

## Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le de crédito al documento y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

**BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA**  
UNIVERSIDAD DE LA SABANA  
Chía - Cundinamarca

**MODELADO PARA LA UBICACIÓN DE LOS LABORATORIOS SATÉLITES EN  
CAMPO RUBIALES –META COLOMBIA- POR PARTE DE PACIFIC RUBIALES  
ENERGY**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de

**Magister en Gerencia de Operaciones**  
(Modalidad de Profundización)

**LORENA ROJAS WULKOP**

Director:  
Ing. Carlos Alberto Vega, M.Sc.

Presentado públicamente el día 26 de Enero 2015

Jurado:  
Eliana María González Neira, Universidad La Javeriana  
Jairo Montoya, Universidad La Sabana

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA  
ESCUELA INTERNACIONAL DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y  
ADMINISTRATIVAS  
MAESTRÍA EN GERENCIA DE OPERACIONES  
Chía, 26 de Enero de 2015.**

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	6
2. ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
<b>2.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA</b> .....	7
<b>2.2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	13
<b>2.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	21
<b>2.4 JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE DEL PROBLEMA</b> .....	21
<b>2.5 TIPO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	22
3. 0 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN .....	23
<b>3.1. OBJETIVO GENERAL</b> .....	23
<b>3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	23
4.0 METODOLOGÍA .....	23
<b>4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE LABORATORIO</b> .....	24
<b>4.1.1. PROYECCIÓN DE CRECIMIENTO</b> .....	24
<b>4.1.2 COSTOS</b> .....	30
<b>4.2. MODELAMIENTO MATEMÁTICO</b> .....	30
<b>4.2.1 SUPUESTOS DEL MODELO MATEMÁTICO</b> .....	30
<b>4.2.2. DEFINICIÓN Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS</b> .....	31
<b>4.2.3. MODELO</b> .....	32
<b>4.3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN</b> .....	34
5.0 RESULTADOS .....	36
<b>5.1. ESCENARIOS</b> .....	37
<b>5.1.1 ESCENARIO 85%</b> .....	40
<b>5.1.2 ESCENARIO 90%</b> .....	45
<b>5.1.3 ESCENARIO 95%</b> .....	50
<b>5.1.4 ESCENARIO 100%</b> .....	55
6.0. POLÍTICAS DE APLICACIÓN .....	61
7.0 CONCLUSIONES .....	62
8.0 LINEAS DE TRABAJO FUTURO .....	63

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> FLUJO DE INFORMACIÓN	7
<b>Figura 2.</b> MAPA CAMPOS RUBIALES Y QUIFA-PACIFIC RUBIALES ENERGY	10
<b>Figura 3.</b> MAPA CAMPO RUBIALES-PACIFIC RUBIALES ENERGY	11
<b>Figura 4.</b> DISTRIBUCIÓN DE PRODUCCIÓN	28
<b>Figura 5.</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA UBICACIÓN DE LOS LABORATORIOS OBTENIDOS SEGÚN MODELO MATEMÁTICO Y ESCENARIOS	38

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> UBICACIÓN LABORATORIOS	9
<b>Tabla 2.</b> REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PARA DESARROLLO DE EVALUACIÓN DE PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	17
<b>Tabla 3.</b> REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PARA DESARROLLO DE EVALUACIÓN DE PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN-REWIES	19
<b>Tabla 4.</b> PROGRAMA DE DESARROLLO DE APERTURA DE POZOS DE CAMPOS RUBIALES 2013	24
<b>Tabla 5.</b> PROGRAMA DE CRECIMIENTO INICIAL 2012-2013	24
<b>Tabla 6.</b> POZOS EXISTENTES PARA 2012 Y 2013	25
<b>Tabla 7.</b> CAMPAÑA DE APERTURA DE POZOS 2012-2015	25
<b>Tabla 8.</b> PROYECCION DE PRODUCCIÓN 2012-2015	27
<b>Tabla 9.</b> RESUMEN DISTRIBUCION DE PRODUCCIÓN POR CUADRANTES	27
<b>Tabla 10.</b> RESULTADOS NEOS-DATOS ESTADÍSTICOS	35
<b>Tabla 11.</b> RESULTADOS DE DISTANCIAS OBTENIDAS ASI COMO LABORATORIOS TOTALES ADICIONALES POR ESCENARIO	36
<b>Tabla 12.</b> RESEUMEN DE LABORATORIOS IDENTIFICADOS POR ESCENEARIO EN EL TIEMPO	37
<b>Tabla 13.</b> ESCENARIO 85% DE DEMANDA Análisis entre posición 6 a cuadrante j de laboratorio 2 en tiempo t (xijkt)	39
<b>Tabla 14.</b> ESCENARIO 85% DE DEMANDA Análisis entre posición 6 a cuadrante j de laboratorio 3 en tiempo t (xijkt)	40
<b>Tabla 15.</b> ESCENARIO 85% DE DEMANDA Análisis entre posición 7 a cuadrante j de laboratorio 4 en tiempo t (xijkt)	41
<b>Tabla 16.</b> ESCENARIO 85% DE DEMANDA Análisis entre posición 11 a cuadrante j de laboratorio 5 en tiempo t (xijkt)	42
<b>Tabla 17.</b> ESCENARIO 90% DE DEMANDA Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 1 en tiempo t (xijkt)	44

<b>Tabla 18. ESCENARIO 90% DE DEMANDA</b>	<b>45</b>
Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 3 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 19. ESCENARIO 90% DE DEMANDA</b>	<b>46</b>
Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 3 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 20. ESCENARIO 90% DE DEMANDA</b>	<b>47</b>
Análisis de posición 11 a cuadrante j de laboratorio 5 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 21. ESCENARIO 90% DE DEMANDA</b>	<b>48</b>
Laboratorios adicionales en el tiempo (uit)	
<b>Tabla 22. ESCENARIO 95% DE DEMANDA</b>	<b>49</b>
Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 2 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 23. ESCENARIO 95% DE DEMANDA</b>	<b>50</b>
Análisis de posición 10 a cuadrante j de laboratorio 2 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 24. ESCENARIO 95% DE DEMANDA</b>	<b>51</b>
Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 3 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 25. ESCENARIO 95% DE DEMANDA</b>	<b>52</b>
Análisis de posición 7 a cuadrante j de laboratorio 4 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 26. ESCENARIO 95% DE DEMANDA</b>	<b>53</b>
Análisis de posición 11 a cuadrante j de laboratorio 5 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 27. ESCENARIO 100% DE DEMANDA</b>	<b>54</b>
Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 1 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 28. ESCENARIO 100% DE DEMANDA</b>	<b>55</b>
Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 2 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 29. ESCENARIO 100% DE DEMANDA</b>	<b>56</b>
Análisis de posición 10 a cuadrante j de laboratorio 2 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 30. ESCENARIO 100% DE DEMANDA</b>	<b>57</b>
Análisis de posición 7 a cuadrante j de laboratorio 4 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 31. ESCENARIO 100% DE DEMANDA</b>	<b>58</b>
Análisis de posición 11 a cuadrante j de laboratorio 5 en tiempo t (xijkt)	
<b>Tabla 32. ESCENARIO 100% DE DEMANDA</b>	<b>59</b>
Laboratorios adicionales en el tiempo (uit)	

## 1. INTRODUCCIÓN

Pacific Rubiales Energy es la primera empresa petrolera independiente en Colombia operadora del mayor Campo Petrolero en extensión y producción. Dentro de la organización interna de la empresa, uno de los departamentos de apoyo es el de Tratamiento Químico y Laboratorio, que está encargado del manejo y operación de los laboratorios satélites, los cuales están localizados por la extensión del Campo cumpliendo funciones de análisis de cabeza de pozo o como comúnmente se le conoce en la industria %BS&W (%Bottom Sediment and Water).

En este sentido, la ubicación del laboratorio satélite debe ser óptima para maximizar su capacidad instalada de análisis y obtener el mayor número de resultados posible por pozo. Basándose en lo anterior, la empresa está interesada en modelos que permitan ubicar los laboratorios satélites en la mejor locación posible sin necesidad de incrementar el número de ellos, lo que implica un costo adicional a la operación, sin mencionar las restricciones que deben ser consideradas teniendo en cuenta las condiciones de campo.

Al respecto, los problemas de localización o ubicación son hoy día muy importantes en la logística de las compañías de toda índole. Estos problemas parten de la necesidad de encontrar el sitio más conveniente para ubicar instalaciones como: una planta de producción, un centro de distribución, un vertedero de basuras, estaciones de policía, e inclusive una tienda. Dependiendo de la instalación que se quiera ubicar, se considerarán diferentes variables y objetivos. Durante muchos años se han estudiado este tipo de problemas, tanto desde el punto de vista teórico, buscando una solución eficiente; como desde la práctica analizando aplicaciones concretas para los sectores productivos público y privado.

Los modelos básicos más nombrados en la literatura de localización son citados por Current et al. (2002), donde el objetivo principal de todos los modelos es localizar nuevas instalaciones para optimizar algún objetivo particular. El fin perseguido en problemas sobre ubicación de facilidades, es la selección del lugar óptimo que permitirá obtener los insumos y recursos necesarios para ejecutar los procesos de fabricación y entregar el producto a los clientes de la forma más eficaz con el costo total más bajo posible.

A continuación se desarrollará el problema en cuestión, el trabajo está enfocado a exponer los antecedentes así como situación actual del problema. Se presenta el trabajo de investigación planteando los objetivos, las variables involucradas y finalmente se expondrá el modelo utilizado, los resultados obtenidos y las conclusiones del trabajo.

## 2. ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 2.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA

PACIFIC RUBIALES ENERGY es la empresa más grande del sector petrolero a nivel privado, a nivel productivo nacional, es la primera empresa productora de petróleo en Colombia, su actividad principal en el territorio colombiano es la producción de crudo y gas.

Dentro de los departamentos de la Gerencia de Operaciones, se encuentra el departamento de Tratamiento Químico y Laboratorio, el cual es administrado desde su sede principal en Bogotá, mientras sus operaciones están ubicadas en los distintos campos a su cargo, para este trabajo en particular se centrará la atención en Campo Rubiales.

Las operaciones de campo están centralizadas en instalaciones de producción, como lo indican sus siglas en inglés CPF (*Central Processing Facilities*). En ellas se realizan trabajos de tratamiento químico para la deshidratación de crudo y tratamiento químico de agua para disposición como vertimiento y/o inyección, según lo indiquen las licencias ambientales asignadas a cada campo.

Dentro de cada uno de estos CPF's se cuenta con un laboratorio de investigación, enfocado a optimización del tratamiento químico de ambos fluidos, así como apoyo a otras áreas de investigación y monitoreo. Es en estos laboratorios donde se centran las actividades de análisis de %BS&W como se menciona en la introducción del trabajo.

Los análisis de %BS&W son el primer dato registrado y emitido en el día, y el más relevante para la operación, éste representa la producción de un pozo en un momento dado, y su compilado permite conocer estadísticamente la producción diaria; es decir, la sumatoria de este dato a nivel de campo, considerando todos los pozos activos en el momento de cuantificación, representa la producción total diaria.

El %BS&W representa la cantidad de agua que contiene un pozo al momento de producción en un volumen total de fluido; por ende, a través de este dato se puede cuantificar cuánto volumen de crudo presenta cada pozo en campo en un momento específico del día. Ha de recalarse que este dato no se mantiene estable en el tiempo, por ende se requiere de un compilado suficiente de datos para analizar el comportamiento del pozo así como su aporte a la producción diaria. En consecuencia, debe ser monitoreado idealmente cada 3 ó 4 horas según los recursos disponibles, así como el estado que presente el pozo, es decir, el mismo puede estar en estado de arranque, tras workover (trabajos especiales ejecutados a un pozo para reactivar su actividad productiva), maduro (producción estable sin previsión de aumento de frecuencia a nivel de bomba), en monitoreo por incremento de frecuencia y tras trabajos de estimulación. Este estado definirá la frecuencia de

monitoreo de cada pozo, según el criterio del ingeniero de Campo y Optimización que se encuentre en turno.

El %BS&W es un dato que se analiza en los laboratorios de campo, sean satélites o fijos en facilidad de producción. El dato final emitido es un conjunto de validaciones, revisiones y correcciones previas de distintas áreas involucradas. En la Figura 1 se presenta un bosquejo del flujo de información entre los distintos involucrados en el proceso:

**Figura 1. FLUJO DE INFORMACIÓN**



Una vez el Coordinador de Laboratorio ha validado los datos, el Ingeniero de Optimización recibe los datos para cálculo de producción y revisión de datos según historial, posteriormente solicita mantener o aumentar frecuencia de monitoreo.

Cada laboratorio cuenta con un número de staff establecido así como una capacidad instalada de análisis. El crecimiento de campo se traduce en mayor número de pozos asociados a la actividad de producción petrolera, implicando un aumento considerable en el número de análisis respectivos por pozo, superando la capacidad de los laboratorios sedes a nivel de número de análisis. Debido a lo que está pasando actualmente, se ha recurrido a laboratorios satélites móviles para el análisis de %BS&W, ubicados en distintos puntos del campo, aquí yace el problema en mano, la ubicación de laboratorios satélites que soporten la actividad diaria que los laboratorios sedes no pueden asumir.

Actualmente PACIFIC RUBIALES ENERGY se encuentra en sociedad con la estatal ECOPETROL la cual controla el 55% de acciones sobre el campo, más el operador actual es PRE (Pacific Rubiales Energy). La cesión de estos derechos operativos está fijada por contrato hasta JUNIO 2016, por ende, la sociedad no se encuentra autorizando aumentos presupuestales hasta que el operador salga de campo ya que su estrategia así lo prevé, es por este motivo específico, que el departamento de Tratamiento Químico y Laboratorio cuenta con recursos limitados (presupuesto) que no le permiten incrementar el número de laboratorios satélites. En consecuencia, es necesario que los recursos disponibles actualmente con una capacidad instalada de análisis finita se maximicen a través de ubicaciones óptimas que reduzcan las distancias entre puntos de interés, entiéndase, puntos de muestreo versus ubicaciones de análisis garantizando la demanda del campo y sin incrementar el número de laboratorios satélites que pudiesen ser considerados como necesarios.

Por otro lado, PACIFIC RUBIALES ENERGY cuenta con dos (2) grandes Campos de explotación: Rubiales y Quifa, los cuales están localizados en la jurisdicción del municipio de Puerto Gaitán, ubicado a 171 kilómetros del casco urbano de este Municipio, en el departamento del Meta. También cuenta con campos adyacentes, aunque son de menor producción y extensión.

Como se puede observar en el mapa (Figura 2), se evidencian los distintos campos en el área, los dos campos previamente mencionados son Campo Quifa y Campo Rubiales, el cual puede ser identificado dentro de la Fig.2 ya que tiene forma de corazón, mientras que Campo Quifa es aquel que rodea a Campo Rubiales. Los pozos asociados a la producción del mismo están etiquetados como RB. En el mapa se pueden identificar los espacios destinados para los sistemas de inyección de agua o pad's de inyección, así como los CPF's que se encuentran remarcadas en verde, las líneas rojas demarcan las troncales de producción.

Actualmente Campo Rubiales cuenta con tres (3) laboratorios satélites y dos (2) laboratorios sedes (estos son los mismos CPF's). Los laboratorios sedes se refieren a infraestructuras fijas dentro de las facilidades de producción donde no sólo se realizan análisis de %BS&W, sino análisis referente al área de tratamiento e investigación. Por esta razón no son móviles como los satélites; mientras que los laboratorios satélites son laboratorios acondicionados dentro de contenedores aptos para análisis de laboratorios y cuentan con facilidades de servicios de apoyo móviles justamente en caso de requerirse su reubicación. Los laboratorios son:

1. Laboratorio BATERÍA 3
2. Laboratorio CLUSTER 128
3. Laboratorio CLUSTER 218
4. CPF1 (*Central Production Facility 1*)
5. CPF2 (*Central Production Facility 2*)

En la Figura 3 se presenta el mapa de Campo Rubiales en detalle incluyendo las ubicaciones de los laboratorios satélites dentro de los campos y con respectivas

coordenadas obtenidas a partir del software “WELL LOCATOR” desarrollado por el personal de producción de PACIFIC RUBIALES ENERGY, basado en un sistema de Información Geográfica, las coordenadas de interés de muestran en la Tabla 1 a continuación.

**Tabla 1. UBICACIÓN LABORATORIOS**

<b>LABORATORIO SATELITE</b>	<b>COORDX</b>	<b>COORDY</b>
BATERÍA 3	962,885.8	911,051.0
CLUSTER 218	953,124.0	909,055.0
POZO 128	951,017.5	911,567.5
CPF1	960,048.9	912,906.6
CPF2	959,234.9	909,943.0

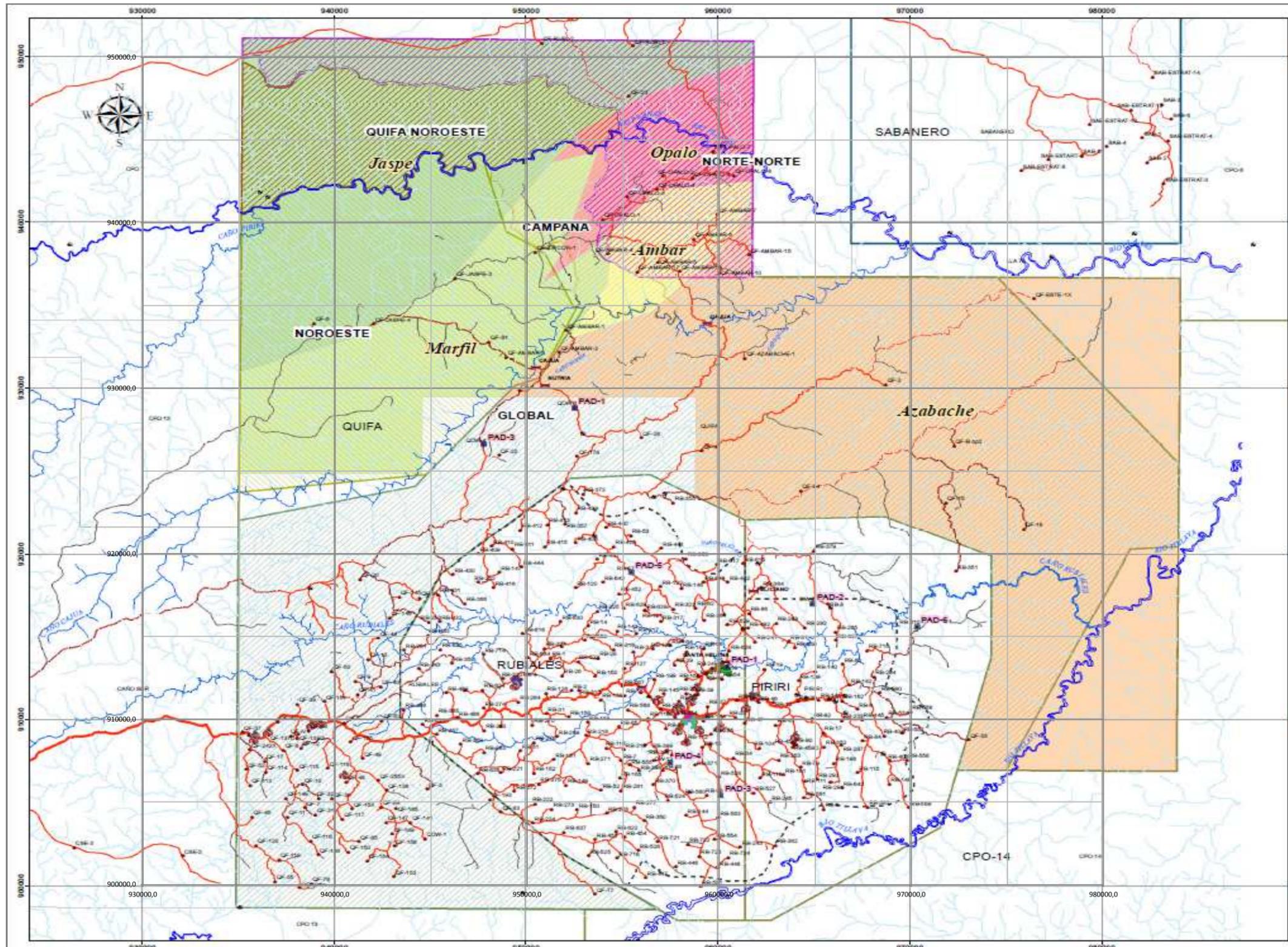
Fuente: Programa WELL LOCATOR Dpto. Produccion 2014

Se ha calculado que cada laboratorio satélite está en capacidad de analizar 200 muestras por turno; mientras que los laboratorios sedes (fijos), 300 muestras. Este número de muestras se logra únicamente cuando el personal de logística cumple con los horarios determinados.

La ubicación inicial de estos laboratorios satélites ha sido por conveniencia de locación y rutas establecidas por recursos disponibles, debido a que Campo Rubiales presenta limitaciones constructivas a partir de la licencia ambiental que ampara a la empresa, así como espacios físicos que puedan ser intervenidos. Los dos (2) laboratorios sedes se encuentran ubicados dentro de las facilidades de producción, las cuales están amparadas por la licencia ambiental de Campo Rubiales, mientras que los tres (3) satélites están ubicados en clusters de producción.

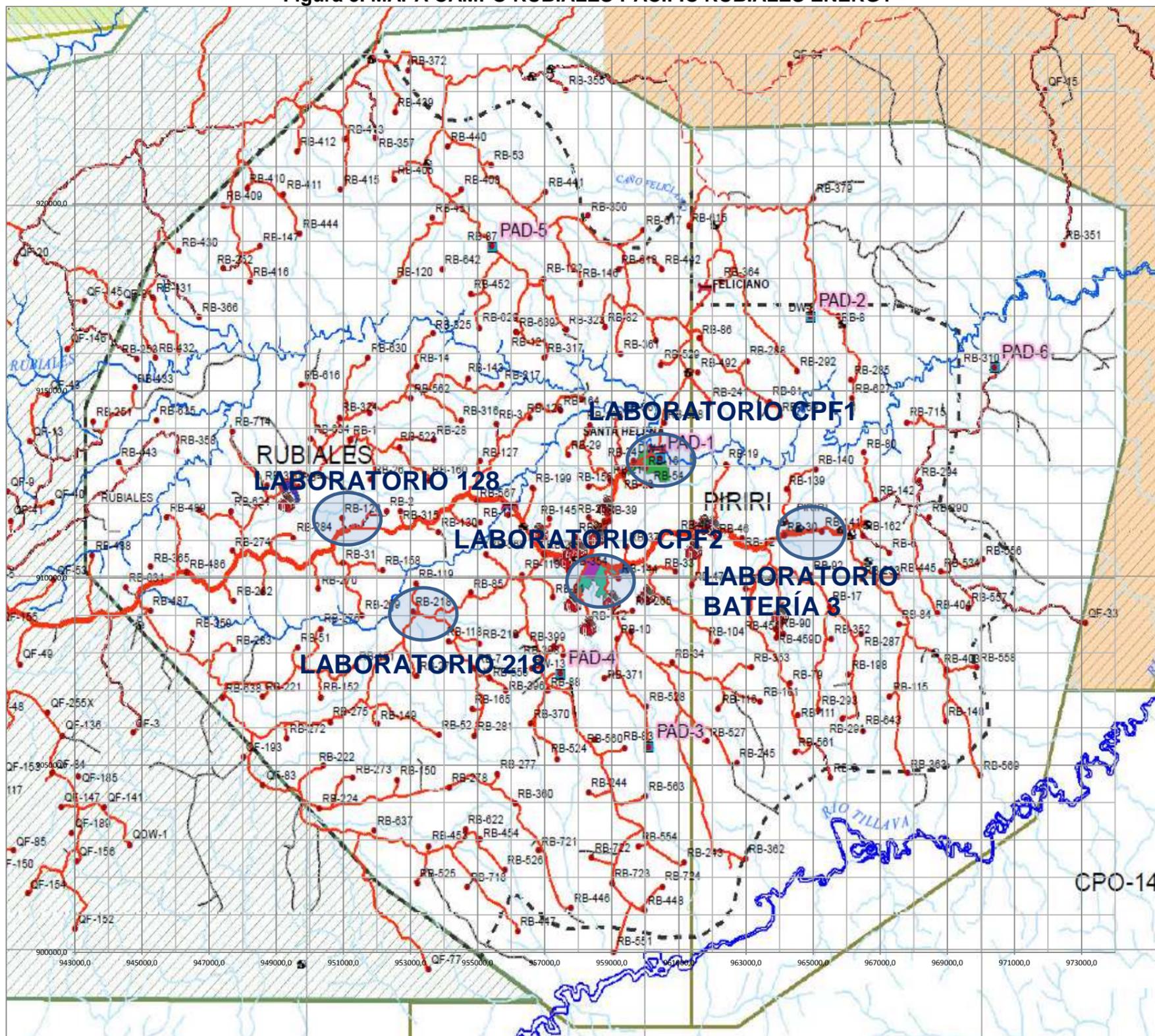
Lo anterior, refleja la necesidad de plantear un modelo que logre optimizar los recursos con los que se cuentan y optimizar las distancias de recorrido y análisis de laboratorio.

Figura 2. MAPA CAMPOS RUBIALES Y QUIFA-PACIFIC RUBIALES ENERGY



Fuente: Programa WELL LOCATOR Dpto. Produccion 2014

Figura 3. MAPA CAMPO RUBIALES-PACIFIC RUBIALES ENERGY



Fuente: Programa WELL LOCATOR Dpto. Produccion 2014

## 2.2. REVISIÓN DE LITERATURA

Debido a la problemática previamente expuesta, se entiende que se requiere de una metodología de análisis y resolución para problemas asociados a la ubicación de laboratorios satélites con el fin de optimizar los recursos disponibles. Es por esta razón que la revisión literaria estará enfocada a problemas de locación de instalaciones (*facilities*) que puedan ser extrapolados a la situación actual de la corporación, considerando las premisas operativas actuales, así como la revisión de los trabajos relacionados con el área de petróleo a nivel de *Supply Chain* (SC) (cadena de abastecimiento).

Un modelo de localización tiene cuatro características básicas: (i) los clientes que se encuentran localizados en puntos o rutas dependiendo del caso, (ii) instalaciones que deben ser localizadas, (iii) un espacio en el que los clientes y las instalaciones deben ser localizadas, y (iv) una métrica que indique las distancias, costos o tiempos entre los clientes y las instalaciones (ReVelle & Eiselt, 2005).

La revisión realizada por Zanjirani et al. (2012), expone que en el siglo XX, más precisamente a partir de la década de los años 1970, diferentes variaciones de los problemas de localización han sido estudiados. Algunos ejemplos son la localización de: centros regionales de salud (Albernathy & Hershey, 1972), paraderos de bus (Gleason, 1975), localización de centros de emergencia (Moore & ReVelle, 1982), plantas de generación de energía eléctrica (Cohon et al., 1980), terminales de camiones (Birge & Malyszko, 1985), servicios aéreos (Flynn & Ratick, 1988), órbitas satelitales (Dezner, 1988), pluviómetros (Hogan, 1990), estaciones de inspección de vehículos (Hodgson et al., 1996), plantas de manufactura de procesadores (Cho & Sarrafzadeh, 1994), parqueaderos de vagones de carga (Higgins et al., 1977) (Current et al., 2002).

Por su parte, Hakimi (1964), Schilling (1993), Current et al. (2002) y Penagos & Castro (2009) definieron diversos modelos básicos de localización, los cuales se explican a continuación brevemente:

Problemas de cobertura (Set-Covering). El objetivo principal de este grupo de problemas es el de cubrir una demanda de forma total o parcial. En muchos casos, la distancia o tiempo de respuesta entre los clientes y los puntos que prestan los servicios, es decisiva para la satisfacción del cliente.

Problemas de Centro (P-center) (Castro, 2009). En estos modelos el parámetro de cobertura que se usa es hallado de forma endógena (en los anteriores era una variable que entraba al problema, exógena). Este problema tiene como parámetro de entrada el número de instalaciones que se quieren instalar, y se pide al modelo que minimice la distancia más grande entre una instalación y el nodo de demanda más alejado que le sea asignado.

Problemas de Dispersión (P-dispersion). Lo que el modelo busca es maximizar el mínimo de las distancias.

Problemas de Media (P-median). En este caso se da un giro en la concepción del modelo centrándose en la minimización de los costos. En muchos casos el costo de cubrir la demanda es directamente proporcional a la distancia de las instalaciones, pero en muchos casos no existe una relación lineal, creciendo de forma cóncava o convexa.

Por otro lado, existen otros modelos de localización que son conocidos como localización de planta (*Facility Location Problem*, FLP). Estos se caracterizan por los siguientes aspectos: (i) el número de instalaciones a ser situadas; (ii) si las instalaciones están capacitadas; es decir, presentan máximos de producción o máximo servicio a prestar; (iii) si la instalación puede ser ubicada en cualquier espacio disponible o está reducida a un conjunto de locaciones; (iv) si los parámetros del problema son de naturaleza determinística o estocástica; y (v) si el modelo es de naturaleza estática o dinámica.(Current et al., 1990)

La mayoría de los artículos estudiados y consultados para el tema de ubicación de instalaciones agrupan cuatro (4) objetivos: minimización de costos (Haugland, 1991; Subhash, 2012) que incluye minimización de distancias (Contrerasa, 2001); en segundo lugar, cobertura de demandas y asignación respectiva (Chen L., et al., 2014; en tercer lugar, maximización de ganancias (Rentizelas & Patsiopoulos (2010)) y finalmente temas ambientales). Bolori & Zanjirani Farahani (2012) y Zanjirani Farahani et al. (2012) presentaron reviews donde se especifican problemas de cobertura así como modelos dinámicos de FLP, sus clasificaciones y aplicaciones.

En relación al problema de PACIFIC RUBIALES ENERGY, se analizaron los estudios presentados en las tablas 2 y 3 a continuación. La mayoría de estos artículos están enfocados en problemas de ubicación de plantas pero con el enfoque de distribuciones móviles, aspecto primordial para el trabajo en cuestión, así como estudios y revisiones de trabajos enfocados en el área de petróleo, como el trabajo presentado por Haugland (1991) enfocado en el diseño de plataformas móviles para optimización de la extracción de crudo a través de información de yacimiento en un período de tiempo.

Haugland (1991) desarrolló un modelo entero mixto para evaluaciones preliminares en el mar del norte de Noruega. El estudio se remite a datos de producción, programación o campaña de perforación, capacidad de las plataformas de perforación incluyendo modelos de simulación para extrapolar reservorios extraíbles. En este caso, Haugland (1991) incluye restricciones de costos asociadas al modelo que implican la viabilidad económica bajo la premisa de maximización de producción para determinar la movilización o no de las plataformas con limitación en períodos de tiempo.

Uno de los trabajos que presenta similitud en el manejo de instalaciones en continuo movimiento es el trabajo de Durukan (1990) el cual se centra en problemas asociados con incertidumbre de facilidades futuras para localización. Este estudio considera la incertidumbre de ubicación final por crecimiento de demanda de análisis en distintas áreas del campo.

En el artículo en cuestión se discuten dos (2) retos a largo plazo: (i) cambios de demanda en el tiempo; y (ii) la incertidumbre de ubicación de nuevas instalaciones que surgen a partir del aumento de demanda. Se introduce un modelo matemático el cual tiene como objetivo minimizar la distancia de viaje de los clientes entre el punto inicial y punto destino en comparación con una distancia teórica de referencia. El modelo que presenta permite la reubicación para los instantes futuros cerrando alguna de las instalaciones que fueron ubicadas inicialmente y abriendo nuevas consecutivamente, sin exceder un presupuesto previamente aprobado y delimitado. Asimismo, Canel (2005) centra su investigación en un problema multi-período similar al expuesto para este estudio.

El sistema a ser evaluado es multi-objetivo, con carácter multi-período, ya que se pretende ubicar un óptimo de ubicación de los laboratorios satélites, a partir de una reducción de distancias entre los puntos de recolección y los puntos de análisis, ligado a la demanda actual del Campo y su evolución con el tiempo. Según la literatura, este tipo de problemas enfocados en la demanda están agrupados en tres categorías: cobertura, asignación de demanda y medida de demanda (Current, 1990).

Al respecto de estudios que consideran demanda a través de múltiples períodos de tiempo, Shapiro (2004) realiza una revisión asociada a la cadena de abastecimiento con modelos de optimización estratégicos, indicando los nuevos desafíos alrededor del tema de cadena de abastecimiento, mientras que Papageorgiou (2009) presenta una visión global del tema. Algunas de sus conclusiones son (i) el tema de demandas inciertas requiere de mayor flexibilización en los modelos al ingresar aspectos con grados de incertidumbre, (ii) problemas de dos etapas son utilizados por la mayoría de los modelos estocásticos existentes, mientras que para formar un modelo de cadena de abastecimiento adecuado es requerido de un modelo multi-períodos, (iii) la solución numérica de problemas a gran escala en especial para problemas multi-períodos requiere de mayor investigación a la que se encuentra actualmente disponible, y (iv) actualmente se están considerando aspectos ambientales dentro de los modelos de cadena de abastecimiento por su relevancia en el tema.

Melo et al. (2009) también revisa la literatura reciente sobre la ubicación de las instalaciones (*facility location*), lo cual es un problema estratégico popular dentro del contexto de la gestión de la cadena de suministro. Se discuten características que debe tener un modelo de ubicación de instalaciones para ilustrar con eficacia las necesidades de diseño de la cadena de abastecimiento. Se centran en la relación entre la ubicación de las instalaciones y SCM, las características de los modelos de programación matemática, y los métodos de solución, así como aplicaciones. Se

llega a la conclusión de que algunas líneas de investigación aún requieren más atención en las investigaciones futuras como estocasticidad en SCM.

Los primeros estudios sobre el nivel operacional de la cadena de suministro de combustible se registraron en la década de 1960. Aronofsky & Williams (1962) desarrollaron un modelo multi-períodos, de programación lineal para prescribir la producción de pozos de petróleo. Ellos desarrollaron dos modelos: uno planifica la rata de producción ya sea de sistemas sencillos o múltiples, el otro, a través de la perforación y operación de taladro. Las variables de decisión en el primer modelo se derivan de las tasas de producción de los pozos de petróleo y las respectivas al segundo modelo, prescribirá el número de pozos perforados por completo, el número de las plataformas compradas, y el número de equipos de perforación en operación. Este enfoque está destinado a la producción de pozos para una posterior distribución de la misma en el menor tiempo posible.

Con respecto a estudios relacionados al área de petróleo se encontró el realizado por Heungjo et al. (2011). En este trabajo se explica que la base de la cadena de abastecimiento en el área de crudo así como biocombustible y se centra en (3) componentes mayores a nivel de operaciones, aguas arriba (upstream), midstream y aguas abajo (downstream). Aguas arriba, se refiere al origen de la producción de crudo, así como el transporte hacia puntos de entrega y refinación, midstream se refiere al proceso donde ocurre el refinamiento del crudo y aguas abajo describe el proceso de almacenamiento, distribución y comercialización.

El estudio de Heungjo et al. (2011) se centra en la revisión de la literatura relacionada con las SC de biomasa así como Rentizelas & Patsiopoulos (2010), quienes centran su investigación en casos para combustibles líquidos, y se resumen en: (i) un análisis del estado de la investigación en referencia a la cadena de abastecimiento en el área de combustibles, (ii) una comparación entre los avances en la cadena de abastecimiento en el área de biocombustibles y relacionados al área específica de crudos, (iii) una comparación de las características de la cadena de abastecimiento en el área de biocombustible y genérico, y (iv) una perspectiva desde la cual se sugieren propuestas para próximas investigaciones en el área de combustibles. La investigación de estos autores se enfoca en las fases de midstream y downstream. El área de trabajo del presente estudio es considerado upstream.

Otro estudio ligado a esta corriente de investigación presentada por Guajardo et al. (2013), estudia un problema de planificación táctica en una cadena de suministro divergente, que implica decisiones relacionadas con la producción, inventario, transporte interno, ventas y distribución a los clientes. El problema está motivado por una empresa en la industria del petróleo. El objetivo general es maximizar la contribución y, con el fin de lograr esto, la planificación se ha dividido en dos problemas separados. El primer problema se refiere a las ventas y donde la planificación de la distribución está descentralizada en vendedores individuales. El segundo problema se refiere a la producción, transporte y la planificación del inventario a través de refinerías, centros de almacenamiento y se gestiona de forma

centralizada con el objetivo de minimizar costos, debido a esta disociación, la solución de los dos problemas se centra en la coordinación a fin de lograr el objetivo. Esto se consigue a través de un sistema de precios internos con el fin de dar a los vendedores incentivos necesarios para alinear sus decisiones con el objetivo general.

El estudio de Duarte et al. (2014) contempla un problema de ubicación para una planta de biocombustibles en el contexto colombiano. Para reducir los costos logísticos y de operación, es importante la toma de una decisión estratégica y consecuentemente la selección del sitio adecuado. Debido a la complejidad de la instalación, el problema centro-ubicación debe considerar la estructura de la cadena de suministro, que implica el flujo de materiales desde los proveedores hasta los clientes. En este trabajo se propone un marco de optimización que combina el diseño y configuración del proceso utilizando una formulación MILP (entera mixta de programación lineal). El modelo se aplicó para ubicar una planta de bioetanol de segunda generación en Colombia que utiliza un residuo agrícola conocido como *Coffee-CSs* (tallos cortados de café).

Un análisis post-optimización indicó que incluso durante un largo período, la decisión de localización no cambió. Se pueden extrapolar ciertos aspectos de este estudio al trabajo en desarrollo, debido a que manejan modelos de ubicación de instalaciones con restricción de oferta y demanda.

Los trabajos enfocados al área de petróleo están ligados a problemas en la cadena de suministro desde la producción hasta el usuario final o cliente, el problema principal es la distribución desde los campos hacia los centros de procesamiento (refinerías) y puntos de comercialización. Adicionalmente, problemas de distribución interna de análisis de laboratorios que podrían ser comparados con distribución interna de crudo a puntos de recepción no son tópicos que hayan sido investigados ni trabajados en profundidad en los artículos consultados.

Las particulares circunstancias del presente trabajo otorgan relevancia a su necesidad de desarrollo, ya que no ha sido investigado en todas sus complejidades y tiende a ser un tópico de interés en la industria, sobretodo en el contexto colombiano donde la industria petrolera se encuentra en continuo crecimiento (PACIFIC RUBIALES ENERGY, 2013, *Informe de Anual y de Sostenibilidad 2013*, Bogotá)

El trabajo base para la continuación del desarrollo del trabajo en cuestión, es el trabajo de Haugland (1991) el cual ya fue expuesto en detalle. Aun cuando el modelo matemático presenta diferencias con respecto al enfoque de este trabajo ya que éste no incluye costos, muestra similitudes con la base que implica movilidad, tiempos mínimos de movilización y una demanda a partir de producción de crudo, la cual va ligada a una campaña de perforación.

El remanente de referencias está mencionado en la Tabla 2 y 3.

**Tabla 2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PARA DESARROLLO DE EVALUACIÓN DE PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

AUTORES Y AÑO	RESTRICCIONES CONSIDERADAS	FUNCION OBJETIVO	TIPO DE PROBLEMA	METODO DE RESOLUCION
2014 • A.E. Duarte • W.A. Sarache • Y.J. Costa	El resultado fue influenciado principalmente por la materia prima y costos de transporte. La disponibilidad de materias primas era un parámetro crítico que la limitada capacidad de producción. Restricciones: - Capacidad de producción - Asignación de planta de tratamiento - Conversión de biomasa en biocombustible - Configuración del mercado - Regulaciones gubernamentales - Relación entre bioetanol, gasolina y gas demandado en las estaciones	Propone un marco de optimización que combina el diseño y configuración del proceso de cadena de suministro, a través de la maximización de los beneficios asociados	Facility Location	Formulación MILP, Aspen Plus 2006.5 simulación y la herramienta ICARUS Professional software GAMS Distribution 23.9.3
2013 • M. Guajardo • Martin Kylinger • Mikael Rönnqvist	El primer término es el costo del procesamiento de crudos en las refinerías; el segundo término es el costo de la producción en los centros, y el tercer término es el coste del transporte de distribución primarias; el cuarto término es el costo total de la media inventario por período, el último plazo es el costo de la demanda insatisfecha. Restricciones: - Inventarios a nivel inicial de crudo, aceites básicos y aceites de especialidad. - Valores iniciales de modo crudos refinados. - Valores iniciales de los aceites de especialidad producidos - Conservación del flujo de crudos en las refinerías. - Conservación de aceites sic en las refinerías, hubs y depósitos, respectivamente. - La compañía suministra al usuario final la cantidad que ordeno, a través del vendedor correspondiente.	Se estudia un problema de planificación táctica en la cadena de suministro divergente. Se propone y discute modelos de programación lineal para los problemas de planificación  La función objetivo (1) reduce al mínimo el coste total a través del horizonte de planificación general hasta el nivel de depósito (ieexcluding coste de distribución a los clientes) En este caso el objetivo de la función objetivo (2) es maximizar los ingresos totales obtenidos de las ventas durante el período de planificación, en el supuesto de que lo harán realizarse como previsto.	Cadena de suministro Planificación Integrada, decoupled y lineal para facility location	Modelos integrados de planeación Modelos de costo mínimo y de ingreso máximo Modelos desacoplados
2012 • D. Subhash	Restricciones: - Cobertura de demanda - Mínimo de distancias que pueden ser recorridas - Número máximo de facilidades a ubicarse	Maximización del problema de localización de cobertura Este modelo tiene como objetivo satisfacer la mayoría de la cantidad de demanda para un tipo de instalación como sea posible mediante la localización de un determinado número de instalaciones.	Facility Location Decisión multicriterio	El modelo fue creado en Microsoft Excel utilizando Visual Basic para Aplicaciones (VBA) sin depender de un software externo; el resultado es que el modelo es autónomo y se puede utilizar fácilmente para su posterior análisis.
2011 • A., Heungjo, • W. E. Wilhelm, • S. W. Searcy	Varias tecnologías aun están en fases de prueba y desarrollo	Este artículo pone en relieve las necesidades únicas para apoyar las decisiones que integran la granja con los niveles comerciales e identifica vías fértiles para futuras investigaciones sobre la cadena de suministro de biocombustibles	Facility Location	Búsqueda operacional
2010 • A.A.Rentizelas, • I.P.Tatsiopoulos	Método no lineal, tiene varias discontinuidades, que se introducen por el modelado analítico de supply chain de la biomasa Limitaciones de la demanda de energía La planta de energía de biomasa debe tener suficiente capacidad instalada para satisfacer los picos de carga de refrigeración thermalor del los consumidores: Limitaciones warehousing Debe haber un stock de seguridad de biomasa en el deposito en cualquier momento para satisfacer las necesidades energéticas de los clientes por un determinado período de tiempo. Restricciones legales Restricciones sociales Restricciones logísticas	Cómo ubicar un centro de bioenergía utilizando un método de optimización híbrida La función objetivo a ser maximizada es la Net Valor Presente (NPV) de la inversión para el proyecto de vida.	Facility Location	Método de optimización híbrido

**Tabla 2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PARA DESARROLLO DE EVALUACIÓN DE PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN (continuación)**

2005 • Z.-J.M., Shen • M.S, Daskin	Supongamos por un momento que sabemos que son los clientes que se asignará a un DC específico. Restricciones: - Aseguramiento de que cada nodo de la demanda se asigna exactamente a un DC. - Las demandas sólo se pueden asignar para abrir centros de datos. - Restricciones de integralidad.	Tres objetivos son considerado en su modelo: (1) reducir al mínimo el costo fijo de apertura de las instalaciones, (2) reducir al mínimo los costos variables totales de servir a las demandas de los clientes, y (3) reducir al mínimo el tiempo de respuesta promedio para servir a los clientes.	Modelo basado en costos para inventario y locación Facility Location	Algoritmo Genético
2005 • C., Canel • B. M. Khumawala • J. Law • A. Loh	El algoritmo propuesto es particularmente eficaz cuando la instalación reapertura y los costos de cierre son relativamente significativa en el problema de múltiples períodos.	En este trabajo se desarrolla un algoritmo para resolver el multi-producto, multi-periodo capacitado (dinámico), de múltiples etapas problema de localización de instalaciones.	Facility Location Multi periódico	Algoritmo Branch y bound
2003 • c. Romero, • T. Rehman	Disponibilidad de Capital en el tiempo Disposición de Mano de Obra para los trabajos Área máxima de implementación de la planta	Maximizar el valor Neto (VAN) y minimizar la contratación de mano de obra eventual para las operaciones de recolección.	Programación multiobjetivo Facility Location+	Programación por metas
2001 • I. Contrerasa • E. Fernández • G. Reineltc	Varias desigualdades válidas se derivan de los más prometedores de estas formulaciones para fortalecer su relajación LP atado y reducir el árbol de enumeración.	El modelo generaliza el problema del p-centro clásica y tiene diversas aplicaciones en la planificación regional, la distribución, las telecomunicaciones, los sistemas de emergencia, y otras áreas. Dos formulaciones de programación entera mixta se presentan y comparan	Facility Location	p-center
1997 • C. Canel, • B.M. Khumawala,	Restricciones: - Periodos definidos y conocidos para la variación de ubicaciones - Demanda conocida a cubrir - Permision de reapertura de locaciones previas - Costos de cierre.	En este trabajo se desarrolla un algoritmo para resolver el multi-producto, multi-periodo capacitado (dinámico), de múltiples etapas problema de localización de instalaciones.	Facility Location	Algoritmo Branch y bound
1991 • D. Haugland • C. Michelsen Institute, • K. Jørnsten	Las limitaciones En la producción de un campo de petróleo hay básicamente dos restricciones que limitan físicamente la tasa de producción. No asumimos ninguna restricciones de mercado, es decir, todo el petróleo producido se puede vender. Las restricciones en cuestión son las siguientes. La capacidad de producción definida por la instalación de la plataforma. Capacidad de Producción de cada pozo por la presión en el depósito. La producción tiene lugar sólo de los pozos que están conectados a la plataforma. La plataforma se puede instalar en un solo sitio. La plataforma se puede mover únicamente en el sitio donde se encuentra.	El modelo completo es una programación entera mixta modelo en el que las variables de decisión modelan la cuestión de cuándo mover la plataforma, el número de pozos deberán ser taladrados de cada posición, que los pozos deben ser productivos en los diferentes períodos de tiempo, y cuánto petróleo se debe producir.	Facility Location	Combinamos el modelo de simulación de yacimientos con un modelo de evaluación económica en la que la flexibilidad de una plataforma móvil está incluido en cuanto a las decisiones sobre la conveniencia o no hay que mover la plataforma y, en caso afirmativo, en qué período de tiempo. Cuando se mueve la plataforma, el modelo también sugiere un destino para la mudanza.
1990 • J. Current,. • H. Min, • D. Schillin	EVALUACION DE DISTINTOS ESCENARIOS TEORICOS	Minimización de Costos Orientado a Demanda Maximización de ganancia Concerniente al Ambiente	Facility Location Multi criterio	BARRE TODOS LOS METODOS DISPONIBLES
1990 • A. Durukan Sonmez • G. J. Lim	Restricciones: - Presupuesto máximo determinado que no puede ser excedido - Indeterminadas reubicaciones permitidas - Posibilidad de nuevas locaciones en óptimos de ubicación	Dos desafíos del problema de localización de instalaciones a largo plazo que se producen de forma simultánea; cambio de la demanda futura y número incierto de las instalaciones futuras	Facility Location P-median	Presentar un modelo de propiedad intelectual que considera la incertidumbre en los futuros lugares de demanda y de las instalaciones. Se desarrolló un algoritmo de descomposición que pueden producir soluciones de una manera rápida

Fuente: Recopilación bibliográfica de trabajos revisados, Lorena Rojas W., 2014

**Tabla 3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PARA DESARROLLO DE EVALUACIÓN DE PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN- Reviews**

AUTORES Y AÑO	TIPO DE PROBLEMA	CONTEXTO	PERSPECTIVA
2014 • H. Sahebi • S. Nickel • J. Ashayeri	Modelos de decisión para el área de cadena de abastecimiento	Industria de petróleos	Cadena de suministro en la industria petrolera en sus distintas etapas, producción, distribución a puntos de procesamiento y distribución y transporte a puntos de venta
2014 • L. Chen • J. Olhager • Ou Tang	Facility Location	Industria de Manufactura	Comparación de investigaciones en el área de Facility location, contabilizando sostenibilidad en la ubicación de las plantas en distintas regiones y medios sociales.
2012 • R. Zanjirani Farahani • N. Asgari • N. Heidari • M. Hosseininia • M. Goh	Facility Location	Problemas de Cobertura en distintos ámbitos	Revision de modelos, soluciones y aplicaciones.
2012 • A. Bolori Arabani • R. Zanjirani Farahani	Facility Location	Dinamismo en la demanda en el tiempo.	Aplicabilidad del dinamismo en la necesidad de distintos puntos de servicio en el tiempo, a distintos problemas de ubicación de instalaciones, sin restringirse a facility location, sino "covering problems", "Hub location problemas", "center problems" entre otros y el modelamiento matemático requerido para cada uno específicamente.
2009 •M.T. Melo • S. Nickel • F. Saldanha-da-Gama	Facility Location	Gerencia en Cadena de suministros	Relación entre ubicación de instalaciones y planificación estratégica de la cadena de abastecimiento.
2005 •C.S. Revelle • H.A. Eiselt	Location Analysis	Revision de metologias de solucion de problemas de ubicacion	Compilamiento de investigaciones anteriores sobre el tema
2003 • F. Ares	Facility Location	Transporte de Bienes	Texto educativo. Capitulo especifico a modelos de localización.
2003 • M. Daskin, • L. Snyder, • R. Berger	Facility Location	Importancia de toma de decisiones sobre ubicación de facilidades en el diseño de cadena de abastecimiento	Compilamiento de investigaciones anteriores sobre el tema con el fin de incorporar factores adicionales a la cadena de abastecimiento como ruteo, manejo de inventarios y confiabilidad.
2001 • J. Current, • M. Daskin, • D. Schilling	Facility Location	Discrete Network Location Models	Texto educativo. Capitulo específico a modelos de localización.
1990 • S. Hakimi	Facility Location	Industria de Manufactura	Modelos de localización de facilidades

Fuente: Recopilación bibliográfica de Rewie's revisados, Lorena Rojas W., 2014

### **2.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

En base a lo anterior, surgen las siguientes preguntas de investigación:

¿Qué tipo de modelo matemático se ajusta a la realidad de la problemática previamente enunciada?

¿Qué variables deben ser consideradas para formular así como modelar de la manera más adecuada la situación actual en Campo Rubiales con el fin de generar un modelo que pueda extrapolar tiempo y espacios para este tipo de situaciones?

¿Qué estrategias pueden ser desarrolladas durante el proceso y post obtención de resultados en pro de la adecuada aplicación del modelo a ser desarrollado?

Las preguntas expuestas dan pie a formular el problema de investigación de este trabajo: factibilidad de generación de un modelo que responda a las necesidades de ubicación de laboratorios satélites localizados en el campo Rubiales que responda a los cambios dinámicos de la demanda a través de un período de tres (3) años y consecuentemente su implementación para otros campos adyacentes así como para otras empresas.

### **2.4 JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE DEL PROBLEMA**

Los limitados recursos que se presentan anualmente al departamento de tratamiento químico y laboratorio requiere que la administración de los mismos permita su optimización, por esta razón, la necesidad de una herramienta que sea flexible y se ajuste a cada caso de la operación, entendiéndose, aumento de presupuesto con la oportunidad de implementar nuevas instalaciones o incluso, recortes en el presupuesto que obligue a reducir los existentes.

Debido a que la aprobación de presupuesto se realiza anualmente y la operación es una actividad dinámica que no se rige por parámetros presupuestales sino por naturaleza de yacimiento o necesidad de crecimiento por demanda de crudo a nivel nacional, departamentos como el de operaciones o tratamiento químico deben adaptarse a las circunstancias que se suscitan. Por esta razón, el estudio pretende alcanzar un modelo que se adapte y/o ajuste a los recursos existentes en cualquier momento del año.

Dentro de la revisión realizada, no se encontró evidencia de un estudio que fuera aplicado a la ubicación de laboratorios satélites en diferentes períodos de tiempo para empresas petroleras. Desde el punto de vista académico, este trabajo representa un aporte interesante a las diversas variantes de los problemas de localización.

Para el trabajo en cuestión, sólo se trabajará con las condiciones para el caso de Campo Rubiales ya que cualquier desarrollo a partir del mismo es extrapolable a

cualquier situación similar, debe mencionarse que el resultado del trabajo será puesto en práctica en campo y el posible éxito o aplicabilidad del modelo y sus resultados ya serán de manejo interno de la compañía.

Finalmente el estudio pretende conseguir un modelo que permita la ubicación de los laboratorios satélites optimizando distancias entre los puntos de toma de muestras y puntos de análisis.

El modelo logra incorporar o no la necesidad de otros laboratorios con el fin de satisfacer la demanda en un momento dado en un período de tres (3) años, considerando reubicación en el tiempo debido al crecimiento asociado a la campaña de perforación.

La maximización de ganancias o minimización de costos no son variables a ser consideradas en esta evaluación con respecto al primer aspecto que contempla la minimización de distancias entre los puntos de envío y análisis (z1), a través de los recursos existentes disponibles, los posibles costos asociados a la activación de laboratorios adicionales, para cubrir la demanda del campo, no están siendo contemplados, ya que la información que resulte del modelo, es a modo informativo para aplicaciones futuras.

Considerando que se trata una empresa privada, los costos asociados a la operación se consideran fijos en el período de tiempo de estudio, es decir, el combustible, el vehículo, el operador asociado, estará disponible para la actividad indiferente de la reubicación o no de laboratorios, así como la movilización de los laboratorios, las obras ejecutables adjudicadas a este fin son parte de contratos bajo la figura de disponibilidad no por obra ejecutada u horas de transportación.

Finalmente a nivel de trabajo del área de laboratorio, no se maneja la maximización de ganancias, ya que no hay una recompensa asociada al trabajo.

## **2.5 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Según la literatura, dentro de los tipos de investigación más comunes se presentan los históricos, documentales, descriptivos, correlacionales, explicativos, experimentales, entre otros. En el área de operaciones, sobre todo con enfoque ingenieril y con el objetivo principal del estudio como aplicativo a la industria en el que se está desarrollando el estudio, el tipo de investigación experimental es la que más se ajusta al modelo que se llevará a cabo. La investigación experimental se caracteriza por analizar el efecto producido por la acción o manipulación de una o más variables independientes sobre una o varias dependientes, el modelo a ser desarrollado requiere de un modelo que obtenga el efecto de la sensibilización de distintas variables que afectan un proceso en específico.

### **3. 0 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

Los siguientes son los objetivos que orientan esta investigación:

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un modelo de optimización mediante resolución de problema multi-objetivo para ubicación exitosa de los laboratorios satélites que permita garantizar y satisfacer las necesidades de análisis de muestras del campo de actividades de la compañía PACIFIC RUBIALES ENERGY en Campo Rubiales.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar el proceso asociado al muestreo, recorrido, entrega y análisis de laboratorio de PACIFIC RUBIALES ENERGY a través de análisis y evaluación de sus actividades respectivas.
- Identificar los componentes claves que impactarán el modelo a ser generado así como las variables a ser introducidas en el modelo en aras de lograr la optimización del sistema a ser simulado.
- Determinar por medio de un modelo de optimización la ubicación y distribución de trabajo para cada uno de los laboratorios existentes basados en el análisis de la demanda y buscando la optimización de tiempos de operación para satisfacer la necesidades respectivas.
- Interpretar los resultados obtenidos por medio del modelo de optimización con el fin de sensibilizar los distintos escenarios posibles y obtener consecutivamente mejores resultados.
- Realizar la propuesta de implementación de resultados a Campo Rubiales a partir del modelo de optimización construido.

### **4.0 METODOLOGÍA**

El estudio se enfocó en recabar información de campo, particularmente el desarrollo en el tiempo de la demanda considerando la campaña de perforación. Este caso se considera como fuente de primer y segundo grado, ya que el personal de campo, INGENIERO DE CAMPO y COORDINACION DE LABORATORIO, hicieron la recolección directa de la información, ya que son los directamente involucrados en el proceso en evaluación.

El ingeniero de Campo es quien determina las frecuencias y asignación de pozos a ser monitoreados por laboratorio asignado para análisis; mientras que el coordinador de laboratorio es quien revisa los datos así como las estadísticas referentes a los tiempos de entrega, número de análisis realizados por laboratorio y

distribución de los pozos recorridos. La mayoría de esta información ya está registrada en una base de datos de donde fueron obtenidos y organizados los datos necesarios.

#### **4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE LABORATORIO**

El primer paso para poder modelar el problema en cuestión es especificar al detalle las distintas variables que en él se encuentran involucradas.

Se cuenta con una proyección de perforación así como un número de pozos operativos a la fecha. A continuación, se especificarán cada uno de ellos.

##### **4.1.1. PROYECCIÓN DE CRECIMIENTO**

El factor más importante a ser considerado en el trabajo es la demanda en el tiempo. El crecimiento de Campo Rubiales se ve afectado por la directriz y aprobación de la licencia ambiental y minas para la campaña de perforación de pozos en distintas áreas previamente estudiadas por el área de Yacimientos.

La proyección de producción a largo plazo es de aproximadamente tres (3) años. A partir de estas proyecciones emitidas por el área de Yacimientos, el área de Operaciones, que implica Producción y Perforación, organiza la campaña de perforación, dependiendo de la disponibilidad de recursos en el campo, que consisten básicamente de taladros de perforación.

Como se pudo observar en el mapa de Campo Rubiales, gran parte del área de explotación está copado, son pocos espacios los que no han sido explotados y son el target de las próximas campañas, éstas están organizadas por meses y número de pozos a perforar, mas no qué pozos se van a perforar; en otras palabras, se conoce la distribución de perforación en un mes, pero es en el mes anterior que se decide entre el área de Optimización y Producción qué locaciones serán intervenidas, ya que depende de recursos puntuales para movilización de fluido.

Para el año 2013 se tenía una distribución de perforación como se muestra en la tabla 4 a continuación, considerando 4 cuadrantes principales como se tiene estipulado en campo para ubicación de pozos en el "WELL LOCATOR.

**Tabla 4. PROGRAMA DE DESARROLLO DE APERTURA DE POZO DE CAMPO RUBIALES 2013**

AÑO	MESES	POZOS NUEVOS CAMPO RUBIALES	DEMANDA VS TIEMPO			
			CUDRANTE I	CUDRANTE II	CUDRANTE III	CUDRANTE IV
2013	ENERO	13	94	39	188	134
	FEBRERO	12	96	39	188	144
	MARZO	12	98	39	188	154
	ABRIL	12	101	39	188	163
	MAYO	11	103	39	188	172
	JUNIO	12	105	39	188	182
	JULIO	6	107	39	188	186
	AGOSTO	6	108	39	188	191
	SEPTIEMBRE	6	109	39	188	196
	OCTUBRE	6	110	39	188	201
	NOVIEMBRE	5	111	39	188	205
	DICIEMBRE	5	112	39	188	209
	TOTAL	106	112	39	188	209

Fuente: Dpto. de Optimización, 2013

Finalmente para finales de 2013 se tiene un crecimiento de campo total como se presenta en la tabla 5. Se observa que para el mes de diciembre se tendrían 548 pozos activos cuando se arrancó el año con un total de 442 pozos.

**Tabla 5. PROGRAMA DE CRECIMIENTO INICIAL 2012-2013**

	MESES	POZOS	TOTAL POZOS EN EL AÑO
2012	DICIEMBRE	442	442
2013	ENERO	455	548
	FEBRERO	467	
	MARZO	479	
	ABRIL	491	
	MAYO	502	
	JUNIO	514	
	JULIO	520	
	AGOSTO	526	
	SEPTIEMBRE	532	
	OCTUBRE	538	
	NOVIEMBRE	543	
	DICIEMBRE	548	

Fuente: Dpto. de Optimización, 2012

Las curvas de producción pueden influir en la proyección de crecimiento de campo, los pozos se prueban y verifican su producción real versus la proyectada. Según estos datos el pozo puede permanecer activo o puede ser cerrado en caso que el aporte de crudo no sea el esperado o que el aporte de agua sea excesivo y, por balance de agua en el sistema, el mismo no pueda ser tratado en la facilidad de tratamiento.

En este sentido se deja claro que tanto la campaña de perforación así como la apertura de pozos activos no siempre permanece igual; sin mencionar que los pozos productores activos no son iguales a los pozos perforados y existentes en campo.

La tabla 6 puede explicar este punto, al arrancar el proyecto en 2012, se tenían 591 pozo existentes, de los cuales 191 estaban fuera de servicio y el remanente estaba incluido en la campaña de perforación. Para final de 2012 se tenían, como se indicó en la primera tabla, un total de 442 pozos activos y productores. Para el caso del 2013 se tiene la distribución como se muestra a continuación.

**Tabla 6. POZOS EXISTENTES PARA 2012 Y 2013**

AÑOS	POZOS EXISTENTES	OPERATIVOS	FUERA DE SERVICIO
2012	591	400	191
2013	787	495	292

Fuente: Dpto. de Optimización, 2013

En la tabla 7 se presenta una hoja de datos referente a la proyección de perforación, pozos nuevos y su apertura en el tiempo, este desenvolvimiento se presenta a continuación.

**Tabla 7. CAMPAÑA DE APERTURA DE POZOS 2012-2015**

AÑO	POZOS NUEVOS			
	2012	2013	2014	2015
ENERO		13	0	20
FEBRERO		12	10	18
MARZO		12	14	16
ABRIL		12	12	24
MAYO		11	12	16
JUNIO		12	24	18
JULIO		6	18	18
AGOSTO		6	16	18
SEPTIEMBRE		6	18	20
OCTUBRE		6	12	20
NOVIEMBRE		5	20	16
DICIEMBRE	442	5	18	6
		106	174	210
TOTAL POZOS OPERATIVOS	442	548	722	932

Fuente: Dpto. de Perforación, 2012-2015

A la fecha no se cuenta con la proyección de 2016, e incluso este año no será incluido para efectos del trabajo ya que en el 2016 PACIFIC RUBIALES ENERGY pasa la operación de Campo Rubiales a ECOPETROL. Por ende, este año no se ejecutarán cambios en contratos a menos que sean ejecutados por el socio.

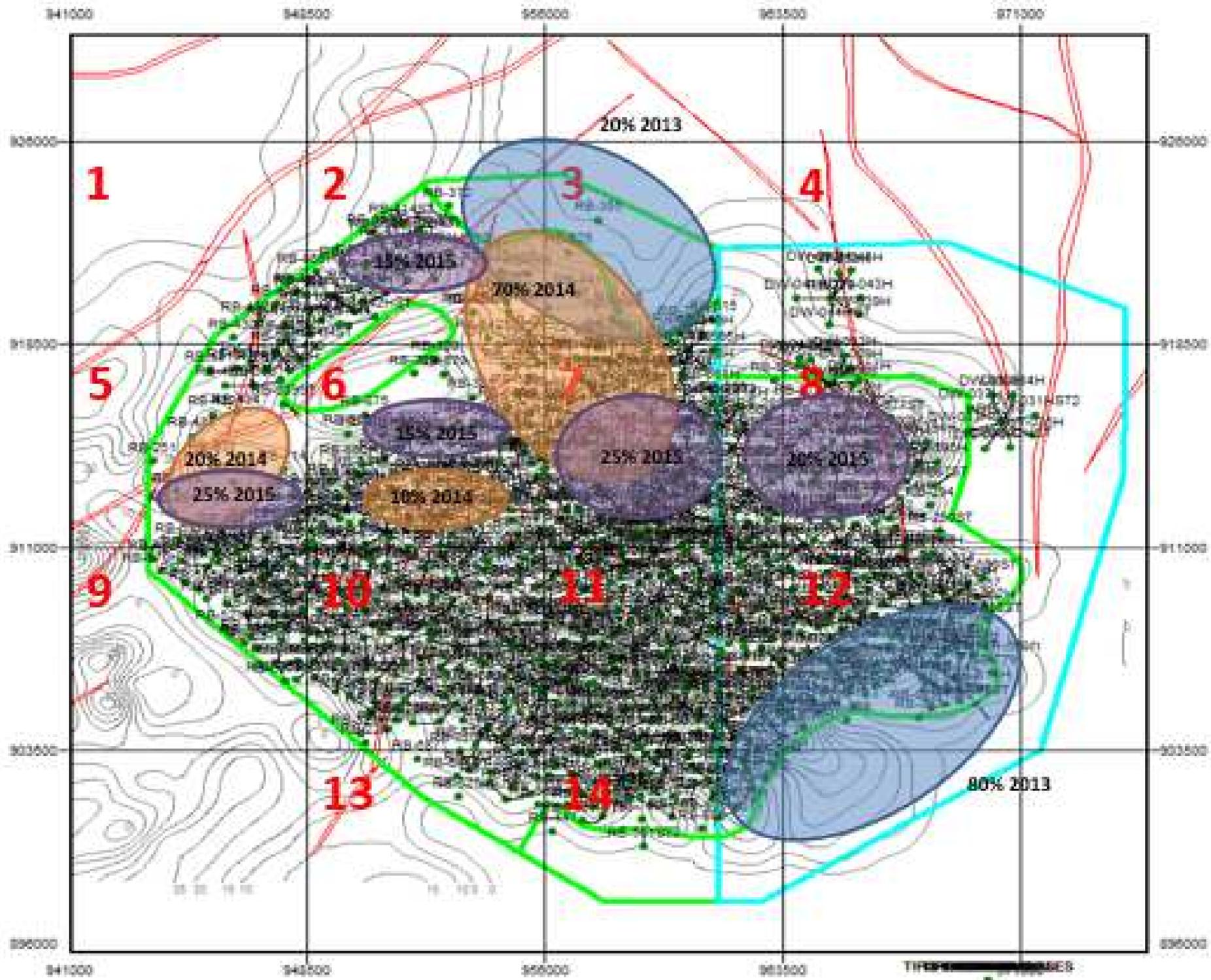
En la tabla 8 y 9 se presentará la información referente a la proyección de crecimiento de campo versus su representación gráfica (Figura 4); es decir, la tabla 8 a continuación contiene data numérica de pozos a ser perforados según la campaña de perforación establecida, por zonas, así como sus características básicas, mientras que la figura respectiva suministra mayor detalle ya que indica en

qué porcentaje de cada una de las proyecciones anuales impactará los distintos cuadrantes y la tabla 9 resume estos crecimientos en el área en el tiempo.

Esta información proviene del área de Yacimientos en conjunto con Perforación y Optimización. Estas tres (3) áreas son quienes definen el crecimiento del campo a partir de información geológica así como simulación e información obtenida de trabajos de sísmica. Ya que el trabajo de sísmica no es veraz en un 100%, esta información debe ser considerada como supuestos a partir de datos teóricos los cuales se van afianzando con las perforaciones que se realizan y confirman productividad del área, es decir, que los pozos a ser perforados en el tiempo según la campaña de perforación pueden cambiar en el tiempo así como variar de ubicación.



Figura 4. DISTRIBUCIÓN DE PRODUCCIÓN POR CUADRANTES



Fuente: Dpto. de Optimización, 2012-2014

#### **4.1.2 COSTOS**

Aun cuando los modelos para *facility location* generalmente involucran el costo como parte de su función objetivo (Current 1990, Chase & Aquiliano, 2004), los costos asociados con movilizar e instalar laboratorios satélites no varían en el tiempo. PACIFIC RUBIALES ENERGY maneja contratos marco a largo plazo, usualmente de tres (3) años que manejan las mismas tarifas y, en consecuencia, pueden obviarse del modelo.

#### **4.2. MODELAMIENTO MATEMÁTICO**

Se presenta a continuación la descripción del modelo matemático propuesto para ayudar a PACIFIC RUBIALES ENERGY a determinar la ubicación de sus laboratorios, por un período de tres (3) años.

##### **4.2.1 SUPUESTOS DEL MODELO MATEMÁTICO**

El modelo partirá de los siguientes supuestos y definiciones:

1. Se trabajará con cinco (5) laboratorios de análisis
2. Tres (3) laboratorios son satélites (móviles); los otros dos (2), son edificaciones fijas. Aun cuando no está operativo el segundo laboratorio fijo (CPF2), se considerará dentro de las capacidades actuales de manejo de muestras analizables.
3. Cada laboratorio tiene una capacidad finita de análisis.
4. Por directriz de la superintendencia de producción en Campo Rubiales, los laboratorios estarán estáticos dentro de un espacio de tiempo de seis (6), es decir, dentro de este período de tiempo para una posición en específico sólo estará presente un laboratorio.
5. De la misma forma que se asume mínimo seis (6) meses que el o los laboratorios deben estar fijos a una única ubicación, se asume que no hay costos extras entre laboratorios. Todos representarían el mismo costo a la empresa por lo que no hay mayor impacto en la movilización de cualquiera de los tres (3) laboratorios satélites. Esto es porque PACIFIC RUBIALES ENERGY cuenta con contratos de disponibilidad de maquinaria para estos fines de desmovilización e instalación, los costos asociados al contrato son por disponibilidad en tiempo en sitio, no por obra ejecutada; es decir los equipos se encuentran en campo se realicen o no trabajos y no habría incrementos asociados a pagos a proveedores.
6. Los datos de desarrollo del campo ya está establecida por la campaña de perforación de los próximos años así como el detalle de desarrollo mes a mes, no se cuentan con las coordenadas de los nuevos pozos a ser perforados, sólo la zona que será intervenida.
7. Se mantendrá una línea de tiempo hasta 2015 debido a que en el año 2016 Campo Rubiales será entregado oficialmente para operación a

ECOPETROL, por ende cualquier decisión operativa a partir de ese momento será potestad del nuevo operador.

8. El plano de Campo Rubiales se divide en catorce (14) cuadrantes. Estos cuadrantes son una división acordada entre el área de yacimientos y el área de optimización, para visualización del campo y distribución de los pozos en el plano. En cada uno de los cuadrantes se ubicará la demanda en el centro del mismo, considerando así este punto como el centro acumulativo de las demandas de cada uno de los pozos que en él están situados.
9. Cada uno de los pozos tiene una demanda mínima de análisis una (1) vez al día, en turno de 24 horas, es decir, el personal que diseña los planes de muestreo puede identificar la necesidad que la ruta a este pozo sea en el turno de la noche o durante el turno del día. Como se mencionó, este personal delimita la necesidad de muestreo de un pozo, para este caso consideramos el mínimo necesario como condición de alimentación al sistema modelado.
10. Se considera un factor R de pozos existente en estado de inactivo al momento del monitoreo de pozos, es decir, no todos los pozos perforados se encuentran operativos al tiempo, esto se debe usualmente a falta de recursos a nivel de personal operativo en cada cluster, falta de transporte de fluidos o indisponibilidad de generación eléctrica para aquellos pozos lejanos a la red eléctrica que alimenta el campo. Este factor R implicará la reducción de pozos que requerirán de análisis, es decir, la demanda mes a mes, por lo que la distribución de los laboratorios satélites puede verse alterada. El factor R se considera bajo 4 escenarios ya mencionados, el primer escenario de 85% se basa en la necesidad mínima del 85% del campo operativo con el fin de cumplir con la cuota de venta ante el socio.
11. La capacidad de análisis que puede realizar un laboratorio se asumirá en 300 análisis para laboratorios sede y en 200 análisis para laboratorios satélite. Este estimativo se hace a partir de datos internos de la compañía.

#### **4.2.2. DEFINICIÓN Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS**

La matriz de demanda en el tiempo (ver ANEXO 1), se rige por el comportamiento evidenciado en la Figura 4 a partir de datos de la campaña de perforación que se evidencia en la Tabla 9. Se contaba con una base de datos 2012 cuando este trabajo empezó a ser desarrollado, a partir del 2012 se contaba con datos de proyecciones así como porcentajes de crecimiento en las distintas áreas de interés del Campo. A partir de esta información se generó una base de datos con la que se reprodujo la tabla de demanda versus tiempo. La base de datos original no será anexada por temas de confidencialidad.

La segunda matriz es la de distancias entre puntos considerados como inicios y destinos (ANEXO 2). Ésta se generó a partir de un programa desarrollado por PACIFIC RUBIALES ENERGY, el cual cuenta con las coordenadas de cada uno de los pozos perforados a la fecha.

### 4.2.3. MODELO

Una definición más formal de problema es la siguiente:

#### Conjuntos

$i$ : Posiciones {1, ..., 14}

$j$ : Cuadrantes {1, ..., 14}

$k$ : Laboratorios {1, ..., 5}

$t$ : Meses {1, ..., 36}

#### Parámetros

$B_{ij}$ : Distancia de la posición  $i$  al cuadrante  $j$

$S_k$ : Capacidad del laboratorio  $k$

$D_{jt}$ : Demanda del cuadrante  $j$  en el mes  $t$

$R$ : Factor  $R$  (Multiplicador de la demanda para el tiempo  $t$ )

$M$ : Número entero muy grande

#### Variables

$x_{ijkt}$ : Cantidad de análisis del cuadrante  $j$  que cubre el laboratorio  $k$  que está ubicado en la posición  $i$  en el tiempo  $t$

$y_{ikt}$ : Variable binaria, 1 si el laboratorio  $k$  es ubicado en la posición  $i$  en el tiempo  $t$

$v_{ijt}$ : Cantidad de análisis del cuadrante  $j$  que cubre el laboratorio adicional que está ubicado en la posición  $i$  en el tiempo  $t$

$u_{it}$ : 1 si se ubica un laboratorio adicional en la posición  $i$  en el tiempo  $t$

#### Restricciones

(R1) Capacidad de cada laboratorio

La cantidad de análisis que realiza un laboratorio a todos los cuadrantes en un período de tiempo no puede superar su capacidad de trabajo. De la misma forma, esta restricción ayuda a determinar en qué cuadrante estará ubicado cada laboratorio a través del períodos de tiempo analizado.

$$\sum_j x_{ijkt} \leq S_k y_{ikt} \quad \forall i, k, t$$
$$\sum_j v_{ijt} \leq M u_{it} \quad \forall i, t$$

(R2) Ubicación de los laboratorios

Cada laboratorio fijo y cada laboratorio satélite deben existir únicamente en un momento dado del tiempo en una posición fija. Ningún otro laboratorio debe ocupar el mismo lugar en el tiempo. Se define adicionalmente, que los laboratorios CPF1 y CPF2 siempre estarán ubicados en los cuadrantes 7 y 11, debido a que son laboratorios fijos.

$$\begin{aligned}\sum_i y_{ikt} &\leq 1 \quad \forall k, t \\ y_{7,4,t} &= 1 \quad \forall t \\ y_{11,5,t} &= 1 \quad \forall t\end{aligned}$$

(R3) Demanda de análisis de los cuadrantes

La sumatoria de los análisis realizados por cada uno de los laboratorios, fijos, existentes satélites y extras deben ser igual a la demanda requerida en cada cuadrante.

$$\sum_i \sum_k x_{ijkt} + \sum_i v_{ijt} = D_{jt} R_t \quad \forall j, t$$

(R4) Los laboratorios sólo se pueden mover cada 6 meses

El período de tiempo mínimo de estadía de los laboratorios satélites es de seis (6) meses. Esta disposición de tiempo es determinada por logística interna de la corporación.

$$\begin{aligned}y_{ikt} &= y_{ik(t+1)} \quad \forall i, k \in \{1,2,3\}, t \in \{1,7,13,19,25,31\} \\ y_{ik(t+1)} &= y_{ik(t+2)} \quad \forall i, k \in \{1,2,3\}, t \in \{1,7,13,19,25,31\} \\ y_{ik(t+2)} &= y_{ik(t+3)} \quad \forall i, k \in \{1,2,3\}, t \in \{1,7,13,19,25,31\} \\ y_{ik(t+3)} &= y_{ik(t+4)} \quad \forall i, k \in \{1,2,3\}, t \in \{1,7,13,19,25,31\} \\ y_{ik(t+4)} &= y_{ik(t+5)} \quad \forall i, k \in \{1,2,3\}, t \in \{1,7,13,19,25,31\}\end{aligned}$$

Los laboratorios adicionales no fueron considerados para seguir esta restricción, ya que se quiere buscar si en un período de tiempo un laboratorio adicional es necesario. Esto a su vez ayudó a definir el orden de las funciones objetivo para dar solución al problema, ya que la función objetivo inicial es la minimización de distancias para los laboratorios existentes, la función objetivo secundaria es la detección de laboratorios satélites adicionales en caso de ser necesario y su indicativo de aparición, bajo esa premisa, como fue identificado el problema la segunda función objetivo estaba bajo un alcance definido de determinar si es o no necesario, no por cuanto tiempo sería necesario, eso queda a libertad del modelo de indicar.

(R5) Cantidad de laboratorios satélites y adicionales

El modelo no busca agotar el uso de los laboratorios satélites iniciales para luego activar nuevos adicionales, sino mostrar cuándo podría resultar mejor un laboratorio extra que no se rija por la condición de tiempo de permanencia en un cuadrante.

$$\sum_i \sum_{k=1}^3 y_{ikt} \leq 3 + \sum_i u_{it} \quad \forall t$$

$$\sum_i u_{it} \leq M \sum_i \sum_{k=1}^3 y_{ikt} \quad \forall t$$

(R6) Cantidad máxima de laboratorios por cuadrante

La cantidad de laboratorios existentes en cada uno de los cuadrantes en un período de tiempo, no puede superar la unidad.

$$u_{it} + \sum_k y_{ikt} \leq 1 \quad \forall i, t$$

(R7) Restricciones de signo

$$x_{ijkt} \in \mathbb{R}^+ \cup \{0\} \quad \forall i, j, k, t$$

$$v_{ijt} \in \mathbb{R}^+ \cup \{0\} \quad \forall i, j, t$$

Finalmente, la función objetivo z1 minimiza la distancia recorrida respecto a los laboratorios satélites disponibles para cubrir la demanda en el tiempo. Mientras que la función objetivo z2 garantiza la minimización del número de laboratorios satélites adicionales requeridos para cumplir la demanda previamente satisfecha con la distancia previamente calculada como óptima.

Función objetivo

$$Z1 = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t B_{ij} y_{ikt} + \sum_i \sum_j \sum_t B_{ij} u_{it}$$

$$Z2 = \sum_i \sum_t u_{it}$$

Al final de este trabajo se adjunta el código del programa (ANEXO 3)

### 4.3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

El problema en cuestión se ha definido como un problema multiobjetivo, donde la función objetivo inicial es la minimización de distancias entre los puntos de captación de muestras y los puntos de recibo y análisis, esta información funge como alimentación para el segundo código en forma de restricción para la minimización de laboratorios satélites adicionales en caso de ser necesarios. El orden de esta selección se debe a que en primer lugar la necesidad de minimizar las distancias para cubrir una demanda existente con un recurso existente que debe ser optimizado, a partir de este resultado se puede identificar si un laboratorio adicional es requerido.

La programación multiobjetivo u optimización vectorial se enfrenta al problema de optimizar simultáneamente varios objetivos sujetos a un conjunto de restricciones, usualmente lineales. Como desde un punto de vista tanto lógico como operativo es imposible definir un óptimo cuando existen varios objetivos, la programación multiobjetivo pretende establecer el conjunto de soluciones eficientes (no dominadas o Pareto óptimas) en vez de buscar un único óptimo (Romero & Rehman, 2003).

Romero y Rehman (2003) exponen tres (3) enfoques para efectuar esta tarea, a) el método de las restricciones (constraint method), b) el método de los coeficientes de ponderación (weighting method) y c) el simplex con objetivos múltiples (multiobjective simplex).

En este caso se usó el método de las restricciones. Su idea básica consiste en optimizar uno de los objetivos, mientras que a los restantes se les incluye en el conjunto de las restricciones. Esta selección se sustenta en estudio de Romero & Rehman (2003), quienes afirman que, en términos operativos, el método de las restricciones presenta una cierta superioridad con respecto al método de los coeficientes ponderados. Los trabajos simplex multi-objetivos más conocidos pueden ser estudiados en los trabajos de Philip (1972) y Zeleny (1973).

Con respecto a las funciones objetivo presentadas en la sección 4.2.3, el método se aplicó de la siguiente forma:

- 1- Solución del modelo considerando únicamente la función objetivo para z1.
- 2- Adición de la siguiente restricción al modelo:

$$z1 \leq \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t B_{ij} y_{ikt} + \sum_i \sum_j \sum_t B_{ij} u_{it}$$

- 3- Solución del modelo considerando la nueva restricción y la función objetivo para z2

El orden de esta selección se debe a la necesidad de minimizar las distancias para cubrir una demanda existente con un recurso existente que debe ser optimizado; a partir de este resultado se puede identificar si un laboratorio adicional es requerido o no.

Para el caso del método simplex Romero & Rehman (2003) indican que la aplicabilidad de este procedimiento queda limitado a problemas multi-objetivos de muy reducido tamaño, siendo su interés práctico muy escaso. Esto llevó a la decisión de no considerar este método para el problema en cuestión, a pesar que Romero y Rehman (2013) no muestran desempeños comparativos entre este método y los otros.

Para la programación del modelo se utilizó el programa LPSOLVE y los modelos fueron ejecutados en los servidores de NEOS (<http://www.neos-server.org/neos/solvers/index.HTML>).

A continuación se muestran los resultados obtenidos a nivel de tiempo de iteración, error así como objetivo óptimo (tiempo) arrojados por el sistema NEOS.

Se realizaron cuatro (4) escenarios a partir del factor R, cuyos resultados se presentan a continuación.

**Tabla 10. Resultados NEOS – Datos Estadísticos**

RESULTADOS NEOS								
ESCENARIO	85%		90%		95%		100%	
MODELO	1° CODIGO	2° CODIGO						
TIEMPOS (seg)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,16	0,01
ERROR	1,00E-04							
ITERACIONES	34263	63250	152004	6855059	52672	142627	1619234	2039574

Fuente: Recolección de datos obtenidos por modelo generado y solventado a través del servidor NEOS  
 Código 1, primer código generado con función objetivo asociada a minimización de distancia.  
 Código 2, segundo código generado con alimentación de la distancia optimizada obtenida en el primer código con función objetivo de minimización de laboratorios adicionales.

## 5.0 RESULTADOS

Los resultados presentados a continuación, una vez aceptados, serán puestos a prueba dentro de Campo Rubiales, con el fin de verificar su aplicabilidad bajo condiciones operativas reales con respecto a la ubicación de los laboratorios satélites, es decir, como un escenario ideal y el mejor posible teórico.

Los escenarios simulados bajo el modelo desarrollado fueron del 85%, 90%, 95% y 100%, estos fueron los valores asignados al parámetro R en el modelo. Los mismos pueden ser revisados en detalle en el ANEXO 5 del presente trabajo.

Estos porcentajes seleccionados están ligados a los objetivos de producción que se tienen diariamente, así como el consolidado mensual que debe reportar la corporación ante el ministerio, socio y otros. Se tiene previsto que dependiendo del manejo del campo, éste puede alcanzar su producción diaria de crudo prevista con un 85% de operatividad del campo, porcentajes menores ponen en riesgo las metas definidas con la campaña de perforación, es por esta razón que se manejaron cuatro (4) escenarios factibles en la realidad de campo a partir de 85%.

Bajo el modelo previamente presentado se obtuvo una serie de resultados consistentes con las restricciones dispuestas y que fueron posteriormente corroboradas como parte del trabajo de verificación de datos, es decir, como se podrá observar en el ANEXO 5, se verificó que la demanda proyectada coincidiera con la demanda arrojada por el modelo, así cumpliéndose la meta.

En las tablas respectivas a los envíos de análisis se identificaron los períodos de tiempo donde los laboratorios se hacen necesarios y cómo se reubican entre las

distintas posiciones. Esta identificación no se hace visible para los casos de los laboratorios 4 y 5 ya que son fijos en el tiempo.

## 5.1. ESCENARIOS

Como se mencionó anteriormente se manejaron cuatro (4) escenarios 85, 90, 95 y 100% de demanda generada a través del factor R.

En cada uno de los escenarios se puede evidenciar que se manejan las restricciones delimitadas, principalmente se reconocen los dos (2) laboratorios sedes que no cambian de posición, la restricción con respecto a los seis (6) meses para cambio o reubicación de pozos se maneja sin inconveniente y no se sobrepasan las capacidades de cada uno de los laboratorios.

En la tabla 11 se puede observar el kilometraje óptimo por cada escenario, así como el resultado final con respecto a la necesidad de laboratorios adicionales.

**Tabla 11. Resultados de distancias obtenidos así como laboratorios totales adicionales por escenario**

ESCENARIOS	DISTANCIA TOTAL (km)	CANTIDAD DE LABORATORIOS ADICIONALES	MESES EN QUE SE USAN LABORATORIOS ADICIONALES
85%	10513548	0	0
90%	10988172	1	4
95%	11225484	0	0
100%	12150000	1	2

Fuente: Resumen de resultados obtenidos por corrida de modelo bajo distintos escenarios, Lorena Rojas W., 2014

En la tabla 12 se presentan las ubicaciones óptimas en cada escenario así como su reubicación en el tiempo. La posición que arroja el modelo como óptima de los laboratorios satélites es la posición 6 y en segundo lugar la posición 10. Cuando se observa la Figura 5 se puede observar claramente que por temas de densidad de solicitud de análisis y concentración de desarrollo del campo, ésta es la zona en conjunto con las zonas 7 y 11 de mayor demanda por número de pozos. Esto se puede resumir en la tabla 12 que identifica qué laboratorio se usa en cada uno de los escenarios y en que períodos de tiempo aparecen.

**Tabla 12. Resumen de laboratorios identificados por escenario en el tiempo**

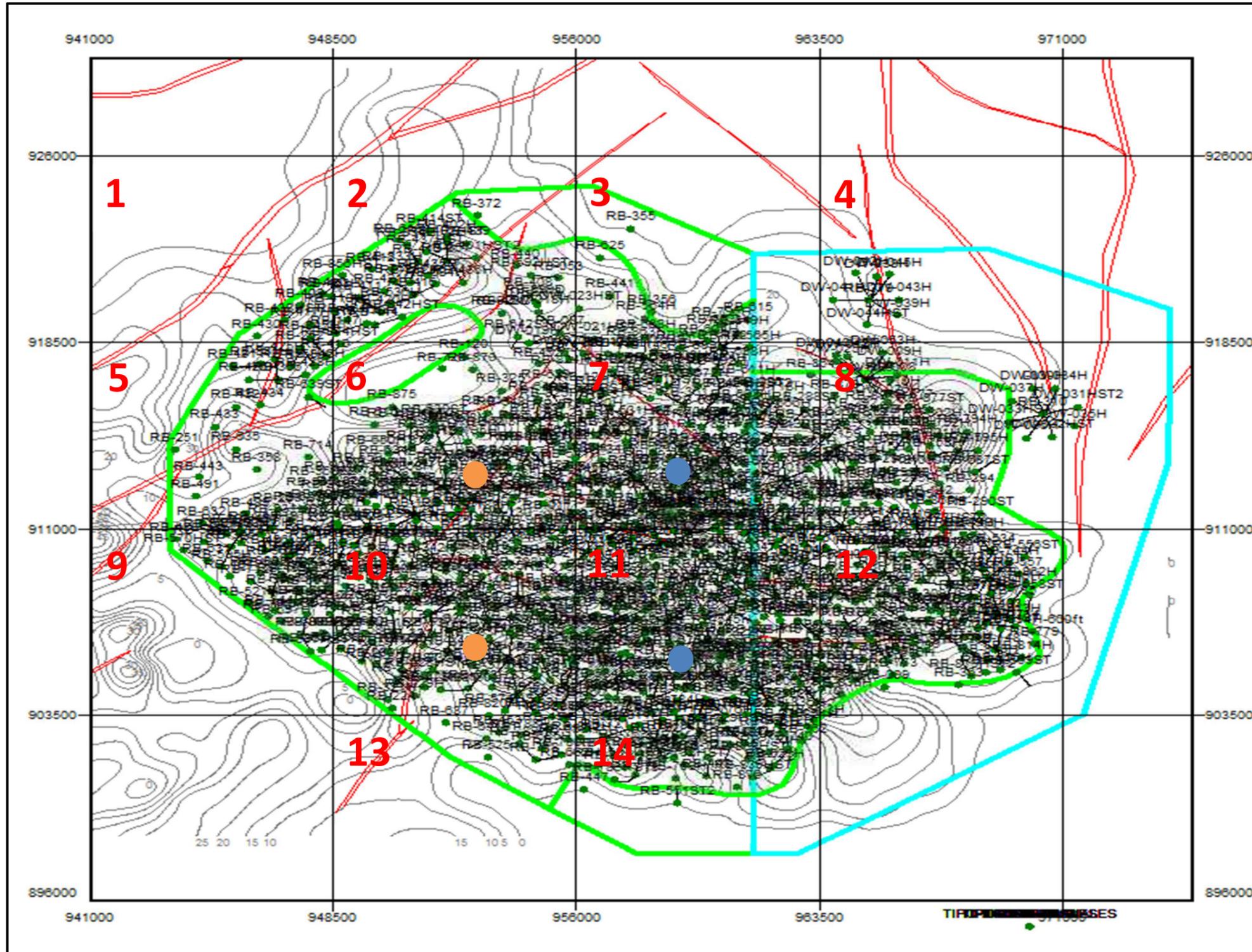
LABORATORIOS (PARTE II)					EXTRAS		
ESCENARIO	85%						
POSICIONES	1	2	3	4	5	1	2
6		25-30	24, 31-36				
7				3 AÑOS			
11					3 AÑOS		
ESCENARIO	90%						
6	20-24		25-32				
7				3 AÑOS			
11					3 AÑOS		
10						33-36	
ESCENARIO	95%						
6		18-24	25-36				
7				3 AÑOS			
11					3 AÑOS		
10		31-36					
ESCENARIO	100%						
6	19-36	18					
7				3 AÑOS			
11					3 AÑOS		
10		31-36				29-30	

Fuente: resumen de posiciones asumidas durante los 36 meses de evaluación bajo los distintos escenarios, Lorena Rojas W., 2014

Se puede evidenciar claramente los movimientos en el tiempo de cada uno de los laboratorios que se activan según la necesidad de análisis entre las posiciones disponibles para tal fin, así como la recurrencia de laboratorios adicionales.

Fácilmente perceptible la repetibilidad de los laboratorios satélites ubicados en las posiciones 6 y 10 preferiblemente sin que en ninguno de los escenarios haya presencia de otras posiciones posibles. En la siguiente figura se identifica la posición de los laboratorios fijos en azul y los laboratorios satélites seleccionados en naranja.

Figura 5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA UBICACIÓN DE LOS LABORATORIOS OBTENIDOS SEGÚN MODELO MATEMÁTICO Y ESCENARIOS



Fuente: Planos Dpto. de Optimización 2014

Entre las tablas 13 a 32, se presenta la distribución de envíos entre posiciones iniciales y cuadrante finales a partir de cada uno de los laboratorios disponibles en los distintos períodos de tiempo. Igualmente se presenta en el caso que aplique, el requerimiento de laboratorios adicionales cuando los cinco (5) iniciales disponibles no fuesen suficientes para suplir la demanda existente en un momento t en el tiempo.

### 5.1.1 ESCENARIO 85%

**Tabla 13. Escenario 85% de demanda**  
**Análisis entre posición 6 a cuadrante j de laboratorio 2 en tiempo t ( $X_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 2														
		ORIGEN	CUADRANTES DESTINO													
		6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
	26	0	0	0	0	0	39	0	0	0	0	0	19	0	0	0
	27	0	38	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	42	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	13	0
	29	0	0	0	0	0	47	0	43	0	3	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	156	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

El sombreado de filas, se realiza para recalcar y presentar fácilmente la activación de los laboratorios satélites en los distintos períodos de tiempo.

**Tabla 14. Escenario 85% de demanda**  
**Análisis entre posición 6 a cuadrante j de laboratorio 3 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 3														
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO														
6		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	24	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	31	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	91	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	57	65	0	0	16
	33	0	33	42	0	0	0	0	56	25	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	81	0	0	4	25	0	65	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	130	0	0	0	0	56	0	0	0
	36	0	0	42	0	85	0	40	0	25	0	0	0	0	0	0

**Tabla 15. Escenario 85% de demanda**  
**Análisis de posición 7 a cuadrante j de laboratorio 4 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 4															
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO															
7		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	8	13	0	6	11	0	0	0	25	0	65	0	0	0		
	2	8	13	0	0	0	0	13	27	0	57	65	0	18	13		
	3	8	14	0	0	11	0	13	0	25	0	65	112	18	0		
	4	0	14	20	6	0	0	0	0	25	57	0	120	18	14		
	5	0	14	22	0	0	0	13	27	0	57	0	127	0	0		
	6	8	0	0	0	0	0	20	0	27	25	57	65	0	0	15	
	7	8	15	25	6	11	0	0	0	0	25	57	0	0	18	0	
	8	0	0	0	6	11	0	0	0	0	25	57	65	0	18	15	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	65	146	18	0	
	10	0	16	0	0	11	0	13	27	0	57	65	0	0	0	16	
	11	8	0	27	6	0	0	0	0	0	25	57	0	153	0	0	
	12	0	0	28	0	0	0	0	0	27	25	57	65	0	18	0	
	13	8	0	0	0	11	20	13	27	25	57	0	0	0	0	16	
	14	0	17	29	6	13	0	17	27	0	57	65	0	0	0	16	
	15	0	0	0	6	15	21	23	27	25	57	65	0	0	0	0	
	16	0	20	31	0	17	0	0	0	0	25	0	0	156	18	16	
	17	8	0	32	6	20	24	0	27	25	57	0	0	0	18	0	
	18	0	23	34	6	23	26	0	0	0	25	57	0	0	18	16	
	19	8	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	65	156	0	16	
	20	8	0	37	6	0	0	0	0	27	25	0	0	0	156	18	16
	21	0	0	0	0	32	0	60	27	25	57	65	0	0	18	16	
	22	8	28	40	0	34	31	0	27	0	57	65	0	0	0	0	
	23	8	30	0	0	37	33	79	27	25	57	0	3	0	0	0	
	24	0	0	0	0	41	34	60	0	25	57	65	0	18	0	0	
	25	8	34	0	0	12	0	0	0	0	25	0	65	156	0	0	
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	57	65	137	0	16	
	27	8	0	0	6	52	0	0	0	0	57	0	0	156	18	0	
	28	8	0	0	6	23	0	104	0	0	0	0	0	156	0	3	
	29	8	43	0	0	0	0	107	0	0	0	0	65	77	0	0	
	30	0	0	42	0	0	0	91	46	0	57	0	0	0	0	16	
	31	0	48	42	6	0	0	0	49	25	0	65	65	0	0	0	
	32	8	50	0	0	0	0	118	0	23	0	0	0	101	0	0	
	33	0	20	0	0	0	0	33	0	0	57	0	156	18	16	0	
	34	0	0	0	6	0	0	127	56	0	57	0	36	18	0	0	
	35	0	0	42	0	0	60	0	0	25	57	65	33	18	0	0	
	36	8	0	0	6	0	61	22	63	0	57	65	0	18	0	0	

Para este escenario no se resaltan filas, ya que como los laboratorios fijos, como es el caso del laboratorio 4 (CPF1) están abiertos independiente del tiempo y espacio, se encuentran activos durante los 36 meses del período de evaluación, aplica de la misma forma para la tabla 16 a continuación, que hace referencia al laboratorio 5 (CPF2) fijo por igual.

**Tabla 16. Escenario 85% de demanda**  
**Análisis de posición 11 a cuadrante j de laboratorio 5 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 5													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
11		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	16	0	0	20	13	27	0	57	0	97	18	13
	2	0	0	18	6	11	20	0	0	25	0	0	105	0	0
	3	0	0	20	6	0	20	0	27	0	57	0	0	0	14
	4	8	0	0	0	11	20	13	27	0	0	65	0	0	0
	5	8	0	0	6	11	20	0	0	25	0	65	0	18	14
	6	0	15	24	6	11	0	13	0	0	0	0	134	18	0
	7	0	0	0	0	0	20	13	27	0	0	65	139	0	15
	8	8	15	26	0	0	20	13	27	0	0	0	142	0	0
	9	8	16	26	6	11	20	13	27	25	57	0	0	0	16
	10	8	0	26	6	0	20	0	0	25	0	0	150	18	0
	11	0	16	0	0	11	20	13	27	0	0	65	0	18	16
	12	8	16	0	6	11	20	13	0	0	0	0	156	0	16
	13	0	16	28	6	0	0	0	0	0	0	65	156	18	0
	14	8	0	0	0	0	20	0	0	25	0	0	156	18	0
	15	8	19	30	0	0	0	0	0	0	0	0	156	18	16
	16	8	0	0	6	0	23	28	27	0	57	65	0	0	0
	17	0	20	0	0	0	0	33	0	0	0	65	156	0	16
	18	8	0	0	0	0	0	43	27	0	0	65	156	0	0
	19	0	24	36	6	26	0	51	27	25	57	0	0	18	0
	20	0	26	0	0	29	29	58	0	0	57	65	0	0	0
	21	8	27	38	6	0	30	5	0	0	0	0	156	0	0
	22	0	0	0	6	0	0	71	0	25	0	0	156	18	16
	23	0	0	42	6	0	0	0	0	0	0	65	153	18	16
	24	8	31	42	6	0	0	14	27	0	0	0	156	0	16
	25	0	0	27	6	33	37	91	31	0	57	0	0	18	0
	26	8	36	42	6	48	0	95	34	0	0	0	0	18	0
	27	0	0	16	0	0	42	99	37	25	0	65	0	0	16
	28	0	41	0	0	34	44	0	41	0	57	65	0	18	0
	29	0	0	42	6	60	0	0	0	25	54	0	79	18	16
	30	8	46	0	6	65	48	19	0	25	0	65	0	18	0
	31	8	0	0	0	68	51	82	0	0	57	0	0	18	16
	32	0	0	42	6	72	54	0	53	0	0	0	55	18	0
	33	8	0	0	6	76	56	89	0	0	0	65	0	0	0
	34	8	55	42	0	0	59	0	0	0	0	0	120	0	16
	35	8	57	0	6	84	0	0	62	0	0	0	67	0	16
	36	0	58	0	0	0	0	70	0	0	0	0	156	0	16

Para el escenario de 85% de demanda no hay requerimiento de laboratorios adicionales, con los cinco (5) disponibles, incluso, con solo el uso de cuatro (4) laboratorios se cubre la demanda proyectada; sin incluir el laboratorio uno (1).

Si se analiza el resultado obtenido, tanto el laboratorio 2 como 3 se ubican en la posición 6 y no en simultáneo, sino presentan reubicación en el tiempo, es decir, un solo laboratorio sería necesario para cubrir la posición obtenida del modelo como óptimo, sin necesidad de hacer uso de los dos (2) laboratorios.

Dentro de las restricciones del modelo no se define que no pueden ser distintos laboratorios en una misma posición en períodos distintos de tiempo, por esta razón

el modelo está en capacidad de variar los laboratorios como se evidencia para este caso, ya que el resultado no cambia.

Incluso el laboratorio que debe ser ubicado en esta posición, no aparece sino hasta el mes 24, es decir, aun cuando los costos no están siendo considerados, ya que son laboratorios existentes, el segundo o tercer laboratorio, indiferente de cual sea seleccionado, ya que presentan la misma capacidad de análisis, sólo sería necesario a partir de un mes en específico con cierta demanda y un set de personas para atender el servicio.

En términos prácticos, que un laboratorio sólo sea requerido a partir de un tiempo específico puede ayudar a planificar a largo plazo los recursos requeridos sin necesidad de instalar puntos adicionales de análisis a partir del contrato de prestación de servicios de laboratorios.

Hay que tomar en consideración lo expuesto en secciones previas durante el trabajo, la evaluación se centra en el estudio de tres años para contratos ya previamente acordados con alcances fijos, es decir, el número de laboratorios satélites ya existen así como los recursos a ellos asignados, por esta razón, aun cuando el modelo indique bajo este estudio que hay estaciones de análisis que no sean requeridas, los contratos ya tienen presupuestos definidos.

Para la corporación, en el caso de que el modelo indique que puntos ya existentes no son necesarios si implica una reducción en personal asignado para suplir las actividades en cada laboratorio y representaría una disminución en los costos de hospedaje, transporte interno, alimentación, entre otros, que no impactan los contratos previamente adjudicados para la prestación de servicio a nivel de análisis de laboratorio, más sí significa un ahorro a nivel de presupuesto operacional a largo plazo.

En definitiva, el resultado final para el escenario de 85% es un total de tres (3) laboratorios, dos sedes que están en capacidad de asumir por los primeros 23 meses la carga de distribución de análisis y a partir del mes 24 (inicio del tercer año de evaluación) como se establece por modelo observado en la tabla 14 para ubicación en la posición 6.

Retomando la información presentada en la tabla 9 y respectivamente puesta en gráfica en la Figura 4, podemos cruzar resultados, ya que se muestra que para el año 2015 sumando el incremento de pozos en los cuadrantes 5 y 7 adyacentes al 6 y considerando su propio incremento, suma el 65% total para este año (considerando el escenario de 85% de este total), es decir, el área entre estas tres posiciones representa la mayor densidad con respecto al aumento de demanda de análisis.

5.1.2 ESCENARIO 90%

Tabla 17. Escenario 90% de demanda  
Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 1 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )

		LABORATORIO 1													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
6		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	8	2	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0
	24	8	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 18. Escenario 90% de demanda**  
**Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 3 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 3														
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO														
6		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	25	8	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	16	0	17
	26	0	0	0	6	0	0	0	36	0	0	0	41	0	0	0
	27	0	0	0	0	55	0	0	0	19	0	0	24	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	53	19	0	0
	29	0	0	0	0	0	44	0	46	26	0	0	0	19	0	0
	30	0	0	45	0	0	0	37	49	0	0	0	0	19	0	0
	31	0	0	0	0	72	0	0	34	0	60	0	0	0	0	0
	32	0	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	130	0	0	0
	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 19. Escenario 90% de demanda**  
**Análisis de posición 7 a cuadrante j de laboratorio 4 en tiempo t (x<sub>ijkt</sub>)**

		LABORATORIO 4													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
7		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	8	0	17	0	0	21	0	0	26	0	0	103	19	0
	2	0	0	19	0	12	21	14	0	0	60	69	0	19	0
	3	8	0	0	0	12	0	0	29	0	0	69	0	0	14
	4	0	14	22	0	12	0	14	29	0	60	0	127	0	0
	5	0	0	0	6	12	21	14	0	0	0	0	134	0	15
	6	8	0	25	6	0	21	14	0	0	0	69	0	19	16
	7	8	16	0	0	12	0	14	29	0	60	69	0	0	0
	8	8	0	0	0	12	21	14	29	26	60	0	0	19	0
	9	0	0	0	6	0	21	14	0	26	0	69	26	19	0
	10	0	17	0	6	0	0	14	0	0	0	69	158	19	17
	11	0	17	0	6	0	0	0	0	0	0	69	162	0	17
	12	8	0	30	6	0	0	14	29	26	0	69	0	0	17
	13	0	0	0	0	12	21	0	0	26	0	69	166	0	0
	14	0	18	31	0	14	22	18	0	26	60	69	0	0	17
	15	8	0	32	0	16	0	0	29	0	60	0	136	19	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	29	26	0	69	166	0	0
	17	8	22	0	6	0	25	0	29	26	60	69	0	19	0
	18	8	24	36	6	0	0	0	0	0	0	0	166	19	17
	19	8	25	0	6	0	29	54	29	0	60	69	0	0	17
	20	8	27	0	6	31	0	61	29	0	60	0	32	19	17
	21	0	29	0	0	0	28	42	29	26	60	69	0	0	17
	22	0	28	42	0	0	0	75	29	26	60	21	0	19	0
	23	8	32	0	6	40	35	0	0	26	60	69	24	0	0
	24	0	0	45	6	0	36	0	29	26	0	0	149	0	9
	25	0	36	0	0	48	0	0	32	0	60	0	124	0	0
	26	8	0	0	0	51	0	101	0	0	0	69	35	19	17
	27	8	40	0	6	0	0	104	0	0	0	0	142	0	0
	28	8	10	0	6	60	0	0	43	0	60	0	113	0	0
	29	8	46	45	0	64	0	0	0	0	60	69	8	0	0
	30	8	40	0	6	0	0	80	0	0	0	0	166	0	0
	31	8	50	0	6	0	54	102	18	26	0	0	0	19	17
	32	8	0	45	0	0	57	0	56	0	48	69	0	0	17
	33	0	56	0	0	0	59	130	0	0	52	0	0	0	3
	34	0	0	45	0	0	62	0	63	0	60	69	0	1	0
	35	0	0	0	0	0	64	0	0	0	0	69	166	0	1
	36	0	0	0	0	0	0	140	0	0	0	0	160	0	0

**Tabla 20. Escenario 90% de demanda**  
**Análisis de posición 11 a cuadrante j de laboratorio 5 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 5													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
11		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	14	0	6	12	0	14	29	0	60	69	0	0	14
	2	8	14	0	6	0	0	0	29	26	0	0	111	0	14
	3	0	14	21	6	0	21	14	0	26	60	0	119	19	0
	4	8	0	0	6	0	21	0	0	26	0	69	0	19	14
	5	8	15	23	0	0	0	0	29	26	60	69	0	19	0
	6	0	16	0	0	12	0	0	29	26	60	0	142	0	0
	7	0	0	26	6	0	21	0	0	26	0	0	147	19	16
	8	0	16	27	6	0	0	0	0	0	0	69	150	0	16
	9	8	17	28	0	12	0	0	29	0	60	0	129	0	17
	10	8	0	28	0	12	21	0	29	26	60	0	0	0	0
	11	8	0	29	0	12	21	14	29	26	60	0	0	19	0
	12	0	17	0	0	12	21	0	0	0	60	0	166	19	0
	13	8	17	30	6	0	0	14	29	0	60	0	0	19	17
	14	8	0	0	6	0	0	0	29	0	0	0	166	19	0
	15	0	20	0	6	0	22	24	0	26	0	69	30	0	17
	16	8	21	33	6	18	24	30	0	0	60	0	0	19	17
	17	0	0	34	0	21	0	35	0	0	0	0	166	0	17
	18	0	0	0	0	24	27	46	29	26	60	69	0	0	0
	19	0	0	38	0	28	0	0	0	26	0	0	166	19	0
	20	0	0	40	0	0	31	0	0	26	0	69	134	0	0
	21	8	0	40	6	34	0	27	0	0	0	0	166	19	0
	22	0	0	0	0	36	33	0	0	0	0	48	166	0	17
	23	0	0	44	0	0	0	84	29	0	0	0	107	19	17
	24	0	0	0	0	43	0	92	0	0	60	69	17	19	0
	25	0	0	45	6	0	39	96	0	0	0	69	26	19	0
	26	0	38	45	0	0	41	0	0	26	60	0	90	0	0
	27	0	0	45	0	0	44	0	39	7	60	69	0	19	17
	28	0	33	45	0	0	0	110	0	26	0	69	0	0	17
	29	0	0	0	6	0	6	113	0	0	0	0	158	0	17
	30	0	9	0	0	68	51	0	0	26	60	69	0	0	17
	31	0	0	45	0	0	0	20	0	0	0	69	166	0	0
	32	0	0	0	6	76	0	125	0	26	12	0	36	19	0
	33	0	0	45	0	81	0	0	0	0	8	0	166	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	134	0	0	0	0	166	0	0
	35	0	60	13	0	89	0	138	0	0	0	0	0	0	0
	36	0	9	0	0	90	65	0	67	0	0	69	0	0	0

**Tabla 21. Escenario 90% de demanda  
Laboratorios adicionales en el tiempo ( $u_{it}$ )**

		LABORATORIOS ADICIONALES													
		CUADRANTES DESTINO													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Para el escenario de 90% de demanda se refleja la necesidad de recurrir a laboratorios adicionales. Durante los 36 meses de evaluación se hace uso de cuatro (4) laboratorios en total, dos (2) fijos y dos (2) satélites, los cuales se activan en la misma posición, más aparecen en distintos períodos de tiempo, es decir, no se utiliza su capacidad total disponible en todo el plazo de tres (3) años.

Se puede observar el comportamiento de los laboratorios. El primer laboratorio satélite que se activa es en el mes 20 con el laboratorio 1 en la posición 6, luego se activa el laboratorio 3 en la posición 6 para el mes 25. Como en el caso anterior (85%), en la operación se consideraría la activación de un único laboratorio en la posición 6 sin necesidad de dos (2) grupos de personal para cubrir ambos

laboratorios y se tendría una operación continua entre los meses 20 y 32 en una única posición.

En la tabla 21 se observa el resultado del modelo con respecto a laboratorios adicionales, el modelo arroja la necesidad de 1 laboratorio adicional por cuatro (4) meses para cubrir la totalidad de la demanda, específicamente los últimos cuatro (4) meses el período de evaluación y estaría ubicado en la posición 10. El refuerzo en los últimos meses en las posiciones previamente mencionadas va en concordancia con lo expuesto en la figura 5, donde se muestra el crecimiento del campo en el tiempo; para el 2015, el mayor crecimiento y por ende demanda de análisis se concentra en las adyacencias de estos cuadrantes.

### 5.1.3 ESCENARIO 95%

**Tabla 22. Escenario 95% de demanda  
Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 2 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 2														
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO														
6		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	175	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0
	22	0	0	24	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	37	0	0	0	64	0	0	0	0	0
	24	0	3	48	7	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 23. Escenario 95% de demanda**  
**Análisis de posición 10 a cuadrante j de laboratorio 2 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 2														
		ORIGEN	CUADRANTES DESTINO													
		10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0
	32	0	0	0	7	0	0	0	59	0	0	0	0	0	0	0
	33	0	0	0	0	0	63	0	0	0	0	0	0	20	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71	20	0	0	0
	35	0	0	0	0	13	50	0	0	0	0	0	0	0	18	0
	36	0	0	0	0	0	68	0	0	0	0	1	0	0	18	0

**Tabla 24. Escenario 95% de demanda**  
**Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 3 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO3														
		ORIGEN	CUADRANTES DESTINO													
		6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	48	0	0	31	0	0	28	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	44	0	38	0	0	0	22	20	0	0
	27	0	43	48	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	18	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	68	86	0	0	0
	29	9	0	0	0	67	0	0	48	28	0	25	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	175	1	18	0
	31	9	0	48	7	0	0	0	0	0	0	0	116	20	0	0
	32	0	0	48	0	0	0	57	0	28	0	0	67	0	0	0
	33	0	0	0	7	86	0	0	0	0	64	0	25	0	18	0
	34	9	62	0	7	28	66	0	0	28	0	0	0	0	0	0
	35	0	64	48	7	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	9	0	48	0	0	0	71	0	0	0	72	0	0	0	0

**Tabla 25. Escenario 95% de demanda**  
**Análisis de posición 7 a cuadrante j de laboratorio 4 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 4													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
7		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	9	14	0	0	0	22	0	0	0	64	0	0	20	14
	2	0	0	20	7	0	22	14	0	28	0	0	117	20	0
	3	9	15	22	7	0	0	14	0	0	0	0	125	0	15
	4	0	0	23	0	12	0	14	30	0	0	73	134	0	0
	5	9	16	25	0	0	0	14	30	0	0	0	142	0	16
	6	0	0	0	7	12	22	14	0	0	0	0	150	20	17
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	123	0	0
	8	0	17	0	0	12	0	14	0	0	0	73	159	0	0
	9	0	18	0	0	0	0	0	0	28	64	73	6	0	18
	10	0	0	29	0	12	22	14	30	28	64	0	12	0	0
	11	0	0	0	7	0	0	0	0	0	64	73	54	0	18
	12	0	0	0	0	12	0	0	0	0	40	73	175	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	28	64	0	175	0	0
	14	0	19	32	7	14	23	19	0	28	0	73	0	0	18
	15	0	21	33	7	0	0	0	0	0	64	0	155	20	0
	16	9	0	0	7	19	0	31	0	0	0	73	100	0	18
	17	0	0	0	7	0	0	0	30	0	0	73	175	0	0
	18	9	0	38	0	26	28	48	30	28	64	0	0	1	18
	19	0	0	0	0	0	0	57	0	28	64	73	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	65	0	28	41	73	93	0	0
	21	0	0	0	0	0	33	62	30	0	0	0	175	0	0
	22	0	31	21	0	0	0	79	0	0	0	0	169	0	0
	23	0	0	47	7	42	0	88	0	23	0	73	0	20	0
	24	0	0	0	0	46	0	97	0	28	0	73	56	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	18	34	0	0	73	175	0	0
	26	9	40	0	0	54	0	0	0	28	64	73	32	0	0
	27	9	0	0	7	58	47	0	41	28	64	26	0	20	0
	28	9	0	0	0	0	49	116	0	0	0	0	89	0	0
	29	0	0	48	7	0	0	120	0	0	0	0	125	0	0
	30	0	0	37	0	72	54	0	0	0	64	73	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	57	58	0	0	53	73	59	0	0
	32	9	56	0	0	0	0	0	0	0	0	73	108	0	18
	33	9	59	0	0	0	0	35	63	28	0	73	0	0	0
	34	0	0	48	0	0	0	0	66	0	64	0	104	0	18
	35	9	0	0	0	0	17	145	0	28	64	0	17	20	0
	36	0	0	0	0	0	0	76	70	0	0	0	154	0	0

**Tabla 26. Escenario 95% de demanda**  
**Análisis de posición 11 a cuadrante j de laboratorio 5 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 5													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
11		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	18	7	12	0	14	30	28	0	73	108	0	0
	2	9	14	0	0	12	0	0	30	0	64	73	0	0	14
	3	0	0	0	0	12	22	0	30	28	64	73	0	20	0
	4	9	15	0	7	0	22	0	0	28	64	0	0	20	15
	5	0	0	0	7	12	22	0	0	28	64	73	0	20	0
	6	9	17	27	0	0	0	0	30	28	64	73	0	0	0
	7	9	17	28	7	12	22	14	30	28	64	0	32	20	17
	8	9	0	28	7	0	22	0	30	28	64	0	0	20	17
	9	9	0	29	7	12	22	14	30	0	0	0	157	20	0
	10	9	18	0	7	0	0	0	0	0	0	73	155	20	18
	11	9	18	30	0	12	22	14	30	28	0	0	117	20	0
	12	9	18	31	7	0	22	14	30	28	24	0	0	20	18
	13	9	18	31	7	12	22	14	30	0	0	73	0	20	18
	14	9	0	0	0	0	0	0	30	0	64	0	175	20	0
	15	9	0	0	0	17	24	26	30	28	0	73	20	0	18
	16	0	22	35	0	0	26	0	30	28	64	0	75	20	0
	17	9	23	36	0	22	27	37	0	28	64	0	0	20	18
	18	0	26	0	7	0	0	0	0	0	0	73	175	19	0
	19	9	27	40	7	29	30	0	30	0	0	0	0	20	18
	20	9	28	42	7	32	32	0	30	0	0	0	82	20	18
	21	9	30	43	7	36	0	11	0	28	64	0	0	20	18
	22	9	0	0	7	38	35	0	30	0	64	73	6	20	18
	23	9	33	0	0	0	0	0	30	5	0	0	175	0	18
	24	9	32	0	0	0	38	0	0	0	64	0	119	20	18
	25	9	38	0	7	50	10	84	0	0	64	0	0	20	18
	26	0	0	48	7	0	0	106	0	0	0	0	121	0	18
	27	0	0	0	0	0	0	110	0	0	0	0	175	0	0
	28	0	46	48	7	64	0	0	0	28	64	5	0	20	18
	29	0	48	0	0	0	52	0	0	0	64	48	50	20	18
	30	9	51	11	7	0	0	124	51	28	0	0	0	19	0
	31	0	53	0	0	76	0	70	55	28	0	0	0	0	18
	32	0	0	0	0	81	60	75	0	0	64	0	0	20	0
	33	0	0	48	0	0	0	102	0	0	0	0	150	0	0
	34	0	0	0	0	62	0	142	0	0	0	73	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	69	0	0	73	158	0	0
	36	0	65	0	7	95	0	0	0	28	64	0	21	20	0

La interpretación a los resultados obtenidos, es el uso de cuatro (4) laboratorios, dos (2) satélites que se mueven entre las posiciones 6 y 10 del plano, sin requerimiento de laboratorios satélites adicionales.

Como se puede observar en las tablas, el laboratorio 2 se ubica entre la posición 6 y 10 en el tiempo, mientras que el laboratorio 3 se mantiene estático en esta misma posición (6) partir del mes 25. Si los resultados aquí presentados fuesen aplicados a la operación en campo, el laboratorio 3 que está ubicado en la posición 6 debería activarse en el mes 18, así habría continuidad en el tiempo bajo la premisa de un solo laboratorio, que según el modelo implica dos trabajos que están asignados a dos (2) laboratorios, consecuentemente, el laboratorio 2 cubriría la posición 10 sin inconveniente por el período que el modelo indique.

Se puede ver una clara tendencia hacia estas dos posiciones (6 y 10) y si se solapa con la información de la FIGURA 5, tiene sentido ya que la proyección de crecimiento para finales de 2015 tiende hacia esta área del plano, primero se cubre con la posición 6 y cuando este no es capaz de asumir el crecimiento de demanda se activa la posición 10 con un laboratorio adicional.

#### 5.1.4 ESCENARIO 100%

**Tabla 27. Escenario 100% de demanda**  
**Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 1 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 1													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
6		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0	0
	21	0	0	0	7	0	0	0	32	0	33	0	0	0	0
	22	0	0	0	7	0	0	0	0	0	67	0	11	0	0
	23	0	35	5	0	44	0	0	0	0	0	0	0	21	0
	24	0	0	0	0	28	0	0	32	0	0	0	22	21	19
	25	0	0	3	0	53	0	0	0	0	67	0	0	0	19
	26	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	150	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77	100	0	0
	28	0	0	0	0	67	0	122	0	0	0	0	11	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	158	0	0
	31	0	0	0	7	0	0	0	0	0	67	0	0	21	0
	32	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140	0	0
	33	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	84	0	0
	34	0	65	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	21	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	123	21	0
	36	9	0	0	0	0	25	0	0	0	0	77	0	21	0

**Tabla 28. Escenario 100% de demanda**  
**Análisis de posición 6 a cuadrante j de laboratorio 2 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 2													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
6		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	9	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 29. Escenario 100% de demanda**  
**Análisis de posición 10 a cuadrante j de laboratorio 2 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 2													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
10		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	31	0	56	0	0	0	0	135	0	0	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	0
	33	0	62	0	0	0	0	51	0	0	68	0	0	19	0
	34	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	150	0	0	0
	35	0	0	0	0	99	0	0	0	29	0	54	0	0	0
	36	0	0	50	7	22	47	0	74	0	0	0	0	0	0

**Tabla 30. Escenario 100% de demanda**  
**Análisis de posición 7 a cuadrante j de laboratorio 4 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 4													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
7		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	9	0	0	7	0	23	0	32	29	67	0	0	21	0
	2	9	15	21	0	0	0	15	0	29	0	0	123	0	15
	3	9	16	23	0	0	23	0	32	29	0	0	132	0	16
	4	0	16	0	0	13	23	15	32	0	0	0	141	0	16
	5	9	0	0	0	0	0	15	32	29	0	0	149	21	17
	6	9	18	0	0	13	23	0	0	0	0	0	158	21	0
	7	9	0	0	7	13	23	0	32	0	67	77	0	21	0
	8	0	0	0	7	13	23	15	0	0	0	0	167	0	18
	9	9	19	0	7	0	0	0	0	29	67	77	0	21	19
	10	9	19	0	7	0	0	0	0	29	0	0	176	0	0
	11	0	0	0	0	13	0	0	32	29	0	0	180	0	19
	12	9	19	0	7	13	0	15	32	0	0	0	184	21	0
	13	9	19	0	0	0	0	0	32	29	0	0	184	0	19
	14	9	0	34	0	15	24	20	0	29	67	77	0	0	0
	15	9	22	0	7	18	0	27	0	0	0	0	184	0	19
	16	9	23	37	0	20	27	33	32	29	0	56	0	0	19
	17	0	24	38	7	23	0	39	32	29	67	0	0	21	19
	18	0	27	0	0	27	30	51	21	29	67	29	0	0	19
	19	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	77	184	21	0
	20	9	0	44	0	0	0	68	0	0	0	77	81	21	0
	21	0	32	45	0	38	0	0	0	0	34	0	130	21	0
	22	0	33	47	0	40	37	0	0	0	0	0	103	21	19
	23	0	0	0	0	0	39	0	0	10	67	0	184	0	0
	24	0	0	0	7	0	0	102	0	29	0	0	162	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	107	0	0	0	0	184	9	0
	26	0	42	0	0	57	0	112	40	0	49	0	0	0	0
	27	0	0	50	0	61	0	116	0	0	67	0	6	0	0
	28	0	0	0	0	0	52	0	0	29	67	77	35	21	19
	29	0	0	50	0	0	55	0	0	0	0	0	184	0	11
	30	0	0	0	0	0	57	130	0	17	0	77	0	0	19
	31	0	0	50	0	0	60	0	0	0	0	0	184	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	139	0	29	67	0	44	21	0
	33	9	0	0	0	0	66	0	66	29	0	9	100	21	0
	34	0	0	0	7	0	69	149	70	0	0	5	0	0	0
	35	9	0	0	0	0	71	0	73	0	67	0	61	0	19
	36	0	0	0	0	78	0	155	0	0	67	0	0	0	0

Como en casos anteriores, para este particular, no se hace sombreado, ya que el laboratorio está activo durante los 36 meses del período de estudio.

**Tabla 31. Escenario 100% de demanda**  
**Análisis de posición 11 a cuadrante j de laboratorio 5 en tiempo t ( $x_{ijkt}$ )**

		LABORATORIO 5													
ORIGEN		CUADRANTES DESTINO													
11		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	15	19	0	13	0	15	0	0	0	77	114	0	15
	2	0	0	0	7	13	23	0	32	0	67	77	0	21	0
	3	0	0	0	7	13	0	15	0	0	67	77	0	21	0
	4	9	0	24	7	0	0	0	0	29	67	77	0	21	0
	5	0	17	26	7	13	23	0	0	0	67	77	0	0	0
	6	0	0	28	7	0	0	15	32	29	67	77	0	0	18
	7	0	18	29	0	0	0	15	0	29	0	0	163	0	18
	8	9	18	30	0	0	0	0	32	29	67	77	0	21	0
	9	0	0	31	0	13	23	15	32	0	0	0	172	0	0
	10	0	0	31	0	13	23	15	32	0	67	77	0	21	19
	11	9	19	32	7	0	23	15	0	0	67	77	0	21	0
	12	0	0	33	0	0	23	0	0	29	67	77	0	0	19
	13	0	0	33	7	13	23	15	0	0	67	77	0	21	0
	14	0	20	0	7	0	0	0	32	0	0	0	184	21	19
	15	0	0	35	0	0	25	0	32	29	67	77	0	21	0
	16	0	0	0	7	0	0	0	0	0	67	21	184	21	0
	17	9	0	0	0	0	28	0	0	0	0	77	184	0	0
	18	0	0	40	7	0	0	0	0	0	0	48	184	21	0
	19	0	0	42	7	31	32	60	32	29	67	0	0	0	0
	20	0	30	0	7	34	34	0	32	29	67	0	48	0	19
	21	9	0	0	0	0	35	77	0	29	0	77	54	0	19
	22	9	0	0	0	0	0	83	32	29	0	77	70	0	0
	23	9	0	44	7	0	0	93	32	19	0	77	0	0	19
	24	9	37	50	0	20	40	0	0	0	67	77	0	0	0
	25	9	40	47	7	0	43	0	36	29	0	77	0	12	0
	26	9	0	0	7	0	46	0	0	29	18	77	34	21	19
	27	9	45	0	7	0	49	0	43	29	0	0	78	21	19
	28	9	48	50	7	0	0	0	48	0	0	0	138	0	0
	29	0	0	0	0	71	0	126	26	0	0	77	0	0	0
	30	9	0	50	7	76	0	0	54	0	67	0	0	21	0
	31	9	0	0	0	80	0	0	58	29	0	77	0	0	19
	32	9	5	50	7	85	63	0	62	0	0	0	0	0	19
	33	0	0	50	0	90	0	93	0	0	67	0	0	0	0
	34	9	0	0	0	95	0	0	0	29	42	72	34	0	19
	35	0	67	50	7	0	0	153	0	0	0	23	0	0	0
	36	0	68	0	0	0	0	0	0	29	0	0	184	0	19

**Tabla 32. Escenario 100% de demanda  
Laboratorios adicionales en el tiempo ( $u_{it}$ )**

		LABORATORIOS ADICIONALES NECESARIOS PARA CUBRIR LA DEMANDA													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PERIODO EN EL TIEMPO DE 3 AÑOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Para el escenario 100% la disposición de laboratorios que arroja el modelo es distinta, el laboratorio 3 no es necesario, mientras que el laboratorio 2 se ubica tanto en el cuadrante 6 como en el 10 cubriendo los últimos períodos de tiempo en conjunto con el laboratorio 1, mientras que los laboratorios fijos como en el caso del escenario de 95%, cubren la demanda.

Se requiere en el período de 31 a 36 meses una disponibilidad de análisis ubicada en el cuadrante 10 como en el 6, adicionalmente se requiere durante un (1) mes en el mes 18, que es el primer mes con disponibilidad activa de un laboratorio satélites.

De la misma forma que en el escenario 95%, como se evidencia en la Figura 5, esto va en concordancia con el crecimiento del campo donde esta zona es la que se ve fortalecida en demanda de análisis.

A nivel operativo, es decir, una vez sean aplicadas las propuestas que se presentarán a continuación, la activación de laboratorios en las distintas ubicaciones resultantes, para el caso del escenario del 100% de demanda, no hay necesidad de ubicar un laboratorio satélite en la posición 6 con el laboratorio 2, simplemente se inicia con el laboratorio 1 en el mes 18 como se indica en la tabla 28 y continua su servicio.

En la tabla 32 se precisa la necesidad de 1 laboratorio satélite por dos meses (29 y 30) en la posición 10, considerando que dentro de los laboratorios satélites existentes está un laboratorio activo en esta posición con el laboratorio 2 a partir del mes 31, en vez de añadir un recurso extra, la operación permitiría la activación de este laboratorio con dos (2) meses de anticipación, sin la necesidad de incurrir en la adición del laboratorio al servicio prestado. Nuevamente se reduciría el personal necesario para ubicar en cada laboratorio que indica el modelo.

## **6.0. POLÍTICAS DE APLICACIÓN**

La ubicación actual real de los laboratorios satélites se presenta en la tabla 1. El laboratorio del cluster 218 se encuentra en el cuadrante 10, el laboratorio del rubiales 128 se encuentra en el cuadrante 6 y el que se encuentra en BATERÍA 3 está ubicado en el cuadrante 8.

Bajo esta premisa el modelo arroja resultados que concuerdan con la realidad, en el caso del rubiales 128 (cuadrante 6) y cluster 218 (cuadrante 10) y justamente el laboratorio 3, que es el de BATERÍA 3 ubicado en el cuadrante 8 no tiene mayor utilidad por su posición. A continuación se presentan algunas propuestas a partir de los resultados obtenidos:

1. En las premisas de este trabajo se indicó que se consideraría el centro del cuadrante como el punto focal de envío y recibo de muestras para análisis. Bajo este supuesto, se propone trasladar los laboratorios en estas dos (2) posiciones a la ubicación del centro del cuadrante como se mantiene por supuesto del modelo, y a futuro y como revisión interna de la compañía, verificar si en efecto se cumple la cobertura de demanda sin inconvenientes.
2. A partir de los resultados del modelo, se reconfirma que las ubicaciones actuales exceptuando la respectiva al cuadrante 8 (BATERÍA 3) son óptimas, y deben ser reforzadas en el tiempo, por ende se solicitará la eliminación del laboratorio de BATERÍA 3 ubicado en la posición 8 del plano.
3. En las tablas de resultados se evidencia la distribución de muestras entre posiciones y cuadrantes en el tiempo como distribución óptima para los distintos escenarios, a partir de esta información se plantea que el plan de

muestreo de pozos en los distintos cuadrantes se guíe a partir de esta distribución.

4. Finalmente se reafirma el uso y necesidad de activación del laboratorio 5 (CPF2) para cubrir las áreas adyacentes. Como se ha mencionado en la sección 2.1 del trabajo (SITUACION ACTUAL DE LA COMPAÑÍA) el mismo no está operativo actualmente, más dentro de los supuestos del modelo se incluye su capacidad de análisis; es decir, el plan de acción a seguir es la activación del punto de muestreo.

## **7.0 CONCLUSIONES**

El modelo cumple con las necesidades estipuladas bajo el concepto de distintos escenarios de demanda solicitada, así como disponibilidad por temas operativos internos logísticos, se confirman las posiciones 6 y 10 como de mayor preferencia de ubicación con respecto a los laboratorios satélites, reforzando su capacidad de análisis, y eliminando la posición 8 a través del laboratorio satélite de BATERÍA 3 actualmente ubicado en esta posición, adicionalmente, se reafirma el laboratorio 5 (CPF2) como ubicación preferencial para su uso.

El principal objetivo del trabajo era la búsqueda de posiciones optimizadas para satisfacer una demanda que actualmente tiene problemas de cobertura, con este plan de acción, las posiciones ubicadas preferencialmente (6 y 10), la eliminación de una posición ociosa (Posición 8), así como un plan de distribución de muestras optimizadas por el programa, la cual podría incurrir en modificación de rutas establecidas actualmente, esperamos que la implementación de esta línea base sea exitosa.

En conclusión, la corporación ahora cuenta con una herramienta a través de la cual puede extrapolar distintas situaciones así como campañas de perforación y/o aumentos en la demanda para abastecer al campo con el número adecuado de laboratorios y ubicaciones, sin necesidad de mantener laboratorios ociosos que impliquen desgaste de personal para entrega de análisis a posiciones ineficaces, así como implementación y uso de personal que no son requeridos como se evidenció en los distintos escenarios previamente presentados.

Se considerará como una herramienta de planificación para los distintos campos con los que cuenta la corporación actualmente, es aplicable a procesos licitatorios donde los costos asociados a posibles laboratorios adicionales deben implementarse en el estudio de costos.

Finalmente, implica un ahorro a la corporación por planificación de recursos de forma anticipada, no solo asociado al servicio prestado a nivel de análisis de laboratorio, sino para la corporación a nivel de logística y personal soporte involucrado, punto que a la fecha no había sido considerado para estos temas de laboratorio, ya que a la fecha el estudio se centró en recursos preexistentes.

## 8.0 LINEAS DE TRABAJO FUTURO

Partiendo de los resultados obtenidos y considerando trabajos futuros, se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

1. Incluir ruteo y recorridos para la distribución de análisis entre posiciones iniciales y cuadrantes destinos, como se indicó al principio del trabajo, este punto no fue considerado dentro de los alcances y objetivos del proyecto. Sería beneficioso completar los resultados obtenidos con rutas óptimas para el uso de las ubicaciones previamente expuestas. Debido a la propuesta de eliminación del laboratorio de BATERÍA 3 en la posición 8 así como la interpretación en aplicabilidad de los resultados del modelo, deberán ser alteradas las rutas actuales que se manejan en campo Rubiales.
2. Buscar la optimización de tiempos con respecto a la entrega de muestras en cada uno de los puntos destino, ya que el modelo actual sólo se buscaba la optimización a partir de la minimización de las distancias recorridas, con información de las rutas así como puntos de atención en campo como el límite de velocidad por directrices de HSEQ se pueden plantear escenarios de reducción de tiempo, igualmente con el fin de reducir el personal necesario para los recorridos así como maximización de entregas y posibles aumentos en el monitoreo.
3. Aun cuando los cuadrantes delimitados por el área de yacimientos son de 14 cuadrantes, podría ser beneficio duplicar el número de los mismos con el fin de obtener distancias más exactas en el desarrollo del trabajo así como prever actualizaciones en el tiempo con respecto a las coordenadas y afinación de zonas de interés con respecto a la perforación de nuevos pozos. Esto implicaría trabajos más cortos en el tiempo sin provisiones a largo plazo debido a su carácter de actualización.
4. Finalmente, extrapolar el modelo a otros campos con distintas condiciones de operatividad, ya que no todos los campos de PACIFIC RUBIALES ENERGY siguen las mismas directrices debido a las asociaciones en las que se encuentra actualmente.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Ares, F. (2003) Business plan de una empresa de transporte de mercancías, pp 48-63.
- Aponte Penagos & Rosas Castro, (2009) Propuesta de solución al problema de localización de centros de distribución basándose en la Meta Heurística GRASP.
- Aronofsky JS, Williams AC. The use of linear programming and mathematical models in underground oil production. *Manage Sci* 1962;8(4):394e407.
- Canel,C., Khumawala, B.M., (1997), Multi-period international facilities location: An algorithm and application, *International Journal of Production Economics* 35.
- Canel, C., Khumawala, B.M.,Law, J., Loh, A., (2005), An algorithm for the capacitated, multi-commodity multi-period facility location problem.
- Contrerasa, I., Fernándezb, E., Reineltc, G., (2001), Minimizing the maximum travel time in a combined model of facility location and network design.
- Chen, L., Olhager, J., Tang, O., *Manufacturing Facility Location and sustainability: A literature review and research agenda*, Elsevier, 2014
- Current, J., Daskin, M., & Schilling, D. (2001). *Discrete Network Location Models*. In: *Facility Location Theory: Applications and Methods*, pp. 85-112. Berlin: Z. Drezner and H. Hamacher Eds.
- Current, J., Min, H. & Schillin, D. (1990), *Multiobjective analysis of facility location decisions*, *European Journal of Operational Research* 49, 295-307, North Holland
- Current, J., Min, H.& Schillin, D., (2002). *Facility Location: Applications and Theory Discrete network location models*. In: Drezner, Z., Hamacher, H. (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, p.81–118.
- Daskin, M., Snyder, L., & Berger, R. (2003). *Facility Location in Supply Chain Design*. Working paper, No. 03-010. Northwestern University.
- Duarte A., Sarache W., Costa Y., *A facility-location model for biofuel plants: Applications in the Colombian context*, 2014
- Durukan, A., Lim, J., (1990), *A decomposition approach for facility location and relocation problem with uncertain number of future facilities*.
- Zanjirani Farahani R., Asgari N., Heidari N., Hosseininia M. Goh M., *Covering problems in facility location: A review*, 2012
- Boloori, A., Zanjirani Farahani R., *Facility location dynamics: An overview of classification s and applications*, Elsevier, 2012.
- Guajardo M., Kylinger M, Rönnqvist M., *Speciality oils supply chain optimization: From a decoupled to an integrated planning approach*, 2013

Hakimi, S. (1964). Optimum location of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12, 450-459.

Haugland, D., Jornsten, K., Shayan, E., Modelling Petroleum fields with movable platforms, *Appl. Math. Modeling*, 1991, Vol. 15, January.

Heungjo An W., Wilhelm E., Searcy S., Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: A literature review, 2011

Melo, M.T., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Facility location and supply chain management – A review, *European Journal of Operational Research* 196 (2009) 401-412.

Pacific Rubiales Energy, Reporte de Sostenibilidad, 2013

Papageorgiou LG. Supply chain optimisation for the process industries: advances and opportunities. *Comput Chem Eng* 2009;33(12):1931–8.

Rentizelas A., Tatsiopoulos I., Locating a bioenergy facility using a hybrid optimization method, 2010

Revelle, C.S., Eiselt, H.A., Location analysis: A synthesis and survey, *European Journal of Operational Research*, Vol. 165, pag. 1-19, 2005

Romero, C., Rehman, T., Multiple Criteria analysis for agricultural decisions, Vol. 11, Pages 1-186, 2003

Sahebia H., Nickela S, Ashayeric J. Strategic and tactical mathematical programming models within the crude oil supply chain context—A review , 2014

Shapiro JF. Challenges of strategic supply chain planning and modeling. *Comput Chem Eng* 2004;28(6):855–61.

Shen, Z.-J.M. & Daskin, M.S., 2005. Trade-off between Customer service and cost in integrated supply chain design. *Manufacturing & Service Operations Management*, pp.7, 3; *ABI/INFORM Global* pg. 188.

Subhash, D., Multi-criteria multi-facility location in Niwai block, Rajasthan, NIILM Centre for Management Studies, Greater Noida, UP, India 2012.

# **ANEXOS**

# **ANEXO 1**

# **ANEXO 2**

# **ANEXO 3**

## CODIGO PARTE I

```
# conjuntos
param POSICIONES;
param CUADRANTES;
param LABORATORIOS;
param TIEMPO;

set I:=1 .. POSICIONES;
set J:=1 .. CUADRANTES;
set K:=1 .. LABORATORIOS;
set T:=1 .. TIEMPO; #tiempo en meses, equivalente a 3 años

#parametros
param b{i in I, j in J}; #distancia de posicion i a cuadrante j
param S{k in K}; #capacidad satélite k
param d{j in J, t in T}; #demanda por cuadrante j en tiempo t
param R{t in T}; #reducción en demanda por pozo debido a pozos cerrados
param M; #NUMERO MUY GRANDE

# Variable definitions
var x{i in I, j in J, k in K, t in T} integer, >= 0; /*cantidad empleada de posicion i en cuadrantes j en tiempo t*/
var y{i in I, k in K, t in T} binary; #laboratorio satélite k en posicion i para tiempo t
var u{i in I, t in T} binary; #cantidad empleada de posicion i en cuadrantes j en tiempo t
var v{i in I, j in J, t in T} integer, >=0; #laboratorio satelite k en posicion i para tiempo t

#RESTRICCIONES
#oferta de cada laboratorio para análisis
subject to oferta{k in K, t in T, i in I}: sum{j in J} x[i,j,k,t] <= S[k] * y[i,k,t];
subject to restriccion_empalme{i in I, j in J, t in T}: v[i,j,t] <= M * u[i,t];

#existencia para cada laboratorio
subject to existencia_laboratorios{k in K, t in T}: sum{i in I} y[i,k,t] <= 1;
subject to laboratorioCPF1{t in T}: y[7,4,t] = 1;
subject to laboratorioCPF2{t in T}: y[11,5,t] = 1;

#demanda de analisis por cuadrante
subject to demanda{j in J, t in T}: sum{i in I} v[i,j,t] + sum{i in I, k in K} x[i,j,k,t] = round(d[j,t] * R[t]);

#movilidad restringida mínimo cada 6 meses
subject to movilidad1{i in I, k in 1 .. 3, t in T: t=1 or t=7 or t=13 or t=19 or t=25 or t=31}: y[i,k,t] = y[i,k,t+1];
subject to movilidad2{i in I, k in 1 .. 3, t in T: t=1 or t=7 or t=13 or t=19 or t=25 or t=31}: y[i,k,t+1] = y[i,k,t+2];
subject to movilidad3{i in I, k in 1 .. 3, t in T: t=1 or t=7 or t=13 or t=19 or t=25 or t=31}: y[i,k,t+2] = y[i,k,t+3];
subject to movilidad4{i in I, k in 1 .. 3, t in T: t=1 or t=7 or t=13 or t=19 or t=25 or t=31}: y[i,k,t+3] = y[i,k,t+4];
subject to movilidad5{i in I, k in 1 .. 3, t in T: t=1 or t=7 or t=13 or t=19 or t=25 or t=31}: y[i,k,t+4] = y[i,k,t+5];

#RESTRICCION ASOCIADA A NUMERO DE SATELITES REQUERIDOS
subject to minimo_de_satelites1{t in T}: sum{i in I, k in 1 .. 3} y[i,k,t] <= 3 + sum{i in I} u[i,t];
subject to minimo_de_satelites2{t in T}: sum{i in I} u[i,t] <= M * sum{i in I, k in 1 .. 3} y[i,k,t];

#máximo un laboratorio por cuadrante en cada instante de tiempo
subject to existencia_laboratorios_adicionales{i in I, t in T}: sum{k in K} y[i,k,t] + u[i,t] <= 1;

# Funcion Objetivo
minimize distancia: sum{i in I, j in J, k in K, t in T : i <> j} b[i,j] * y[i,k,t] + sum{i in I, j in J, t in T : i <> j} b[i,j] *
u[i,t];
end;
```

## CODIGO PARTE II

```
# conjuntos
param POSICIONES;
param CUADRANTES;
param LABORATORIOS;
param TIEMPO;

set I:=1 .. POSICIONES;
set J:=1 .. CUADRANTES;
set K:=1 .. LABORATORIOS;
set T:=1 .. TIEMPO; #tiempo en meses, equivalente a 3 años

#parametros
param b{i in I, j in J}; #distancia de posicion i a cuadrante j
param S{k in K}; #capacidad satelite k
param d{j in J, t in T}; #demanda por cuadrante j en tiempo t
param R{t in T}; #reduccion en demanda por pozo debido a pozos cerrados
param M; #NUMERO MUY GRANDE

# Variable definitions
var x{i in I, j in J, k in K, t in T} integer, >= 0; /*cantidad empleada de posicion i en cuadrantes j en tiempo t*/
var y{i in I, k in K, t in T} binary; #laboratorio satelite k en posicion i para tiempo t
var u{i in I, t in T} binary; #cantidad empleada de posicion i en cuadrantes j en tiempo t
var v{i in I, j in J, t in T} integer, >= 0; #laboratorio satelite k en posicion i para tiempo t
var z1; #valor de la función objetivo 1

#RESTRICCIONES
#oferta de cada laboratorio para analisis
subject to oferta{k in K, t in T, i in I}: sum{j in J} x[i,j,k,t] <= S[k] * y[i,k,t];
subject to restriccion_empalme{i in I, j in J, t in T}: v[i,j,t] <= M * u[i,t];

#existencia para cada laboratorio
subject to existencia_laboratorios{k in K, t in T}: sum{i in I} y[i,k,t] <= 1;
subject to laboratorioCPF1{t in T}: y[7,4,t] = 1;
subject to laboratorioCPF2{t in T}: y[11,5,t] = 1;

#demanda de analisis por cuadrante
subject to demanda{j in J, t in T}: sum{i in I} v[i,j,t] + sum{k in K} x[i,j,k,t] = round(d[j,t] * R[t]);

#movilidad restringida minimo cada 6 meses
subject to movilidad1{i in I, k in 1 .. 3, t in T: t=1 or t=7 or t=13 or t=19 or t=25 or t=31}: y[i,k,t] = y[i,k,t+1];
subject to movilidad2{i in I, k in 1 .. 3, t in T: t=1 or t=7 or t=13 or t=19 or t=25 or t=31}: y[i,k,t+1] = y[i,k,t+2];
subject to movilidad3{i in I, k in 1 .. 3, t in T: t=1 or t=7 or t=13 or t=19 or t=25 or t=31}: y[i,k,t+2] = y[i,k,t+3];
subject to movilidad4{i in I, k in 1 .. 3, t in T: t=1 or t=7 or t=13 or t=19 or t=25 or t=31}: y[i,k,t+3] = y[i,k,t+4];
subject to movilidad5{i in I, k in 1 .. 3, t in T: t=1 or t=7 or t=13 or t=19 or t=25 or t=31}: y[i,k,t+4] = y[i,k,t+5];

#RESTRICCION ASOCIADA A NUMERO DE SATELITES REQUERIDOS
subject to minimo_de_satelites1{t in T}: sum{i in I, k in 1 .. 3} y[i,k,t] <= 3 + sum{i in I} u[i,t];
subject to minimo_de_satelites2{t in T}: sum{i in I} u[i,t] <= M * sum{i in I, k in 1 .. 3} y[i,k,t];

#maximo un laboratorio por cuadrante en cada instante de tiempo
subject to existencia_laboratorios_adicionales{i in I, t in T}: sum{k in K} y[i,k,t] + u[i,t] <= 1;

#funcion objetivo 1
subject to calculo_z1: z1 = sum{i in I, j in J, k in K, t in T: i <> j} b[i,j] * y[i,k,t] + sum{i in I, j in J, t in T: i <> j}
b[i,j] * u[i,t];
subject to distancia: z1 <= XXX;

# Funcion Objetivo
minimize lab_extras: sum{i in I, t in T} u[i,t];
```

# **ANEXO 4**

# **ANEXO 5**