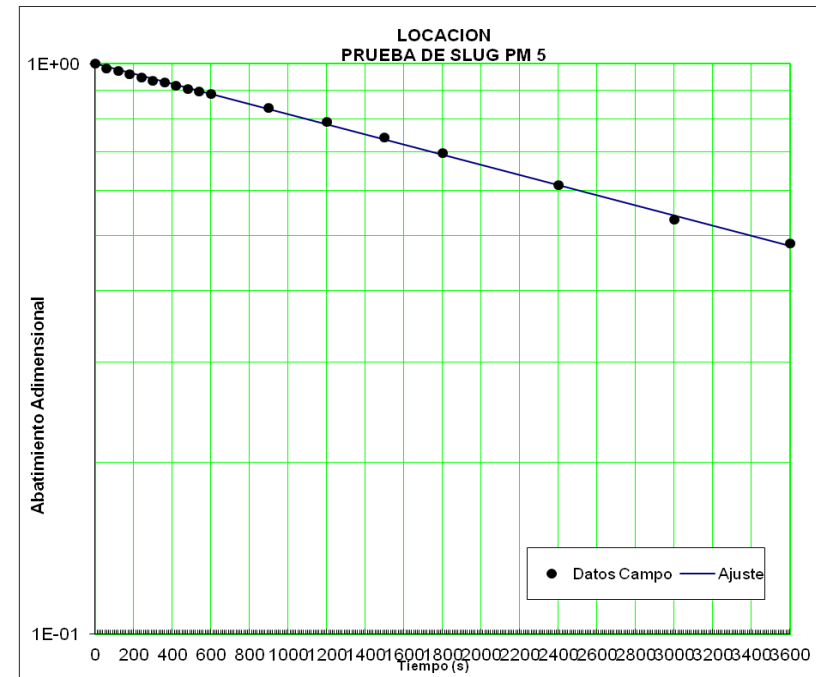
NE: Nivel estático

So: Nivel de abatimiento instantáneo

Rw: Radio de la zona filtrante (2")

Rc: Radio CASING (1")

b: longitud de filtro



PRUEBAS DE SLUG POZO DE MONITOREO

No. 6

TERMINAL PUERTO BERRIO

ANÁLISIS DE PRUEBAS DE SLUG METODO DE HVORSLEV PM6		
DATOS DE LA PRUEBA DE SLUG		PUNTOS AUXILIARES PARA ANÁLISIS
NE =	1,94	0 1,00E+00
so =	3,53	800 7,00E-03
rw =	0,06985 m	RESULTADOS
rc =	0,0254 m	
b =	3 m	
		Intercep = 1,00E+00
		To = 1,61E+02
		K (m/día) = 2,17E-01
t(seg)	s(m)	s/so
0	3,53	1
60	3,02	0,679
120	2,66	0,453
180	2,43	0,308
240	2,29	0,220
300	2,19	0,157
360	2	0,101
420	2,05	0,069
480	2,02	0,050
540	2	0,038
600	1,98	0,025
900	1,96	0,013
1200	1,95	0,006
1500	1,95	0,006
1800	1,95	0,006

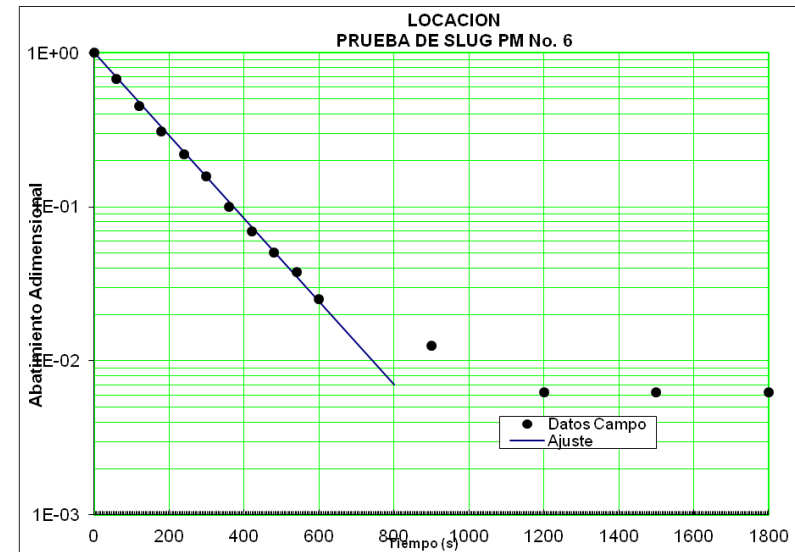
NE: Nivel estático

So: Nivel de abatimiento instantáneo

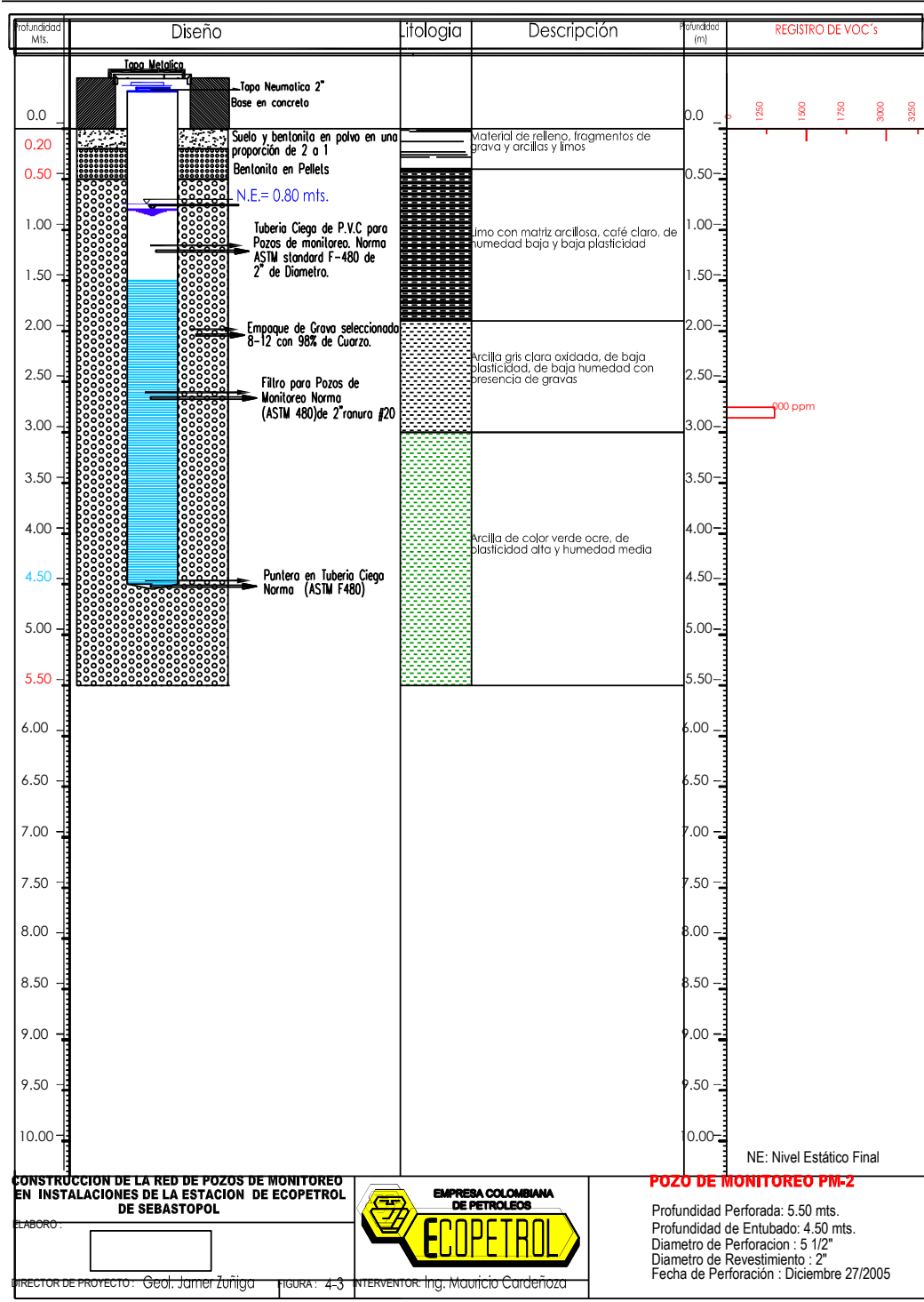
Rw: Radio de la zona filtrante (2")

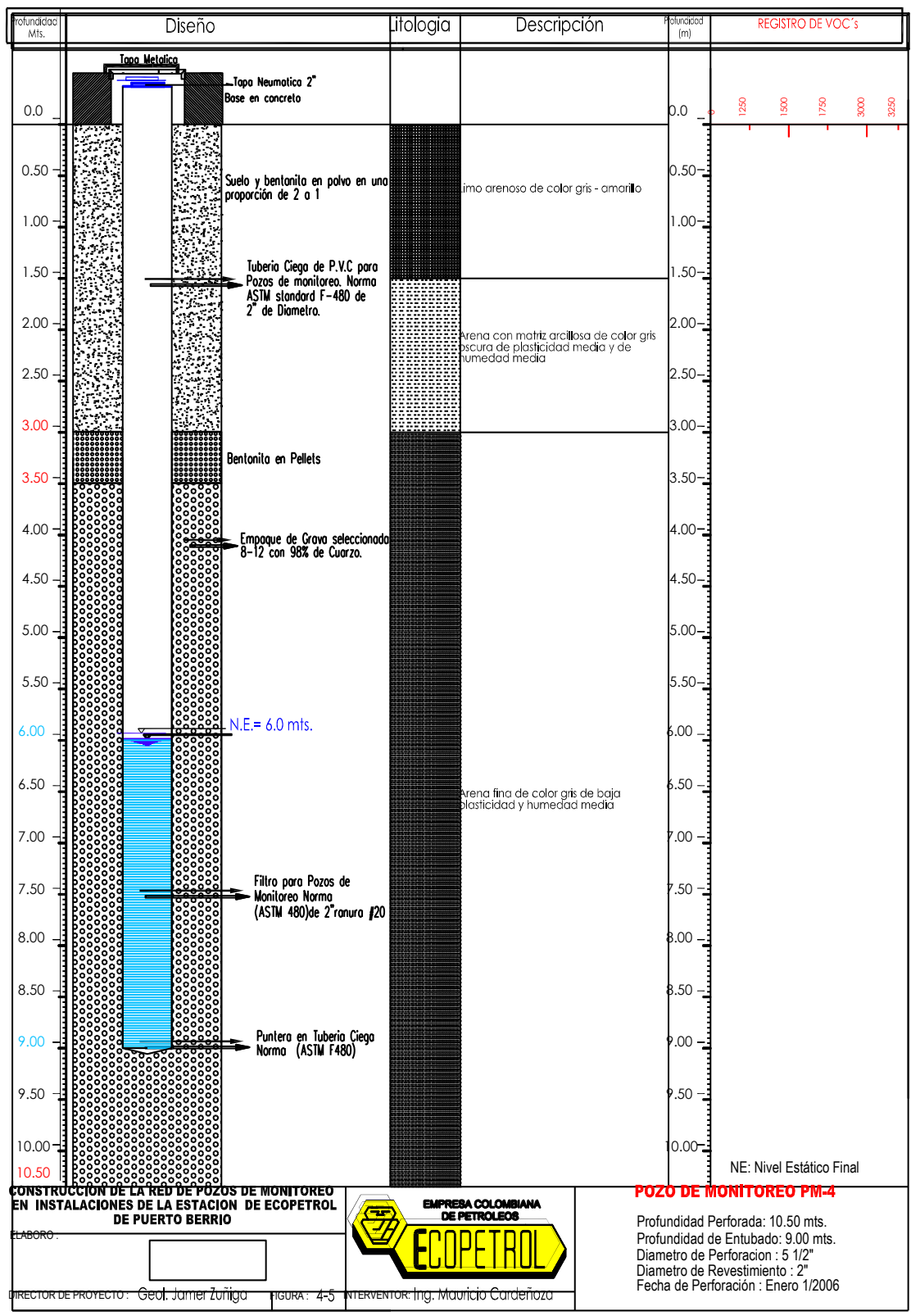
Rc: Radio CASING (1")

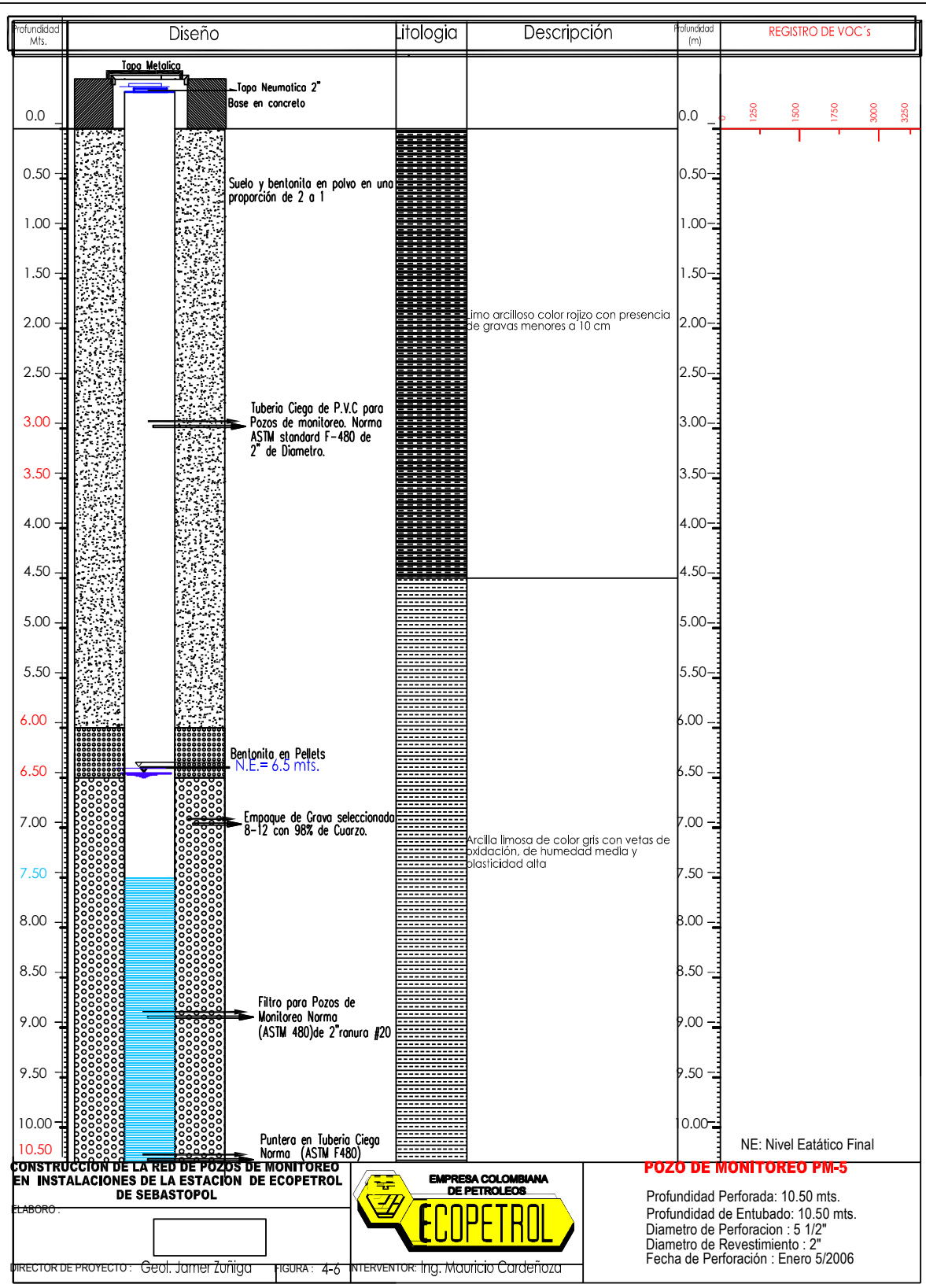
b: longitud de filtro



3. PERFILES LITOLÓGICOS PIEZOMETROS SEBASTOPOL







CONSTRUCCIÓN DE LA RED DE POZOS DE MONITOREO EN INSTALACIONES DE LA ESTACION DE ECOPETROL DE SEBASTOPOL

ELABORÓ:

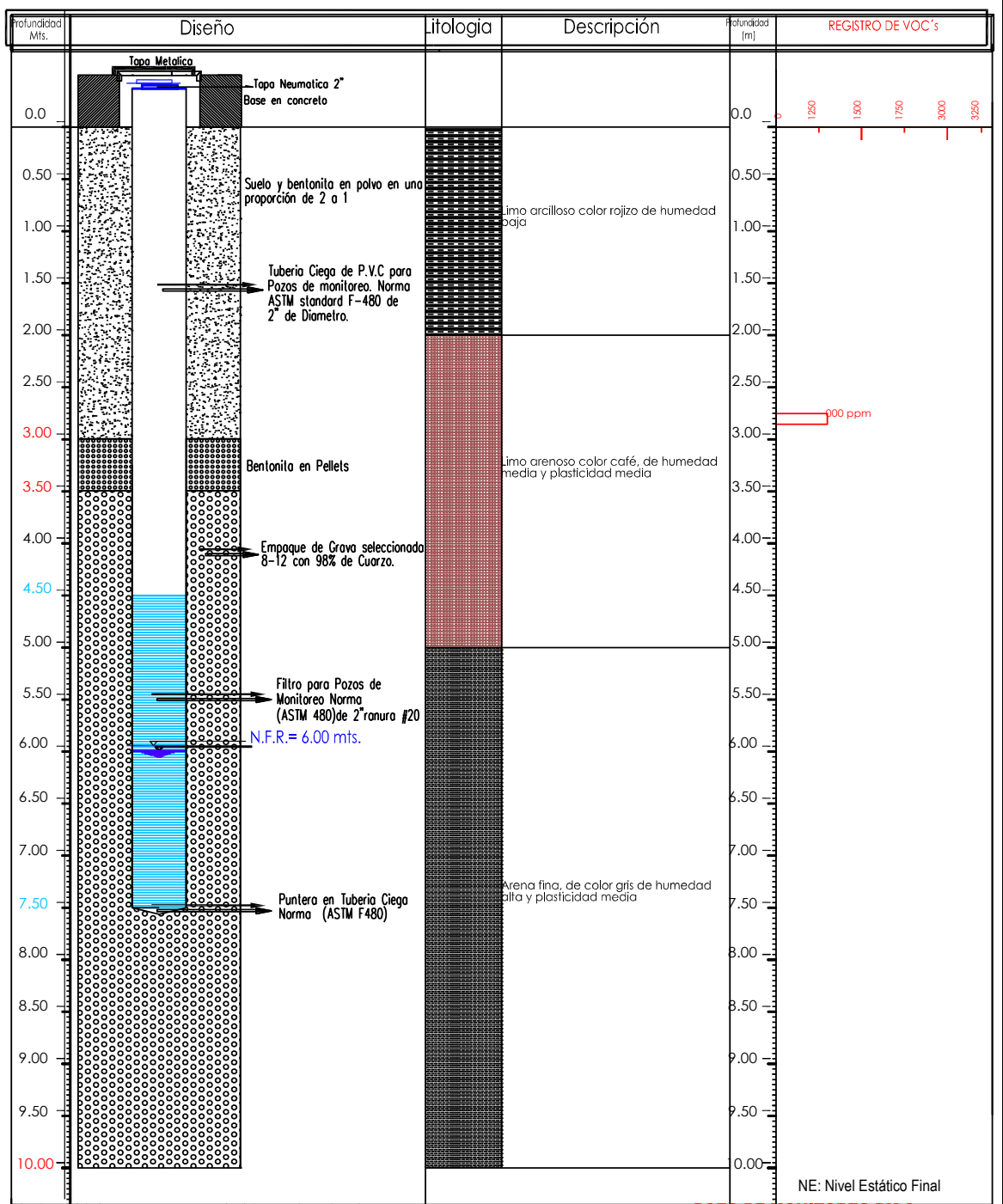
DIRECTOR DE PROYECTO: Geol. Jamer Zúñiga



INTERVENIOR: Ing. Mauricio Cardeñoza

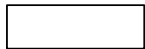
POZO DE MONITOREO PM-5

Profundidad Perforada: 10.50 mts.
 Profundidad de Entubado: 10.50 mts.
 Diámetro de Perforación : 5 1/2"
 Diámetro de Revestimiento : 2"
 Fecha de Perforación : Enero 5/2006



CONSTRUCCIÓN DE LA RED DE POZOS DE MONITOREO EN INSTALACIONES DE LA ESTACION DE ECOPETROL DE SEBASTOPOL

LABORO:



DIRECTOR DE PROYECTO: Geol. Jamer Zuñiga

FIGURA: 4-7



INTERVENTOR: Ing. Mauricio Cardeñoza

POZO DE MONITOREO PM-6

Profundidad Perforada: 10.00 mts.
 Profundidad de Entubado: 7.50 mts.
 Diametro de Perforacion : 5 1/2"
 Diametro de Revestimiento : 2"
 Fecha de Perforación : Enero 6/2006

NE: Nivel Estático Final

4. DATOS IDEAM

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

SISTEMA DE INFORMACION
NACIONAL AMBIENTAL

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACION (mms)

FECHA DE PROCESO : 2011/11/17			ESTACION : 23110030 PTO NINO												
LATITUD 0556 N		TIPO EST	PM	DEPTO BOYACA		FECHA-INSTALACION 1974-AGO					FECHA-SUSPENSION				
LONGITUD 7435 W		ENTIDAD	01 IDEAM	MUNICIPIO PUERTO BOYACA											
ELEVACION 0150 m.s.n.m		REGIONAL	10 TOLIMA	CORRIENTE MAGDALENA											
A#O	EST	ENT	ENERO *	FEBRE *	MARZO *	ABRIL *	MAYO *	JUNIO *	JULIO *	AGOST *	SEPTI *	OCTUB *	NOVIE *	DICIE *	VR ANUAL *
2009	1	01	78.6	173.9	258.8	124.7	273.5	179.2	69.8	321.3	224.6	308.4	202.4	67.5	2282.7
2010	1	01	.1	25.1	94.4	452.5	246.3	144.1	278.9	282.5	399.8	145.1	230.2	123.9	2422.9
MEDIOS			39.4	99.5	176.6	288.6	259.9	161.7	174.4	301.9	312.2	226.8	216.3	95.7	2352.8
MAXIMOS			78.6	173.9	258.8	452.5	273.5	179.2	278.9	321.3	399.8	308.4	230.2	123.9	452.5
MINIMOS			0.1	25.1	94.4	124.7	246.3	144.1	69.8	282.5	224.6	145.1	202.4	67.5	0.1

EST = ESTADO DE LA INFORMACION

1 : Preliminares Ideam
2 : Definitivos Ideam
3 : Preliminares Otra Entidad
4 : Definitivos Otra Entidad

** C O N V E N C I O N E S **

** AUSENCIAS DE DATO **

1 : Ausencia del observ
2 : Desperfecto instru.
3 : Ausencia instrument
4 : Dato rechazado
6 : Nivel superior
7 : Nivel inferior
8 : Curva de gastos
9 : Seccion inestable
A : Instr. sedimentado
M : Maximo no extrapol.
* : Datos insuficientes

** ORIGENES DE DATO **

1 : Registrados
3 : Incompletos
4 : Dudosos
6 : Est. Regresion
7 : Est. Interpolacion
8 : Est. Otros metodos
9 : Generados (Series)

5. RESULTADOS LABORATORIO AGUAS VASCONIA

AGUAS SUBTERRÁNEAS PLANTAS VASCONIA I Y II	IDENTIFIC. MUESTRA	PM-1 UBICADO FRENTE A LA SALIDA DEL SEPARADOR API VASCONIA I	PM-2 UBICADO FRENTE AL TANQUE TK-603	PM-3 UBICADO FRENTE AL TANQUE TC-701	PM-4 UBICADO FRENTE AL TANQUE TK-703	PM-5 UBICADO FRENTE A LA ENTRADA DEL SEPARADOR API VASCONIA II	PM 7 UBICADO DETRAS DE LAS OFICINAS DE TÉCNICOS	DECRETO 1594/84 ART. 38	Alberta Risk Management guidelines for Petroleum storage tank sites 2001. Table 4. GenericHydrocarbonCriteriafortheGroundwaterIngestionPathway
SUBMISSION: 100108442	Fecha de Muestreo	26-oct-10	26-oct-10	26-oct-10	26-oct-10	26-oct-10	26-oct-10		
Componente	Unidad	200633604	200633605	200633606	200633607	200633608	200633609		
ANÁLISIS IN SITU									
PROFUNDIDAD	m	3,41	3,35	1,49	4,17	3,71	2,04	NR	NR
OXIGENO DISUELTO	mg O2/L	2,5	2,1	0,0	1,6	0,6	1,3	NR	NR
PH / T (GR C)	Uni. pH	6.90/30.9	6.79/26.8	6.63/32.7	7.03/33.4	6.44/32.2	6.57/32.6	5.0-9.0	NR
TEMPERATURA AGUA	°C	30,9	26,8	32,7	33,4	32,2	32,6	NR	NR
ANÁLISIS DE LABORATORIO									
CONDUCTIVIDAD	uS/cm/°C	601/22.6	650/22.6	381/22.8	638/23.0	611/22.9	351/23.0	NR	NR
FENOLES	mg/L	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0,002	NR

GRASAS Y ACEITES	mg/L	1,18	1,27	<1.07	<1.07	<1.07	<1.07	No se acepta película visible	NR
HIDROCARBUROS NO POLARES	mg/L	<1.07	<1.07	<1.07	<1.07	<1.07	<1.07	NR	NR
SOLIDOS DISUELTOS	mg/L	367	407	204	441	418	246	NR	NR
ANÁLISIS DE BTEX									
BENCENO	µg/L	<2.76	<2.76	<2.76	<2.76	<2.76	<2.76	NR	5*
TOLUENO	µg/L	<2.23	<2.23	<2.23	<2.23	<2.23	<2.23	NR	24*
ETILBENCENO	µg/L	<1.82	<1.82	<1.82	<1.82	<1.82	<1.82	NR	2.4*
m+p-XILENO	µg/L	<1.85	<1.85	<1.85	<1.85	<1.85	<1.85	NR	300*
o-XILENO	µg/L	<2.30	<2.30	<2.30	<2.30	<2.30	<2.30	NR	
NR: No Reporta									
(*) Aun cuando la norma reporta las concentraciones en mg/L, se hace la conversión a µg/L debido a las bajas concentraciones de las muestras analizadas									

6. PRUEBAS SLUG ESTACION VASCONIA
PRUEBAS DE SLUG POZO DE MONITOREO No. 1
 TERMINAL PUERTO BOYACA

ANÁLISIS DE PRUEBAS DE SLUG METODO DE HVORSLEV PM1			
DATOS DE LA PRUEBA DE SLUG			PUNTOS AUXILIARES PARA ANÁLISIS
NE =	1,59		0
so =	4,71		300
rw =	0,06985	m	8,60E-01
rc =	0,0254	m	
b =	3	m	
			RESULTADOS
			pendiente= -2,18E-04
			Intercep = 1,00E+00
			To = 1,99E+03
			K (m/día) = 1,76E-02
t(seg)	s(m)	s/so	
0	4,71	1	
60	4,58	0,958	
120	4,57	0,955	
180	4,57	0,955	
240	4,57	0,955	
300	4,57	0,955	

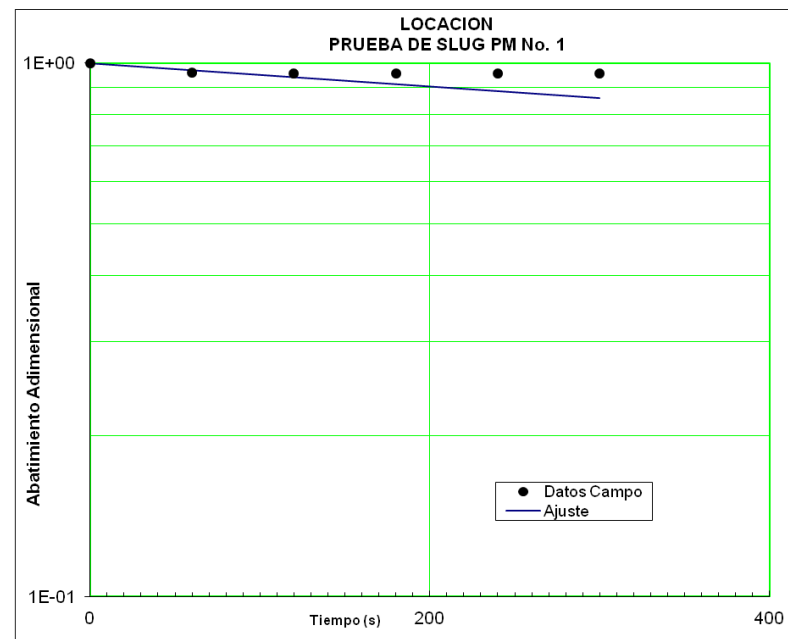
NE: Nivel estático

So: Nivel de abatimiento instantáneo

Rw: Radio de la zona filtrante (2")

Rc: Radio CASING (1")

b: longitud de filtro



PRUEBAS DE SLUG POZO DE MONITOREO No. 2

TERMINAL PUERTO BOYACA

ANALISIS DE PRUEBAS DE SLUG METODO DE HVORSLEV PM2			
DATOS DE LA PRUEBA DE SLUG		PUNTOS AUXILIARES PARA ANÁLISIS	
NE =	4,40	0 1,00E+00	
so =	4,53	400 2,00E-03	
rw =	0,06985 m	RESULTADOS pendiente= -6,75E-03 Intercep = 1,00E+00 To = 6,43E+01	
rc =	0,0254 m		
b =	3 m		
t(seg)	s(m)		s/so
0	4,53	1	K (m/día) = 5,43E-01
60	4,445	0,346	
120	4,419	0,146	
180	4,409	0,069	
240	4,402	0,015	
300	4,398	-0,015	
360	4	-0,038	
420	4,395	-0,038	
480	4,395	-0,038	
540	4,395	-0,038	
600	4,395	-0,038	

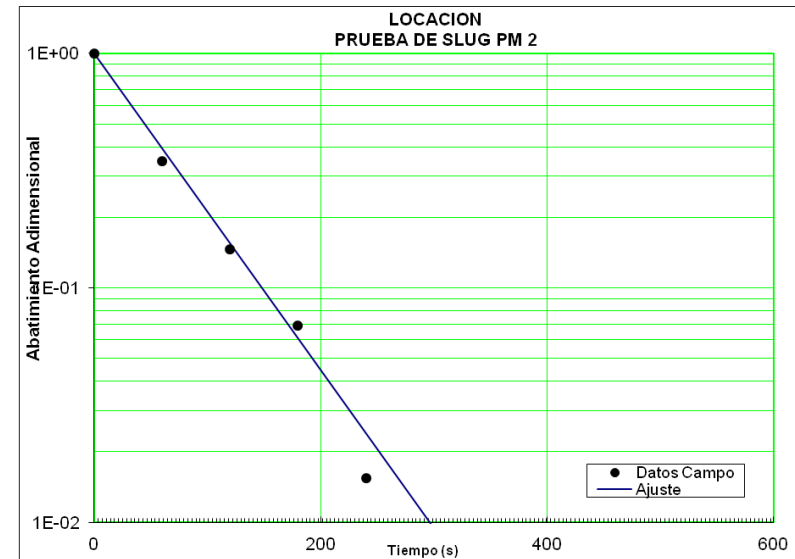
NE: Nivel estático

So: Nivel de abatimiento instantáneo

Rw: Radio de la zona filtrante (2")

Rc: Radio CASING (1")

b: longitud de filtro



PRUEBAS DE SLUG POZO DE MONITOREO No. 7

TERMINAL PUERTO BOYACA

ANÁLISIS DE PRUEBAS DE SLUG METODO DE HVORSLEV PM7		
DATOS DE LA PRUEBA DE SLUG		PUNTOS AUXILIARES PARA ANÁLISIS
NE =	3,15	0 1,00E+00
so =	4,485	3000 3,45E-01
rw =	0,06985 m	RESULTADOS pendiente= -1,54E-04 Intercep = 1,00E+00 To = 2,82E+03
rc =	0,0254 m	
b =	3 m	
K (m/día) = 1,24E-02		
t(seg)	s(m)	s/so
0	4,485	1
60	4,44	0,966
120	4,416	0,948
180	4,385	0,925
240	4,355	0,903
300	4,34	0,892
360	4,32	0,877
420	4,3	0,862
480	4,28	0,847
540	4,26	0,832
600	4,24	0,817
900	4,165	0,761
1200	4,1	0,712
1500	4,02	0,652
1800	3,98	0,623
2400	3,89	0,555
3000	3,82	0,503

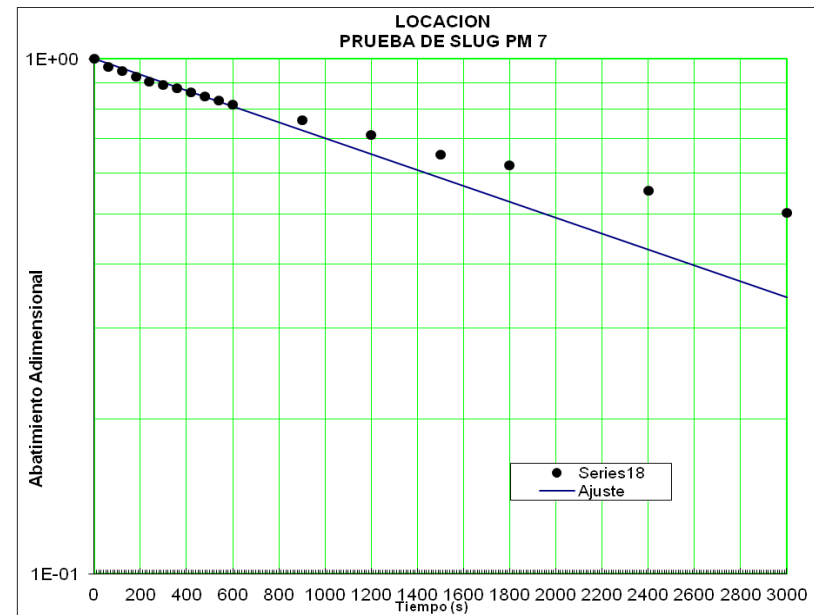
NE: Nivel estático

So: Nivel de abatimiento instantáneo

Rw: Radio de la zona filtrante (2")

Rc: Radio CASING (1")

b: longitud de filtro



PRUEBAS DE SLUG POZO DE MONITOREO No. 8

TERMINAL PUERTO BOYACA

ANALISIS DE PRUEBAS DE SLUG METODO DE HVORSLEV PM8			
DATOS DE LA PRUEBA DE SLUG			PUNTOS AUXILIARES PARA ANÁLISIS
NE =	4,84		0
so =	5,12		600
rw =	0,06985	m	
rc =	0,0254	m	
b =	3	m	
			RESULTADOS
			pendiente= -4,25E-03
			Intercep = 1,00E+00
			To = 1,02E+02
			K (m/día) = 3,42E-01
t(seg)	s(m)	s/so	
0	5,12	1	
60	4,995	0,554	
120	4,935	0,339	
180	4,89	0,179	
240	4,86	0,071	
300	4,847	0,025	
360	5	0,000	
420	4,835	-0,018	
480	4,835	-0,018	
540	4,835	-0,018	
600	4,835	-0,018	

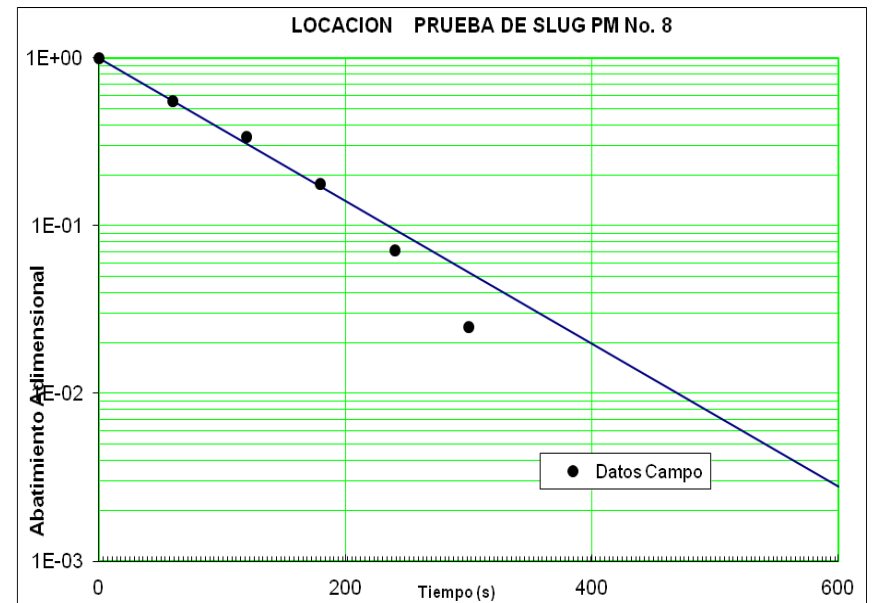
NE: Nivel estático

So: Nivel de abatimiento instantáneo

Rw: Radio de la zona filtrante (2")

Rc: Radio CASING (1")

b: longitud de filtro



PRUEBAS DE SLUG POZO DE MONITOREO No. 9

TERMINAL PUERTO BOYACA

ANALISIS DE PRUEBAS DE SLUG METODO DE HVORSLEV PM9			
DATOS DE LA PRUEBA DE SLUG			PUNTOS AUXILIARES PARA ANÁLISIS
NE =	5,39		0 1,00E+00
so =	5,68		1500 5,30E-01
rw =	0,06985	m	RESULTADOS pendiente= -1,84E-04 Intercep = 1,00E+00 To = 2,36E+03
rc =	0,0254	m	
b =	3	m	
t(seg)	s(m)	s/so	
0	5,68	1	
60	5,65	0,897	
120	5,65	0,897	
180	5,65	0,897	
240	5,646	0,883	
300	5,646	0,883	
360	5,645	0,879	
420	5,643	0,872	
480	5,643	0,872	
540	5,642	0,869	
600	5,642	0,869	
900	5,455	0,224	
1200	5,63	0,828	
1500	5,63	0,828	

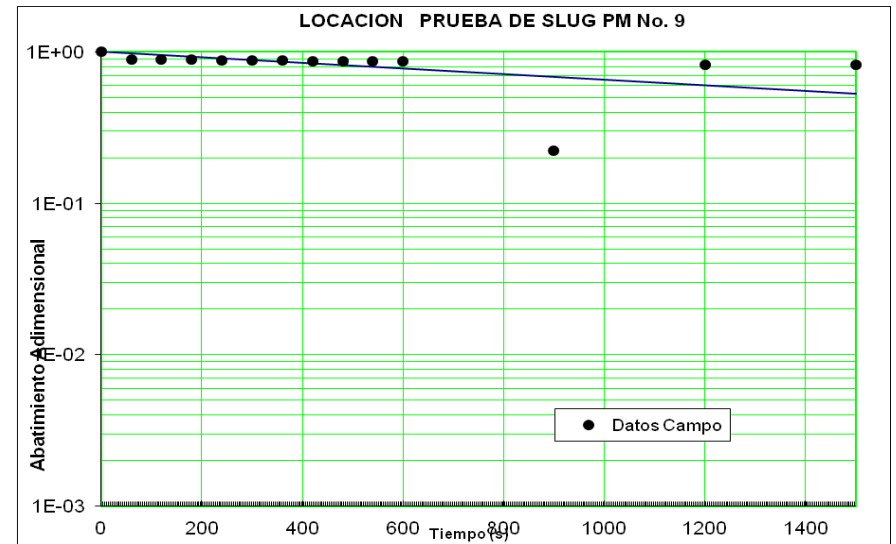
NE: Nivel estático

So: Nivel de abatimiento instantáneo

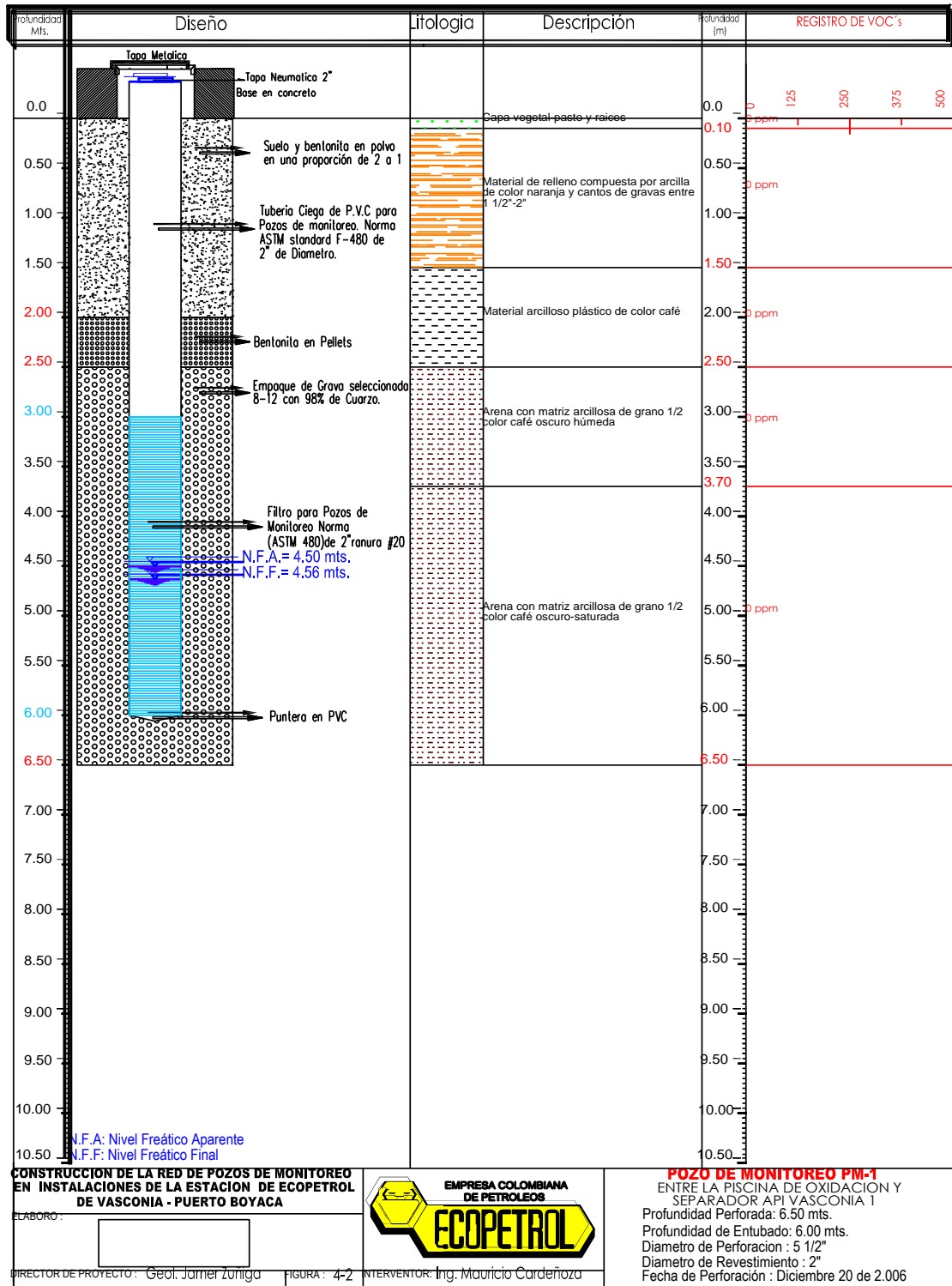
Rw: Radio de la zona filtrante (2")

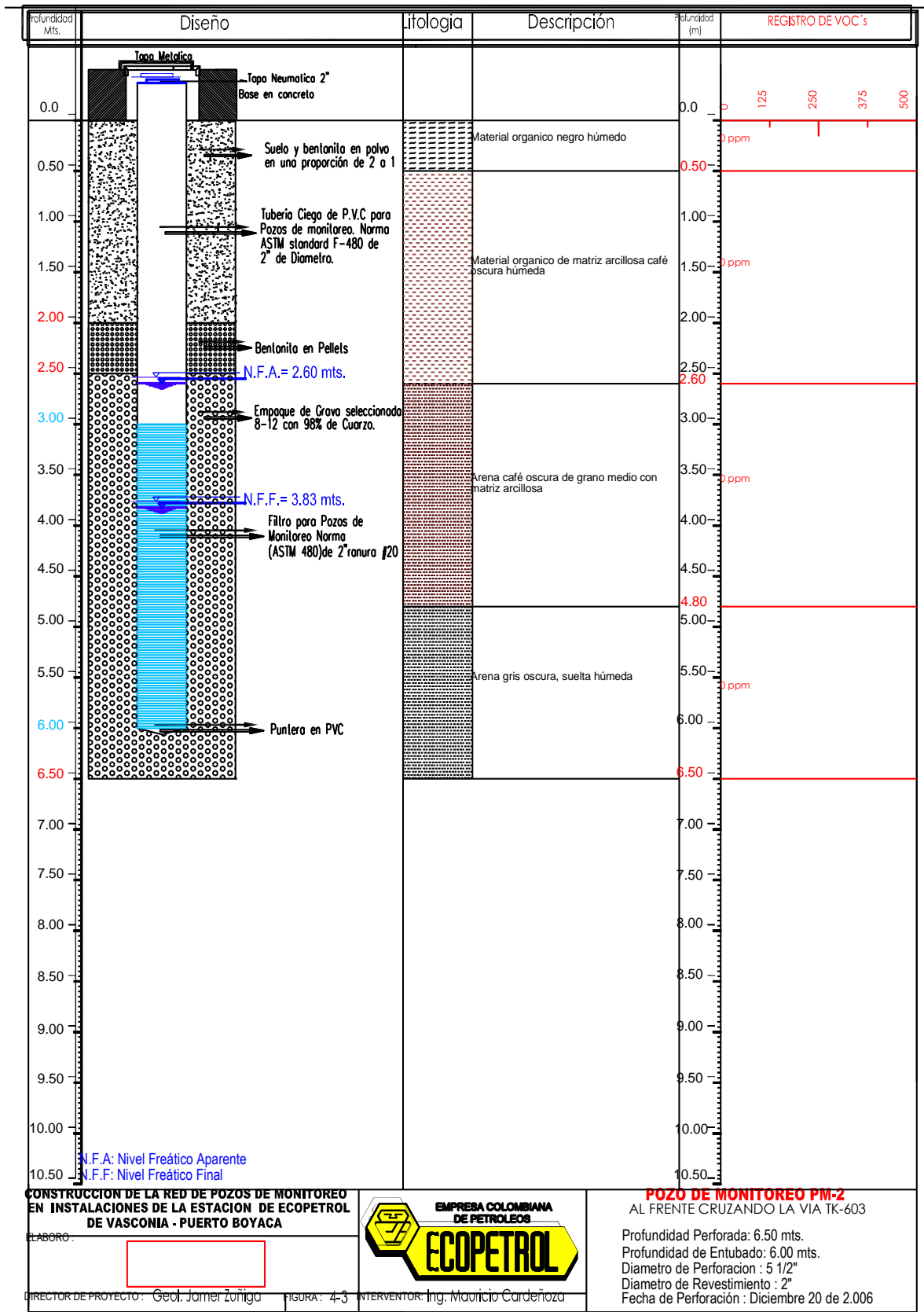
Rc: Radio CASING (1")

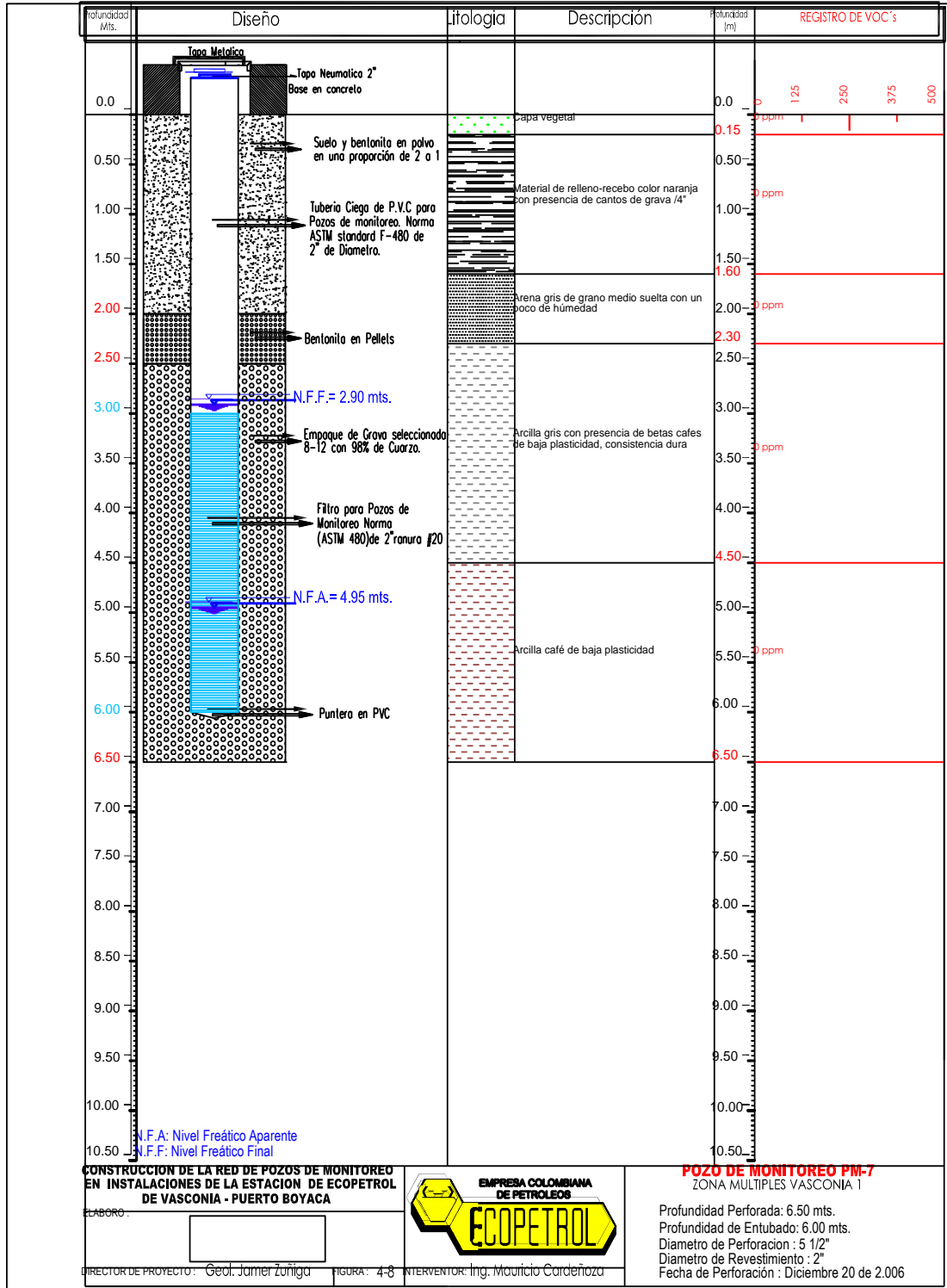
b: longitud de filtro



7. PERFILES LITOLÓGICOS PIEZOMETROS VASCONIA







DISEÑO DE POZOS DE MONITOREO

