

# ciencia y cultura cruceña

Revista de la ANCB-SC | Año 3 | Nº 3

SCIENTIA  
CRUCENSIS  
— ANCB-SC —

#03



# ciencia y cultura cruceña

Revista de la ANCB-SC | Año 3 | Nº 3

SCIENTIA  
CRUCENSIS  
— ANCB-SC —

**EDITOR:**  
Gastón Mejía Brown

Santa Cruz de la Sierra - Bolivia, 2022

Revista editada en el marco del programa UPSA - ANCB-SC.

Edición financiada por la Fundación Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra - UPSA.

<b>EDITOR</b>	Gastón Mejía Brown
<b>DIAGRAMACIÓN</b>	Yoshimi Iwanaga M.
<b>CONSEJO EDITORIAL</b>	Gastón Mejía Brown Roberto Antelo Scott

© Abril 2022

ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS DE BOLIVIA-DEPARTAMENTAL SANTA CRUZ (ANCB-SC)

Av. Paraguá y 4to. Anillo

Tel.: +591 (03) 346 4000 | Fax: +591 (03) 346 5757

Casilla 2944

Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

### DERECHOS DEL AUTOR

Prohibido la reproducción total o parcial de la presente obra por cualquier medio sin citar expresamente la fuente.

*Los artículos publicadas son de entera responsabilidad de los autores y no representan la posición de la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia-Departamental Santa Cruz (ANCB-SC).*

### AUTORIDADES ACADÉMICAS

#### PRESIDENTE

Acad. Gastón Mejía Brown

#### VICE PRESIDENTE CIENCIAS DE LA CULTURA

Acad. Victor Hugo Limpías Ortiz

#### VICE PRESIDENTE CIENCIAS DE LA NATURALEZA

Acad. Francisco García Gutiérrez

#### SECRETARIO GENERAL

Acad. Ricardo Marcelo Michel Villazón

#### TESORERO

Acad. Marion K. Schulmeyer Dávalos

#### VOCALES

Acad. Carmen Rosa Serrano Nurnberg

Acad. Herland Vaca Diez Busch

#### ACADÉMICOS CONSEJEROS

Acad. Alcides Parejas Moreno

Acad. Mario Suárez Riglos

#### ACADÉMICOS DE NÚMERO

Acad. Juan Manuel Navarro Ameller

Acad. Ramón Harald Schulczewski

Acad. Ramiro Suárez Soruco

Acad. Marisol Toledo

Acad. Wendy R. Townsend (†)

#### ACADÉMICO DE HONOR

Acad. Lauren Müller de Pacheco

# ÍNDICE

---

- 7 PRÓLOGO**
- 9 ARTÍCULOS**
- 11 RECUPERACIÓN MEJORADA EN RESERVORIOS DE GAS-CONDENSADO NATURALMENTE FRACTURADOS DE BOLIVIA (ZONA BOOMERANG / PIE DE MONTE)**  
*Pedro Marcelo Adrián Herbas y Thalia Alejandra Simsovic Castellanos*
- 51 ¿ELASTICIDAD PRECIO DE LA CONTRIBUCIÓN?**  
*Carlos Hugo Barbery Alpire*
- 55 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE QUEMAS SOBRE LA RIQUEZA Y DIVERSIDAD DE AVES EN EL MUNICIPIO DE CONCEPCIÓN**  
*Anahi Cosky Paca Condori, Betty Flores Zanabria y Margarita Balcázar Solís*
- 69 PRODUCTION CAPACITY ESTIMATION OF THE DEVELOPMENT ZONE OF RIO GRANDE FIELD THROUGH INTEGRATED PRODUCTION MODELLING**  
*Brayan Jhamil Cuba Silva y Ricardo Marcelo Michel Villazón*
- 77 ESCENARIOS DE CAMBIO DE USO DEL SUELO PARA GARANTIZAR LA PROVISIÓN DE AGUA SUPERFICIAL. CASO ESTUDIO: SAN RAFAEL (SANTA CRUZ)**  
*Andrea Markos*

---

**89 PRONÓSTICO INTEGRADO DE PELIGRO DE INCENDIOS  
FORESTALES EN TIEMPO REAL**

*Andrea Markos*

**99 EVALUACIÓN GENERAL DE LA DEMANDA SÍSMICA  
EN LA CIUDAD DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA Y  
ZONAS ADYACENTES**

*Oswaldo Aquiles Rosales Sadud*

# PRÓLOGO

---

## En el futuro cercano, ¿Mas Inteligencia Artificial y menos Inteligencia Humana?

Estamos en un siglo en que la Inteligencia Artificial (IA) comienza a consolidar una posición cada vez más importante en las actividades que son exclusivas del ser humano, hecho que nos lleva a analizar la causa del mismo.

Analizo inicialmente, qué se entiende por Inteligencia Humana (IH) y encuentro que, sobre ello, no hay un consenso como lo muestran las concepciones generadas sobre el particular por Charles Spearman que indica que es la capacidad unitaria para resolver problemas o por Lloyd Girtton Humphreys que la define como un conjunto de habilidades que permiten al ser vivo adaptarse mejor a su entorno o por Alfred Binet que establece que es la capacidad adaptativa para resolver un problema, todas engendradas bajo conceptos competidores como capacidad de lógica, entendimiento, percepción, planificación, conocimiento emocional, creatividad, resolución de problemas y aprendizaje, lo que me lleva a considerar que la definición que logra Max Tegmark es más amplia en su alcance al decir que es la **habilidad para lograr objetivos complejos**, concepto que implica la existencia de diversas posibilidades de inteligencia en función de alcanzar diversos objetivos, que engloba a concepciones formuladas durante el siglo XX como la **teoría de las inteligencias múltiples** de Howard Gardner con ocho inteligencias: lingüística, lógica-matemática, musical, espacial, corporal-cinestésica, intrapersonal, interpersonal y naturalista; como la posterior **Teoría triárquica de la inteligencia** de Robert J. Sternberg con tres categorías: componencial-analítica, exponencial-creativa y contextual-práctica y, a fines del siglo XX, como la **Inteligencia Emocional** de Daniel Goleman

organizada en cinco niveles: conocer las emociones y sentimientos propios, reconocerlos, manejarlos, crear la propia motivación, y manejar las relaciones.

En este contexto, en consecuencia, es importante establecer que la inteligencia humana no es resultado del conocimiento ni de la cultura adquiridas, ni lo es de la capacidad mental de realizar cálculos matemáticos rápidamente ni la de ser un orador reconocido con capacidad verbal elevada aunque, todo ello, está relacionado con alguna de las inteligencias descritas anteriormente pero, sí es expresión de la capacidad intrínseca para entender las situaciones y deducir o imaginar soluciones a problemas complejos.

Esto me lleva a valorar la dificultad que significa para el ser humano el ejecutar diversas tareas en las áreas física, social y técnica que, niño, en buenas condiciones de salud, se inicia en ellas como lo es en la interacción social, en el reconocimiento de las palabras, en la comprensión de la aritmética o en la interpretación artística del mundo que lo rodea y aprende, a lo largo de su vida, a realizarlas adecuadamente, proceso que lleva a analizar la llamada paradoja de Moravec, quien indica que el cerebro humano realiza estas tareas, fácilmente, utilizando más del 25 por ciento de su capacidad pero, que es más fuerte en áreas que desde hace mucho tiempo son importantes para su supervivencia pero débil en áreas que supera y las deja atrás como memorizar o ser capaz de desarrollar operaciones aritméticas que ahora se encuentran realizadas eficientemente por instrumentos electrónicos como calculadoras, teléfonos inteligentes o computadoras con habilidades instrumentales que muestran una capacidad singular para llevarlas a cabo pero no integral y amplia como lo hace el cerebro humano aun cuando cumplen con el concepto generado por Alan

Turing, a mediados del siglo XX, de los **computadores universales**, concepto que lleva a considerar que lo mismo podría ocurrir con la Inteligencia Artificial que, si se cuenta con el tiempo y los recursos necesarios, sea capaz de alcanzar el nivel crítico de una **inteligencia universal**, es decir, de reproducir la capacidad y condiciones de cualquier entidad inteligente como lo es el ser humano.

Hablé de Inteligencia Artificial (IA) y debo explicar qué se entiende por ello, estableciendo que hay una variedad de conceptos, entre ellos, que constituye un sistema inteligente capaz de escribir su propio programa o que es una estructura de programación capaz de almacenar y utilizar un conocimiento sobre un área determinada que se traduce en su capacidad de aprendizaje, puntualizando que, en este marco, la IA se clasifica, según Russell y Norvig, en **pensar como humanos** (redes neuronales artificiales utilizadas en transformar palabras expresadas en un texto escrito o en traducirlas a otros idiomas o en su uso en conducción automática de vehículos) y en **actuar como humanos** (la robótica) o **en pensar racionalmente** (los sistemas expertos) y **en actuar racionalmente** (las conductas inteligentes en artefactos).

Ahora bien, hay cuatro áreas principales de acción en IA: verificación, validación, seguridad y control (VVSC) en las que se generaron experiencias valiosas como lo muestra el exitoso programa Mars 2020 y el rover Perseverance, en materia de verificación y control; los mercados de criptomonedas y financiero como tal, con recursos monetarios eficientemente utilizados y transferidos a una altísima velocidad, permitiendo el financiamiento desde hipotecas hasta nuevos emprendimientos, en materia de validación y seguridad; con procesos industriales eficientes y precisos, controlados por robots o la industria de impresoras 3D que permiten fabricar prototipos de todo tipo, en materia de seguridad y control; en la conducción de vehículos bajo control IH-IA, contribuyendo a disminuir accidentes

vehiculares al 10%, en carreteras y en ciudades, en materia de control; en energía (operación eficiente y segura de plantas de generación eléctrica), en salud (digitalización de registros médicos, apoyo profesional a distancia de especialistas en diagnóstico, intervenciones quirúrgicas realizadas por robots o relación genes y enfermedades) y en comunicaciones (Internet de las Cosas con beneficios en eficiencia, precisión, conveniencia y economía), estos tres últimos en una conjunción de las cuatro áreas VVSC, y, en los últimos días, según la BBC, Blake Lemoine, especialista en IA de la empresa Google, pone en conocimiento del mundo que dicha empresa ha creado y es operable, una máquina de inteligencia artificial, denominada **LaMDA** que cobra vida, piensa, siente y mantiene conversaciones como una persona humana pero, que la empresa, la considera un modelo convencional actual que no siente y que tiende a seguir las indicaciones y las preguntas que se le formulan.

Esto último me lleva a preguntar ¿podrá el ser humano enfrentar un futuro con dominio de la IA, en el que se encontrará sin empleo ni será empleado? Unos dicen que el futuro no es ese pero que será para personas creativas que utilicen y controlen la tecnología o para aquellos involucrados en profesiones totalmente nuevas, emergentes de la simbiosis IH-IA que es a lo que el ser humano debe aspirar y, otros indican, que la IA dominará al final todas las facetas de acción del ser humano y no habrá trabajo para el ser humano, pasando a ser un ser pasivo que recibirá un salario básico sin condición alguna y le proporcionarán productos y servicios gratuitos sin pedirlos, básicamente, un estadio **donde no da uso a su Inteligencia Humana y en el que hay un dominio total de la Inteligencia Artificial**, al que se espera no llegar pero, si se produce, se habrá dejado atrás la actual vida 2.0, la de la **evolución cultural** e ingresado a la vida 3.0, la de la **evolución tecnológica**, en la que la tecnología será dueña de su propio destino y no sujeta a cambios evolutivos y el ser humano, básicamente, un espectador.

# ARTÍCULOS

*Los artículos publicados son de entera responsabilidad de los autores y no representan la posición de la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia-Departamental Santa Cruz (ANCB-SC).*



# RECUPERACIÓN MEJORADA EN RESERVORIOS DE GAS-CONDENSADO NATURALMENTE FRACTURADOS DE BOLIVIA (ZONA BOOMERANG / PIE DE MONTE)<sup>1</sup>

Pedro Marcelo Adrián Herbas<sup>2</sup> y Thalia Alejandra Simsovic Castellanos<sup>3</sup>

## INTRODUCCIÓN

La investigación e implantación de métodos de recuperación mejorada en reservorios naturalmente fracturados, es un proceso complejo. Sin embargo, se han logrado avances en el entendimiento del flujo de los fluidos de inyección y su interacción con el sistema matriz-fractura, dando lugar a mecanismos de recuperación según características de los fluidos inyectados.

En 1970, diferentes empresas operadoras comenzaron a buscar fuentes de gas no hidrocarbonadas a causa de que el gas natural no estaba disponible en ciertas zonas geográficas o era muy costoso para reinyectarlo. Es así como la inyección de  $CO_2$  y de  $N_2$  fueron los sustitutos al gas natural (C1). En 1973, se realizó el primer proyecto de inyección de  $N_2$  en el campo Ventura, CA, operado por la empresa Mobil. Hasta 1977, el nitrógeno provenía de plantas de gas inerte y, a partir de 1980,

se modificó para trabajar con plantas separadoras de aire (Clancy, Gilchrist, Cheng, Bywater, 1985, pp. 1,2).

El nitrógeno se seleccionó en 1980 como un gas de inyección, debido a propiedades físicas como densidad y viscosidad que son favorables y propiedades químicas. Siendo un gas inerte, previene los efectos adversos como corrosión, a condiciones de reservorio. El  $N_2$ , por su menor densidad con respecto al hidrocarburo, preferencialmente, se mantiene en el tope del reservorio (Xingru, 2013, pp. 1,6,7).

La primera prueba de desplazamiento de gas-gas fue llevada a cabo en Hungría, campo Budafa Szinfelleti, entre 1986 y 1994, constituyendo la primera vez que se llevaba a cabo una comparativa entre el desplazamiento por  $CO_2$  y por  $N_2$ . Durante el proceso de desplazamiento de metano con  $N_2$ , la recuperación fue aproximadamente de 69% cuando el gas producido contenía 1% de impurezas y bajo las mismas condiciones, utilizando  $CO_2$  fue aproximadamente de 67%. Esta investigación mostró que la recuperación mediante ambos métodos es bastante similar siendo la diferencia menor al 5% (A.T Turta, 2008, pp. 2, 4-5).

1 Programa UPSA-ANCB-SC.

2 Docente UPSA, Miembro del Consejo de Investigaciones de la ANCB-SC.

3 Ingeniero de Petróleo y Gas Natural, UPSA.

En 2008, se realizó un estudio por Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC) y Exxon Mobil para evaluar la conveniencia de inyectar  $N_2$  en un ciclo de gas en un reservorio de gas condensado. En esta investigación, se identificaron distintos aspectos: La presión de saturación aumenta, pero, aun así, es menor que la presión de reservorio; La inyección de  $CO_2$  brinda factores mayores de recobro que la inyección de  $N_2$ , pero, la diferencia es bastante mínima. Se debe considerar que el costo de una inyección de  $CO_2$  es mayor si los recursos no están cercanos al reservorio; Se recomienda instalar plantas criogénicas (Unidades Separadoras de Aire) para extraer el  $N_2$ ; La inyección de  $N_2$  genera un impacto marginal en la producción de NGL de menos del 1%; La velocidad de inyección de  $N_2$  es un factor importante que afecta al rápido incremento de la concentración de  $N_2$  en los pozos productores (Linderman et al., 2008, pp. 5,6,7,8).

En 2010, se investigó los medios para aplazar la irrupción (breakthrough) del  $N_2$  inyectado para aliviar este en caudales y especificaciones de producción, para así minimizar los cambios en las instalaciones. Se presentaron diferentes opciones para manejar la irrupción de  $N_2$  en los pozos productores: Redistribuir la porción de producción/inyección con el tiempo; Incrementar el "Make-Up" gas utilizado para barrer componentes mediante un detector para minimizar la ampliación de la banda; Reciclar los gases de combustión; Instalar una unidad de rechazo de  $N_2$  para separar el  $N_2$  del metano (Abdulwahab, 2010, pp. 2,3,4).

En 2016, se llevó a cabo una investigación para evaluar y comparar gases de inyección diferentes en reservorios Naturalmente Fracturados de Gas-Condensado Iranies. Se probó la inyección de  $CO_2$ ,  $C_1$ ,  $N_2$  y el gas producido dando como resultado que, en cuanto a la recuperación de condensado se refiere, el mejor gas de inyección es  $CO_2$  debido a que extrae mayor cantidad de hidrocarburos pesados y requiere una presión de miscibilidad menor. Otro parámetro evaluado fue la presión de reservorio en el tiempo, encontrando, en esta evaluación, que el mejor gas es  $N_2$  debido a que es capaz de ocupar un volumen poral mayor y mantener la presión de reservorio. Por último, se realizó una comparación del incremento del punto de rocío, dando como resultado que  $N_2$  incrementa el punto de rocío más que  $CO_2$  generando un factor de recuperación menor (Hashemi Fath et al., 2016, pp. 6,7,8).

## OBJETIVO DEL ESTUDIO

Evaluar la recuperación mejorada de gas-condensado mediante inyección de nitrógeno en un reservorio naturalmente fracturado. El proyecto se evalúa mediante simulación numérica, analizando el impacto de la Inyección de Nitrógeno en la eficiencia de recuperación de hidrocarburos, utilizando el software comercial CMG (Computer Modeling Group).

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

La presente propuesta tiene como objetivos específicos:

- Construir un modelo de simulación prototipo de doble porosidad, a partir de datos similares al campo de estudio.
- Realizar la optimización del caudal de inyección de nitrógeno buscando maximizar la recuperación de hidrocarburos.
- Construir el modelo de simulación estático y dinámico para el reservorio naturalmente fracturado del campo de estudio.
- Evaluar distintos escenarios de Inyección de Nitrógeno con el fin de maximizar la recuperación de hidrocarburos.
- Evaluar la factibilidad económica del proyecto.

## JUSTIFICACIÓN

Los principales yacimientos de gas en Bolivia tienen la característica de ser naturalmente fracturados debido a los esfuerzos de compresión a nivel regional. Este tipo de reservorios, generalmente, son altamente heterogéneos en términos de porosidad y permeabilidad en los que la red de fracturas proporciona la permeabilidad (alta) y la matriz el almacenamiento necesario para los hidrocarburos. Usualmente, presentan una declinación rápida en producción y porcentajes de recuperación bajos, y contienen la cantidad de reservas mayor a nivel mundial. Estas fracturas naturales, generalmente, se dan en rocas carbonatadas; sin embargo, en Bolivia, se presentan en rocas siliciclásticas de edad devónica.

Por otro lado, un reservorio de gas-condensado tiene la característica de retener en los poros un volumen de condensado considerable debido al efecto de condensación retrógrada, que ocurre cuando la presión de reservorio (depletado luego de un determinado tiempo de producción) esté por debajo de la presión de rocío (presión de saturación). En este sentido, los vaores de recuperación de

condensado bajos que presenta este tipo de reservorio, los convierte en candidatos para la implantación de métodos de recuperación mejorada de gas (EGR), tales como inyección de  $N_2$ ,  $CO_2$  o  $C_2$ , entre otros. Si este tipo de fluido es almacenado en un reservorio naturalmente fracturado, la inyección de gas es problemática y desafiante.

Problemas como canalización del fluido de inyección mediante la red de fracturas, están presentes en reservorios con presencia de fracturas naturales. El fluido inyectado, tiende a fluir por la red de fracturas, rápidamente, hacia los pozos productores, en lugar de desplazar el condensado o gas remanente de la matriz, de manera uniforme. La selección del método de recuperación mejorada depende de la evaluación económica siendo, justamente, la función objetivo, la "Maximización del VAN" (Valor Actual Neto).

## METODOLOGÍA

La presente investigación es de tipo Cuantitativa Exploratoria-Explicativa (Hernandez, Fernandez, y Baptista, 2014). Tiene el propósito de evaluar la recuperación mejorada de gas-condensado mediante inyección de nitrógeno en un yacimiento naturalmente fracturado. Debido al carácter secuencial y probatorio, se examina un tema que aún no ha sido aplicado ni estudiado, en los campos bolivianos. Además de la descripción de conceptos, también se explica el por qué ocurren algunos fenómenos y bajo qué condiciones se manifiestan.

La investigación tuvo base en una revisión bibliográfica de proyectos de recuperación mejorada con inyección de nitrógeno en campos de gas-condensado naturalmente fracturados y la recopilación y análisis de los datos del reservorio en estudio.

Posteriormente, se desarrolló la simulación numérica en la que se considera dos escenarios. El primero, la construcción de un modelo estático que provee una evaluación simple del proceso. El segundo, la construcción del modelo dinámico ajustado que represente adecuadamente las condiciones de producción del reservorio, ambos, generados por el simulador comercial CMG.

Los resultados obtenidos, mediante inyección de nitrógeno, fueron comparados con un caso base, es decir, un escenario sin inyección, para evaluar el impacto sobre producción y mantenimiento de la presión.

## RESERVORIOS NATURALMENTE FRACTURADOS

Los reservorios naturalmente fracturados se encuentran, en su mayoría, en formaciones carbonatadas que contienen fisuras producidas por esfuerzos de compresión, y en fracturas de tipo tectónicas que se generan por movimientos como plegamientos y fallas (Reiss, 1980, p. 11).

**Aguilera (1980)** define los reservorios naturalmente fracturados (RNF) como reservorios que contienen fracturas creadas por la naturaleza que tienen un efecto positivo o negativo en el flujo de los fluidos. La presencia de fracturas, separan la roca en varios bloques llamados matrices y proveen mayores canales de permeabilidad alta para la movilización del flujo.

**Pirson (1953)** fue el primer autor en describir cualitativamente los RNF como una estructura de un medio con doble porosidad. **Barenblatt (1960)** basa su estudio en la descripción propuesta por Pirson y propone una formulación para solucionar el movimiento de los fluidos en RNF, introduciendo el concepto de dos medios para cada punto en el espacio  $P_1$  y  $P_2$  refiriéndose tanto a la matriz como a las fracturas.

Distintos autores han propuesto métodos para la representación de estos yacimientos, en base a las condiciones que describen el flujo entre el sistema matriz-fractura, para modelos de flujo inter-poroso con comportamientos Pseudoestables (Warren y Root 1963; Odeh 1965; Mayo y Cinco Ley 1979; Da Pratt 1981; Blassingame 1986) y para comportamientos de flujo inter-poroso transiente (Kazemi 1969; De Swann 1976; Najurieta 1980; Cinco Ley y Samaniego 1982; Serra et al. 1983). Se describen los empleados por la industria.

**Warren y Root (1963)** propusieron un modelo geométrico para los reservorios naturalmente fracturados, asociándolos a un modelo homogéneo de doble porosidad con un comportamiento pseudoestable donde la transferencia entre la matriz y las fracturas ocurre instantáneamente. El modelo consiste en la superposición de dos sistemas porosos con porosidad primaria y porosidad secundaria. Para esta idealización, se debe cumplir con las características de ser bloques de matriz idénticos y homogéneos. En cuanto a la solución a la ecuación de difusividad, añadieron dos parámetros ( $\lambda$ ) y ( $\omega$ ) que caracterizan la interacción en el sistema matriz-fractura.

$$\omega = \frac{(\varphi C_t)_f}{(\varphi C_t)_f + (\varphi C_t)_m} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\lambda = \alpha \frac{K_m}{K_f} (r_w^2) \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

$\omega$ : Coeficiente de almacenamiento fractura-matriz [adimensional]

$\lambda$ : Coeficiente de flujo inter-poroso [adimensional]

$\alpha$ : Factor de forma [1/ft<sup>2</sup>]

$c_t$ : Compresibilidad total [psi<sup>-1</sup>]

$\phi$ : Porosidad [adimensional]

$k$ : Permeabilidad [md]

$r_w$ : Radio del pozo [ft]

$f$ : Subíndice Fractura

$m$ : Subíndice Matriz

El factor de forma se define por la relación:

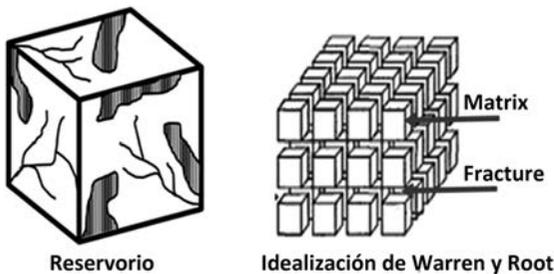
$$\alpha = \frac{4n(n+2)}{L^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde:

$n$ : Número de caras abiertas al flujo ( $n = 3$  para geometría de cubo)

$L$ : Espaciamiento de fracturas [ft]

Figura 1. Idealización del sistema, Warren y Root (1963)



Fuente: Warren and Roots, 1963, p. 2

**Kazemi (1969)** idealiza el modelo de Warren y Root como un set de capas horizontales con fracturas horizontales entre ellas, considerando un flujo transiente entre el Sistema matriz-fractura. Años más

tarde, **De Swann (1976)**, presenta una descripción analítica para la solución propuesta por Warren y Root y Kazemi, pero, asume una geometría esférica para la representación de los yacimientos naturalmente fracturados. **Serra et al. (1983)** mejoraron el modelo analítico actualizando el coeficiente de flujo interporoso ( $\lambda$ ) y el coeficiente de almacenamiento ( $\omega$ ) donde se incluye el parámetro de espesor. Este modelo asume un régimen de flujo transiente y una geometría similar presentada por Kazemi, De Swann y Najurieta 1980.

$$\omega' = \frac{\varphi_m C_m h_m}{\varphi_f C_f h_f} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\lambda' = \alpha \left( \frac{K_m h_m}{K_f h_f} \left( \frac{r_w^2}{h_m^2} \right) \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

donde:

$\omega'$ : Coeficiente de Almacenamiento [adimensional]

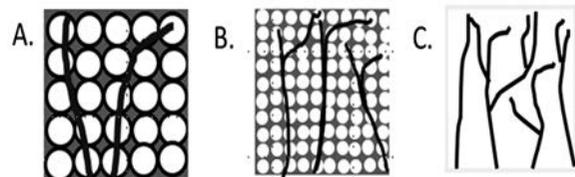
$\lambda'$ : Coeficiente de flujo inter-poroso [adimensional]

$h_m$  Espesor de la matriz

$h_f$  Espesor de la fractura

**Aguilera (2010)** propone una clasificación llamada ABC de los reservorios naturalmente fracturados en base a la capacidad de almacenaje del Sistema Matriz-Fractura.

Figura 2. Clasificación ABC de los Reservorios Naturalmente Fracturados



Fuente: Aguilera, 2010, p. 1

**Tipo A.** La capacidad de almacenaje en la matriz porosa es grande en comparación con la capacidad de almacenaje en las fracturas. Se muestra en la parte inferior de la figura 2 A, que un porcentaje reducido de la porosidad total está constituido de Fracturas (Aguilera, 2010, p.1).

**Tipo B.** Esquema de rocas con aproximadamente la misma capacidad de almacenaje en la matriz

de fractura y en la porosidad (figura 2 B). La matriz tiene porosidades reducidas, fracturas que proveen aproximadamente la mitad del almacenaje de hidrocarburos y la permeabilidad necesaria para dejar fluir el fluido (Aguilera, 2010, p.1).

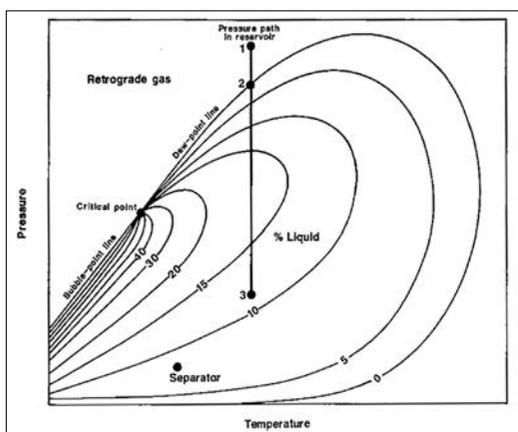
**Tipo C.** Esquema de rocas donde la matriz porosa es cero y la capacidad de almacenamiento está en las fracturas (figura 2 C). Si hubiera una distinción clara entre macros y microfracturas, en este tipo de reservorios, se presenta un comportamiento de doble porosidad, donde las microfracturas juegan el rol de matriz y las macro fracturas vienen a ser las fracturas (Aguilera, 2010, p.1).

## RESERVORIOS DE GAS CONDENSADO NATURALMENTE FRACTURADOS

En la composición típica de una mezcla de hidrocarburos de un reservorio de gas condensado, predomina el metano (>65%) como en el caso de los reservorios de gas seco y húmedo, aunque, la cantidad relativa de hidrocarburos pesados es considerablemente mayor. Un gas-condensado es un gas con líquido disuelto (Rojas, 2003, pp. 24-25).

El diagrama de fase (Figura 3) presenta el punto crítico hacia la derecha de la fase envolvente. Estos cambios se deben a que el gas retrógrado contiene un porcentaje alto de HC pesados. Se observa que la temperatura crítica es menor a la temperatura del reservorio. En el punto 1, el reservorio es de gas y, a medida que la presión del reservorio disminuye, se alcanza el punto de rocío en el punto 2 y los líquidos se van condensando (Rojas, 2003, p. 25).

Figura 3. Diagrama de Fase de un Gas Condensado



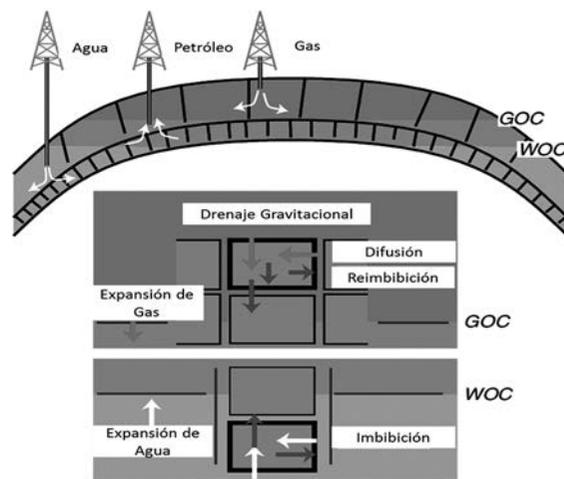
Fuente: McCain, 1990, p. 154

## MECANISMOS DE RECUPERACIÓN EN RNF

Los mecanismos de Recuperación en Reservorios Naturalmente Fracturados (RNF), en relación con los principios de recuperación con los reservorios convencionales, recae en la importancia de las cantidades (Reiss, 1980, p 25).

Las fracturas juegan un rol básico debido a que actúan como conexión entre la matriz de hidrocarburo y los pozos. La combinación de una matriz de porosidad alta y permeabilidad reducida y de una fractura de porosidad reducida y permeabilidad alta es clave en el desempeño de los poros (Reiss, 1980, p. 25).

Figura 4. Mecanismos de recuperación en yacimientos naturalmente fracturados



Fuente: Lemonnier and Bourbiaux, 2010 p. 241

Los mecanismos son:

### a. Drenaje Gravitacional

Efectos combinados de dos grupos de fuerza, las gravitacionales, debido a la diferencia de densidades entre el petróleo y el agua o el gas, y las capilares, debidas a la interacción de las fuerzas de superficie dentro de los poros que juegan un rol en la sustitución de la matriz de petróleo por agua o gas en las fracturas (Reiss, 1980, pp. 28-30).

### b. Expansión

Proceso debido en grado alto a las propiedades de la matriz y del fluido. La presencia de canales de flujo implica que la expansión es uniforme en la matriz. Las fracturas juegan un rol importante en depleción. La presión declina uniformemente debido a que las fracturas proveen un drenaje adecuado y el

petróleo está activo y no existe corte de porosidad ni permeabilidad (Reiss, 1980, pp. 25-28).

### c. Convección y difusión

Estos términos son ignorados cuando se trata de reservorios convencionales, debido a las escalas de tiempo requeridas antes de que sus efectos se vuelvan significativos. La presencia de una red de canales de permeabilidad alta acelera este fenómeno (Reiss, 1980, p. 31).

- **Convección.** Resultado de la inestabilidad producida por la presencia de petróleo en la cresta del reservorio con peso mayor que en la base. Las fracturas verticales en reservorios proveen la comunicación de convecciones que tiene lugar de modo que se restablezca el equilibrio (Reiss, 1980, pp. 31-32).
- **Difusión.** Movimiento de las moléculas causado por un movimiento "browniano" o un gradiente composicional que se debe al contraste en las propiedades de los hidrocarburos, entre la red de fracturas y la matriz. Puede tomar lugar entre el gas y el petróleo, que permite la sudación, o entre petróleos con diferente composición (Reiss, 1980, pp. 31-32).

Según varios autores, la difusión es uno de los mecanismos principales de recuperación en RNF y es particularmente importante durante la inyección de gases debido a que puede retrasar el fenómeno de canalización. Sin embargo, existen otros autores que investigaron el rol de la difusión en función a diferentes parámetros como el espaciamiento de las fracturas y la densidad de las mismas, concluyendo que la difusión puede ser ignorada si se tiene un espaciamiento de fracturas menor a 40 pies ya que a medida que los bloques de matriz disminuyen, la difusión se vuelve menos significativa (Ayala, 2004, p. 12).

## RECUPERACIÓN MEJORADA DE GAS CONDENSADO EN RNF

Las operaciones de recuperación de hidrocarburos, tradicionalmente, han sido divididas en tres etapas (Hawkins, 2015, pp. 405-406).

**Recuperación Primaria.** Producción Inicial con desplazamiento por energía natural del Yacimiento.

**Recuperación Secundaria.** Inyección tanto de agua como de gas y se aplica luego de la declinación de la etapa de producción Inicial.

**Recuperación Terciaria o Mejorada.** Se aplica cuando el yacimiento se encuentra en una declinación acentuada y se refiere a la aplicación de distintos métodos como térmicos, químicos o la inyección de gases que no están presentes en el Yacimiento.

En reservorios de gas – condensado existen complejas transiciones de las fases químicas y físicas resultando en mecanismos de desarrollo complejos con bastantes problemas como daños por líquidos, bloqueo de hidratos, carga de líquidos en el pozo y avance de gas. Para un desarrollo efectivo de este tipo de reservorios, se debe considerar, de manera integral, la geología, el tipo de depósito, el contenido de líquidos y los indicadores económicos. Se describen los principales autores que investigaron el efecto de la inyección de gases en reservorios naturalmente fracturados de Gas-condensado.

**Castelijns-Hagoort (1984)** presenta modelos de flujo analíticos que describen la condensación retrógrada y el drenaje posterior en los sistemas matriz-fractura. Ellos encontraron que el drenaje de condensado en las fracturas no es responsable de la acumulación de condensado. Por otro lado, el drenaje de condensado en la matriz puede ser significativo en las regiones donde el espaciamiento de fracturas no es ni pequeño ni grande.

**Ayala et al. (2004)** describen los mecanismos de recuperación en un reservorio de gas-condensado naturalmente fracturado y enfatizan el rol de la difusión en bloques de matriz extremadamente estrechos, que contribuyen en la recuperación de hidrocarburos. Ellos investigaron los diferentes efectos del espaciamiento de fracturas. Finalmente, de acuerdo con los resultados, la difusión puede ser ignorada si el espaciamiento de fractura es menor a 40 pies, debido a que la difusión se vuelve menos significativa a medida que los bloques de matriz disminuyen.

**Subero (2009)** presenta un estudio de simulación para la inyección de nitrógeno en un reservorio de gas condensado y afirma que iniciar la inyección en una etapa cercana al inicio de la producción, puede causar una reducción en la recuperación de condensado y brinda pautas para la locación del pozo inyector recomendando que el mismo debe estar lo más alejado posible de los pozos productores.

**Gachuz and Muro (2011)** desarrollaron estudios de laboratorio para evaluar la efectividad del CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, y C en el desplazamiento de condensado para un

reservorio naturalmente fracturado bajo condiciones de temperatura y presión altas. Sin embargo, de acuerdo con los resultados, el nitrógeno presenta el menor porcentaje de recuperación y el metano el mayor, probablemente, porque el metano puede evaporar más condensado que el  $N_2$ . Estos autores recomiendan continuar la investigación con una cantidad de datos mayor y simulaciones para determinar la efectividad real de estos gases.

**Maleki et al. (2012)** presentaron resultados de un estudio de simulación con el objetivo de investigar la efectividad del  $CO_2$ , C y  $N_2$ . Ellos asumen un desplazamiento miscible a primer contacto, que significa que el gas inyectado se mezcla en todas las proporciones con el condensado. Observan que el  $N_2$  provee el mejor resultado para la mantención de la presión, pero, el metano presenta el mejor factor de recobro seguido del  $CO_2$ . Finalmente, recomiendan usar una curva de permeabilidad relativa no lineal para el sistema de fracturas.

**Paraschiv et al. (2012)** evaluaron el rol de la difusión mediante un modelado numérico y presentan una ecuación para el cálculo del largo de la difusión. Ellos afirman que si no se toma en cuenta la difusión, el “breakthrough” (irrupción) ocurrirá mucho antes, obteniendo menores factores de recuperación. Adicionalmente, el nitrógeno aumenta la presión de rocío en la matriz debido a una difusión más rápida de los componentes livianos. Por otro lado, el dióxido de carbono disminuye el punto de rocío alcanzando mejores factores de recuperación.

**Hasemi et al. (2016)** compararon diferentes escenarios para la inyección de gases en un reservorio naturalmente fracturado. Evaluaron el uso de  $CO_2$ ,  $N_2$ , C y CICLAJE, determinando que el  $CO_2$  provee un mayor porcentaje de recuperación. Por lo tanto, una menor presión de miscibilidad será requerida.

Adicionalmente, ellos confirman que el  $N_2$  es el mejor gas para una re-presurización del reservorio en el tiempo, porque el  $N_2$  es capaz de ocupar un volumen poral mayor. Finalmente, confirman en este estudio que el  $N_2$  puede incrementar el punto de rocío, resultando en un porcentaje menor de recuperación.

Las propiedades físicas del Nitrógeno como densidad y viscosidad son favorables. A condiciones de reservorio, tiene una densidad menor que la del gas-condensado y, preferencialmente, se mantiene en el tope del reservorio. En cuanto a propiedades químicas, el Nitrógeno es un gas inerte, tiene una

pureza alta lo que previene que se produzcan problemas de corrosión y es compatible con los hidrocarburos (Rojas, 2003, p. 193).

En ciertas condiciones, el Nitrógeno pueda causar efectos en el comportamiento de fase. Usualmente, el volumen de Nitrógeno reciclado es grande y la diferencia marcada de presión tiene un impacto económico importante. La concentración de Nitrógeno varía a la entrada del sistema de procesamiento del gas, a lo largo de la vida productiva del proyecto, generando considerables requerimientos de Inversión y de facilidades (Xingru, 2013, p. 6).

El Nitrógeno es un compuesto que se encuentra disponible en el aire debido a su composición que, a condiciones normales (1atm de presión y 25°C.), es 78% Nitrógeno, 21% Oxígeno y 1% Argón. El método criogénico para producir el Nitrógeno del aire es el más utilizado y económico. Este método, consiste en condensar el aire y luego separar el Nitrógeno del Oxígeno por destilación fraccionada. También existen las plantas PSA (Plantas On Site, de separación por Presión) que separan el nitrógeno del aire en forma inmediata en el lugar de la Inyección (Rojas, 2003, p. 194).

## SIMULADOR COMPUTER MODELLING GROUP (CMG)

Se empleó el simulador comercial GEM de CMG (Computer Modeling Group) para la construcción de diferentes casos de estudio tanto para el modelo (A) como para el modelo (B). La herramienta BUILDER se empleó para la integración de datos y construcción de los modelos, WINPROP para la caracterización del fluido, CMOST para los análisis de sensibilidad y RESULTS, herramienta gráfica, para el análisis de resultados.

GEM es un simulador composicional de la ecuación de estado, que tiene la capacidad de simular mecanismos importantes como procesos de inyección. Puede resolver reservorios de doble porosidad asignando una celda separada para la matriz y la fractura donde se toma en cuenta el coeficiente de transferencia para el flujo en las fracturas.

El coeficiente de transferencia es tomado en cuenta desde la formulación propuesta por Kazemi (1976) con dependencia en el factor de forma (Ec. 3) propuesto por Warren y Root que asume un flujo pseudo-estable o Kazemi que asume un flujo transiente.

## RESERVORIO EN ESTUDIO

En el año 1997, se perforó el primer pozo productor para la formación estudiada en la que se descubrieron reservas de Gas-Condensado. La formación contiene areniscas que fueron depositadas en un ambiente de mar somero. Las areniscas son sub-feldespáticas, de granos finos a muy finos. Esta arenisca presenta una porosidad promedio de 6% y es una formación Naturalmente Fracturada (YPFB, 2019, p. 7).

La porosidad de la matriz presenta una distribución homogénea, integrada por microporos de tamaño 0,02 milímetros a 0,06 milímetros y mesoporos subordinados (hasta 0,15 milímetros). La porosidad de las fracturas aporta conectividad al sistema y abarca un rango de micro a macroporo (0,02 milímetros a 0,08 milímetros de ancho). El espesor promedio del reservorio es de 87 metros (YPFB, 2019, pp. 8-9).

El reservorio en estudio está enmarcado como un reservorio naturalmente fracturado que pertenece al tipo A, según la clasificación de Roberto Aguilera (1995), basada en propiedades petrofísicas, registros eléctricos y comportamiento de producción. En los reservorios Tipo A, la parte mayor del almacenaje de Hidrocarburo se encuentra en la Porosidad de la Matriz, y una parte menor se encuentra en las Fracturas. El factor de recuperación para este tipo de reservorio se estima entre 70% y 80% (YPFB, 2019, p. 16).

La formación se caracteriza por presentar tres sub-secuencias constituidas por bancos de areniscas con intercalación de niveles pelíticos que constituyen los niveles de sello (YPFB, 2019, p. 10). Pertenece al sistema Devónico, con un tope de 3.859 metros y un espesor de 88 metros (YPFB, 2019, p. 10).

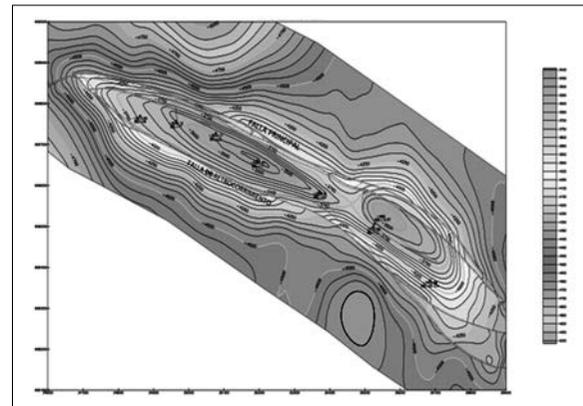
Debido a la profundidad de la formación, la señal sísmica es bastante difusa, dificultando el mapeo de la estructura. Por lo tanto, el mapa estructural fue construido teniendo como referencia al nivel Yantata, con el ajuste de la información de los pozos, como datos del Dip meter y topes formacionales (YPFB, 2011, p. 28).

Figura 5. Columna Estratigráfica Generalizada

ERA	SISTEMA	PISO	FORMACIÓN	TOPE (m)	ESPESOR (m)	LITOLOGÍA
CENOZOICO	TERCIARIO	Mioceno	Emborozú		749	
			Guandacay			
			Tariquia	749	577	
			Yecua	1326	187	
			Petaca	1513	225	
MESOZOICO	CRETACICO	Maastrich.	Cajones	1738	52	
			Yantata	1790	115	
			Ichoa	1905	348	
PALEOZOICO	DEVONICO	Frasniano	Iquiri	2253	154	
		Givetiano				
		Eifeliano	Limoncito	2407	1452	
		Emsiano				
		Siegeniano				
		Gediniano	Robore I	3859	88	

Fuente: YPFB, 2019, p. 19

Figura 6. Mapa Estructural del reservorio



Fuente: YPFB, 2019, p. 17

Las propiedades Petrofísicas se obtuvieron por registros eléctricos de cada pozo perforado (YPFB, 2019, p. 18).

Tabla 1. Petrofísica de pozos que atravesaron el reservorio en estudio

Pozo	Tope (MD)	Base (MD)	Int. Bruto	Net Pay (h)	NTG	Promedio del Volumen	Porosidad	Saturación de Agua	$\phi \cdot h$	$\phi \cdot h \cdot S_w$
X8	3978	4064,700	86,300	49,480	0,570	0,120	0,067	0,420	3,315	1,392
17	3859	3946,500	87,500	35,660	0,410	0,050	0,050	0,340	1,783	0,606
10	3793	3902,440	109,740	58,370	0,530	0,060	0,073	0,240	4,261	1,023
11	3719	3808,370	89,170	61,100	0,690	0,090	0,076	0,300	4,644	1,393
X3	3940	4028,500	88,200	30,670	0,350	0,060	0,062	0,270	1,902	0,513
12ST BA	3886	3964,290	78,790	46,550	0,590	0,040	0,067	0,310	3,119	0,967
12ST BB	3964	4045,000	80,710	45,270	0,560	0,090	0,065	0,310	2,943	0,912
9DST4	4469	4558,800	89,800	31,600	0,350	0,090	0,044	0,380	1,390	0,528
<b>Sumatoria</b>				358,700	0,510				23,356	7,335

Fuente: YPFB, 2019, p. 18

Se presentan los valores de la petrofísica que son un promedio ponderado con el espesor neto de la formación.

Tabla 2. Valores Promedio de la Petrofísica

VALORES PROMEDIO	
Porosidad de la Matriz	6,51%
Porosidad de la Fractura	0,60%
Porosidad Total	7,11%
Saturación de Agua	31,47%

Fuente: YPFB, 2019, p. 18

Las propiedades de fluido fueron analizadas utilizando los resultados del análisis PVT realizado en Julio del año 1997, en el pozo "X3".

Tabla 3. Propiedades del Fluido Reservorio

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Tipo de Fluido	Gas Condensado	
Presión del Reservorio (Pi)	6555,580	Psia@-3675m TVDSS
Temperatura del Reservorio	265,000	°F
Factor de Compresibilidad (Zi)	1,133	
Presión de Rocio (Pr)	5980,000	Psia
Factor de Compresibilidad @Pr	1,090	
Viscosidad del Gas @PR	0,026	Cp
Peso Molecular del Fluido Recombinado	22,830	Lbm/mol
Gravedad Específica de la Mezcla @Pi	0,787	
Presión de Fondo Fluyente	6233,000	Psia @ 3986m
GOR Inicial	23094,000	scf/STB
Yield de Condensado	43,300	bbl/MMscf
Gravedad de Condensado @ST	55,900	°API
Presión de Separador 1ra etapa	900,000	Psig
Temperatura del Separador 1ra etapa	110,000	°F
Presión del Separador 2da etapa	110,000	Psig
Temperatura del Separador 2da etapa	66,000	°F

Fuente: Schlumberger, 1997

Se presenta el análisis Cromatográfico del Fluido, determinado bajo el análisis de julio de 1997, en el pozo "X3".

Tabla 4. Análisis Cromatográfico del Reservorio

COMPONENTE	SEPARADOR DE LÍQUIDO	SEPARADOR DE GAS	FLUIDO MONOFÁSICO
N2	0,02	0,41	0,4
CO2	1,16	2,58	2,52
H2S	0,00	0,00	0
CH4	20,04	88,24	85,14
C2H6	4,88	5,09	5,08
C3H8	5,28	1,96	2,11
i-C4H10	1,37	0,29	0,34
n-C4H10	3,63	0,58	0,72
i-C5H12	2,41	0,22	0,32
n-C5H12	2,44	0,20	0,2
pseudo C6H14	5,74	0,20	0,45
pseudo C7H16	7,99	0,11	0,47
pseudo C8H18	9,26	0,07	0,49
pseudo C9H20	7,4	0,03	0,37
pseudo C10H22	5,90	0,01	0,28
pseudo C11H24	4,22	0,00	0,29
C12+	18,26	0,00	0,83
TOTAL	100	100	100

Fuente: Schlumberger, 1997

El reservorio es el Productor principal para el Campo donde se encuentra. Es un reservorio Naturalmente Fracturado, con una ligera sobre-presurización (0,50 psi /pie). Actualmente, el reservorio se comporta como un reservorio volumétrico sin empuje de agua (YPFB, 2019, p. 15).

El volumen in situ, estimado por el método volumétrico, es de 375 Bscf del cual, el 86,3% está almacenado en la matriz y 13,7% en las fracturas naturales. Es un indicador para clasificar a este reservorio naturalmente fracturado como Tipo A (YPFB, 2019, p. 16).

Para diciembre 2019, se cuenta un volumen acumulado de gas de 314,63 Bscf y 9,98 MMSTB de condensado, representando un factor de recuperación de 77,0% para gas y de 58,4% de condensado, respectivamente. Actualmente, el campo está produciendo bajo un sistema de compresión instalado en el 2016, permitiendo alcanzar un factor de recuperación final de gas de 87% (YPFB, 2019, p. 20).

En cuanto a la presión de reservorio, se comporta como un reservorio sobre-presurizado como se mencionó al inicio de este punto.

El reservorio tiene ocho pozos perforados ("X8", "17", "10", "11", "X3", "12ST BA", "12ST BB", "9DST4") de los cuales, cuatro se encuentran en producción (YPFB, 2019, p. 17).

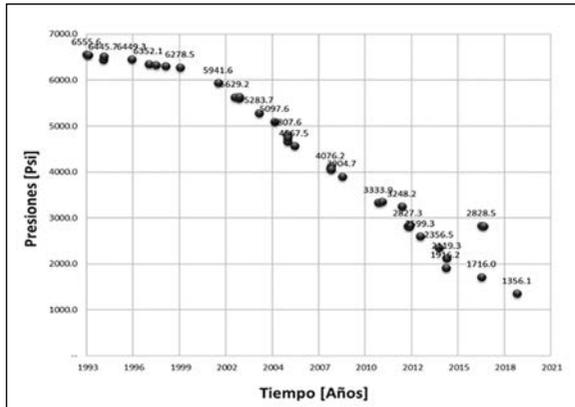
Tabla 5. Estado Actual de los Pozos Productores del reservorio

Pozo	Estado Actual	Caudal 2019 (MMscfd)	CK n/64"	Descripción
X8	Productor	2	40	Incremento de Agua, Presencia de Calcáreos. En estudio para Capilares.
17	Productor	4,4	36	Ingresa al sistema de Compresión 210 Psig. Declinación Natural.
10	Productor	6,2	48	Ingresa al sistema de Compresión 210 Psig. Declinación Natural.
11	Productor	4,1	34	Ingresa al sistema de Compresión 210 Psig. Declinación Natural.
X3	Cerrado	-	-	Problemas Mecánicos en Completación.
12ST BA	Ahogado	-	-	Cerrado por Corte alto de Agua. Bloque alto.
12ST BB	Ahogado	-	-	Cerrado por Corte alto de Agua. Bloque alto.
9DST4	Cerrado	-	-	Pozo completado en otra Formación. Cerrado.

Fuente: YPFB, 2019, p. 4

Los pozos están hidráulicamente conectados (a excepción del pozo “12ST” que aparentemente está separado por fallas sellantes). La última presión de reservorio registrada fue en el año 2019, en el pozo “10”, en una prueba de restitución mostrando una tendencia de depleción.

Figura 7. Historial de Presión del Reservorio



Fuente: YPFB, 2019, p. 17

El Reservorio en estudio es un reservorio maduro que se encuentra en una etapa de declinación, siendo un candidato adecuado para la propuesta de este trabajo y para analizar la extensión de la vida productiva de este reservorio mediante la Inyección de Nitrógeno como Método de Recuperación Mejorada de Gas-Condensado.

## CARACTERIZACIÓN DE LA EOS

### Caracterización del fluido de Yacimiento

La caracterización del fluido de yacimiento se realiza con la herramienta WINPROP de CMG, simulador composicional con un paquete de cálculo de propiedades de fluido y comportamiento de fase, basado en la ecuación cubica de estado.

Una parte fundamental en el modelado de la simulación para la optimización de un campo es la estimación correcta de las propiedades de fluido. Para ello, se detalla el proceso de ajuste de la regresión con experimentos de laboratorio PVT.

### Opciones del Sistema y Unidades de Winprop

Winprop genera un formulario para documentar la ejecución, seleccionar el sistema de unidades y la ecuación de estado (EOS) a emplearse en el proceso. En cuanto a la ecuación de estado, el simulador trabaja con las ecuaciones Soave Redlich-Kwong (SRK) y Peng

Robinson. La ecuación de Peng Robinson (1978) es una extensión en busca de un modelo mejorado de la ecuación SRK que, además, logra representar adecuadamente la densidad de los líquidos, la presión de vapor y las constantes de equilibrio. Por esta razón, se seleccionó la ecuación de Peng Robinson (1978) y el sistema inglés de unidades.

Figura 8. Selección de EOS y Unidades

Base	
Ecuación de estado	PR (1978)
Unidades	psia & deg F
Feed	moles

Fuente: Elaboración Propia

Datos: CMG - Winprop

### Propiedades del Fluido

La composición del fluido de reservorio se expresa en fracción molar. Se observa para el modelo en estudio, una composición inicial desde C1 a C12+, incluyendo Impurezas como N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.

Tabla 6. Composición Inicial

Componente	Primario	Secundario
N2	0,4	0
CO2	2,52	0
H2S	0	0
CH4	85,14	0
C2H6	5,08	0
C3H8	2,11	0
IC4	0,34	0
HC4	0,72	0
IC5	0,32	0
HC5	0,2	0
FC6	0,45	0
FC7	0,47	0
FC8	0,49	0
FC9	0,37	0
FC10	0,28	0
FC11	0,29	0
FC12	0,83	0
Sum	100	0

### Caracterización, Fraccionamiento y Agrupamiento de Componentes pesados

Para determinar las propiedades fisicoquímicas de los carbonos pesados, se introducen parámetros que

son propiedades fisicoquímicas determinadas por laboratorio para el componente C12+.

$$SG_{C12+} = 0,87 \text{ [Adimensional]}$$

$$MW_{C12+} = 238,36 \text{ [gr/mol]}$$

El fraccionamiento de los componentes considera dividir el componente + en grupos hidrocarburíferos con un número de carbono ( $C_7, C_8, \dots$ ) basado en el esquema de Whitson (1983), con una distribución gamma para realizar el fraccionamiento de estos carbonos. Usualmente, se dividen en tres fracciones a cinco fracciones para obtener un resultado óptimo en el ajuste de la ecuación de estado.

Debido a la complejidad de la simulación numérica de un sistema composicional y a los tiempos de simulación altos, se recomienda realizar un agrupamiento de los componentes. Existen numerosos artículos que describen diferentes esquemas para un agrupamiento óptimo de los modelos que, en su mayoría, coinciden en que se debe realizar un análisis de sensibilidad a diferentes agrupamientos hasta obtener el mejor ajuste. El modelo en estudio consideró agrupar los componentes pesados reduciendo la composición de 28 pseudocomponentes a 18 pseudocomponentes, obteniendo un ajuste óptimo de la ecuación de estado. Un menor número de pseudocomponentes, no permitió caracterizar adecuadamente la producción del condensado.

Se presenta el esquema fraccionado y agrupado de los componentes.

Tabla 7. Fraccionamiento de los componentes pesados

Componente	Primario	Secundario
N2	0,004	0
C02	0,0252	0
H2S	0	0
CH4	0,8514	0
C2H6	0,0508	0
C3H8	0,0211	0
IC4	0,0034	0
HC4	0,0072	0
IC5	0,0032	0
HC5	0,003	0
FC6	0,0045	0
C07-C09	0,012524308	0
C10-C12	0,00653735	0
C13-C14	0,002510669	0
C15-C17	0,002212153	0
C18+	0,002415521	0
Sum	1	0

### Regresión de la Ecuación de Estado

El ajuste de la ecuación de estado se realiza mediante una regresión donde se introducen pruebas de laboratorio PVT como CVD, CCE y presión de saturación para ajustarla mediante un agrupamiento de parámetros de ajuste que trabajan los componentes en función a cierta propiedad crítica y, también, mediante los coeficientes de interacción binaria que caracterizan la interacción entre las moléculas. Se presentan los parámetros seleccionados.

Tabla 8. Parámetros de Ajuste de la Ecuación de Estado

Componente	Pc [atm]	Vc [lb/mol]	Tc [K]	Factor Acéntrico	Peso Molecular	Volumen shift
C02						
N2						
CH4						X
C2H6						
C3H8						
IC4						
NC4						
IC5						
NC5						
FC6	X					
C07-C09	Grp#1		Grp#2	Grp#3		Grp#4
C10-C12	Grp#1		Grp#2	Grp#3		Grp#4
C13-C14	Grp#1		Grp#2	Grp#3		Grp#4
C15-C17	Grp#1		Grp#2	Grp#3		Grp#4
C18+	X		X	X	X	X

Tabla 9. **Tabla de coeficientes de Interacción binaria**

Componentes	CO2	N2	CH4	C2H6	C3H8	IC4	NC4	IC5	NCS	FC6	C07-C09	010-C12	013-C14	C15-C17	C18+
CO2	zero	X									X	X	X	X	X
N2		zero													
CH4		n/a	zero	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a							
C2H6		n/a	n/a	zero	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a						
C3H8		n/a	n/a	n/a	zero	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
IC4		n/a	n/a	n/a	n/a	zero	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
NC4		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	zero	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
IC5		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	zero	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
NCS		n/a	zero	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a						
FC6		n/a	zero	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a							
C07-C09	X	n/a	zero	n/a	n/a	n/a	n/a								
C10-C12	X	n/a	zero	n/a	n/a	n/a									
C13-C14	X	n/a	n/a	zero	n/a	n/a									
C15-C17	X	n/a	n/a	n/a	zero	n/a									
C18+	X	n/a	n/a	n/a	n/a	zero									

### Procedimiento para el ajuste de la Ecuación de estado

El procedimiento de ajuste de la EOS es un proceso iterativo que considera:

- Fraccionar los componentes, pesados en un número de componentes óptimo, y actualizar la composición.
- Realizar la regresión utilizando el exponente del coeficiente de interacción binaria HC, los elementos Tc y Pc de los componentes pesados, y los factores de desplazamiento de volumen para los componentes pesados. Si hay CO<sub>2</sub> presente en la mezcla, incluir el coeficiente de interacción entre CO<sub>2</sub> y los componentes pesados.
- Incluir pruebas experimentales PVT como CVD, CCE y Presión de saturación en la regresión.
- Correr la regresión. Si se obtiene un buen ajuste, se adopta ese valor; de otra manera, se debe volver a los coeficientes de interacción y realizar modificaciones hasta conseguir un ajuste adecuado.

### Prueba de expansión a masa constante - CCE

Prueba desarrollada en una muestra de fluido para simular la depleción del reservorio asumiendo que el condensado retrogrado se inicia durante la producción y se mantiene inmóvil en el reservorio. La prueba determina datos como la presión de rocío, los cambios en la composición en la fase gaseosa, el factor de compresibilidad, la recuperación de hidrocarburo en sitio a cualquier presión y la saturación del líquido (Tarek, 2007, pp. 415-416). Se presentan los datos de la prueba CCE para el reservorio en estudio obtenida de un núcleo del pozo 3.

Tabla 10. Datos prueba de expansión a masa constante CCE

Presión	EXP.ROV	LIQ. VOL [%]	Viscosidad del petróleo [cp]	Viscosidad del gas	GAS Z FACTOR	Densidad del gas [lbm/ft3]	Densidad del petróleo [lbm/ft3]	Compresibilidad del petróleo [1/psia]
Peso	1	1	1	1	1	1	1	1
8000	0,8514				1,242			6,42E-05
7886	0,8577				1,233			6,57E-05
7497	0,8808				1,204			7,09E-05
7074	0,9088				1,172			7,74E-05
6768	0,9313				1,149			8,26E-05
6458	0,9563				1,126			8,84E-05
6324	0,9678				1,116			9,12E-05
6063	0,9919				1,096			9,68E-05
5980	1				1,09			9,87E-05
5854	1,1028	0,137						9,98E-05
5549	1,0472	0,425						0,00011326
5054	1,1148	0,832						0,00013826
4547	1,2026	1,327						0,00016897
4053	1,3155	1,785						0,00020508
3543	1,4716	2,35						0,00025129
2782	1,8364	3,098						0,00034499
1993	2,5586	3,713						0,00050259
1466	3,5062	3,835						0,00069097

**Prueba de depleción a Volumen constante CVD**

Se realiza generalmente para un gas condensado para simular las condiciones encontradas en el yacimiento y la relación Presión/Volumen. Esta prueba determina valores de Presión de saturación, coeficientes de compresibilidad isotérmica, factores de compresibilidad y volumen total de hidrocarburos en función a la presión (Tarek, 2007, pp. 415-416).

Tabla 11. Datos prueba de depleción a Volumen Constante CVD

Presión [Psia]	Producción de gas acumulada [%]	Saturación de líquido [%]	Factor Z	Factor Z de las dos fases
Peso	1	50	1	1
5980	0			
5374	6,85	1,885		1,045
4566	17,09	3,263		0,993
3781	28,47	4,114		0,957
2874	43,79	4,658		0,938
2110	58,48	4,674		0,941
1139	77,6	4,361		0,959
552	88,68	4,127		0,979

**Resultados del Ajuste de la Ecuación de estado**

Se presenta el ajuste conseguido para la ecuación de estado según el procedimiento descrito.

Figura 8. Volumen relativo vs Presión prueba CCE

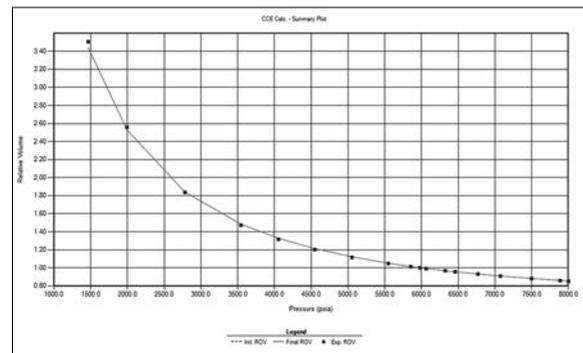


Figura 9. Factor de compresibilidad vs Presión prueba CVD

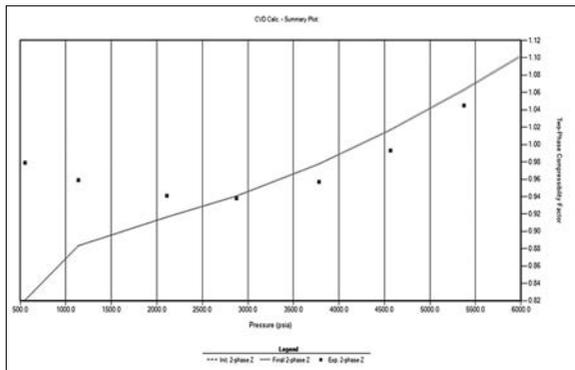
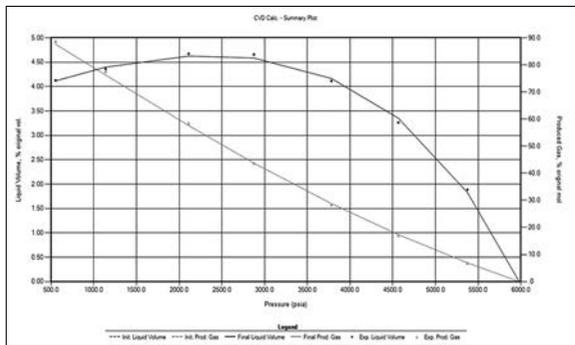


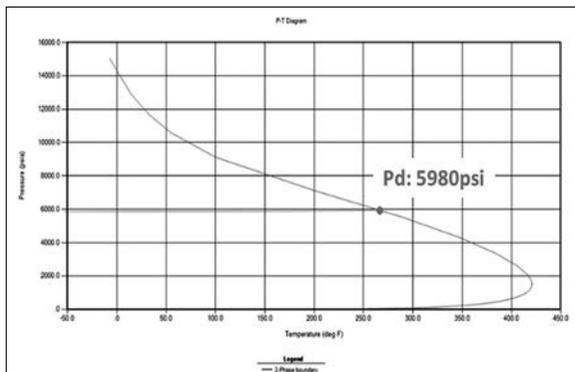
Figura 10. Volumen de líquido y Gas producido vs Presión prueba CVD



El ajuste conseguido en la regresión es óptimo. Se obtuvo un valor bastante aproximado entre el valor experimental y el valor después de la regresión.

El diagrama de fases fue construido luego de realizar el ajuste de la ecuación de estado asumiendo la temperatura de reservorio de 265 °F y una presión de saturación estimada de 5.980 libras/pulgadas<sup>2</sup>.

Figura 11. Diagrama de la fase envolvente



## CÁLCULO DE PROPIEDADES REQUERIDAS

### Permeabilidad del sistema Matriz-Fractura

Se obtuvo bajo un promedio ponderado del Estudio de Coronas para el Pozo X3.

Tabla 12. Permeabilidades del Estudio de Coronas para el pozo UPS X3

Permeabilidad Estudio de Coronas Pozo X3	
0,0001	
0,0011	
0,0483	FISURADA
44,57	FISURADA
0,0045	
3,4224	FISURADA
0,0268	FISURADA
0,0001	
0,0007	
9,8534	FISURADA
4,7488	FISURADA
0,417	FISURADA
0,0001	
0,0227	FISURADA

Fuente: YPFB, 2000, p 14

Nota. Permeabilidad Promedio de la Matriz = 0,0011 [md]

La permeabilidad de la fractura se obtuvo realizando un promedio de la permeabilidad reportada en el historial de pruebas de Presiones (well testing), que tienen el mismo orden de magnitud de las permeabilidades fisuradas de laboratorio.

Tabla 13. Estimación de la permeabilidad de fractura

Nombre del pozo	Fecha	Permeabilidad de fractura de pruebas de presión
X3	01-nov-1993	114,0
X3	01-dic-1993	205,3
X3	01-nov-1994	--
X3	02-nov-1994	--
X8	01-jul-1996	3,3
X3	01-jul-1997	19,0
X8	01-dic-1997	--
X8	01-jul-1998	--
X8	08-may-1999	--
11	08-ago-2001	--
X8	01-ago-2002	23,6
X3	04-nov-202	--
11	04-nov-202	--
9D ST4	01-ene-2004	--
11	01-dic-2004	--
11	03-sep-2005	--
9D ST4	03-sep-2005	--
X8	05-sep-2005	--
X8	01-feb-2006	22,1
X3	27-mar-2008	--
11	28-mar-2008	--
X8	29-mar-2008	--
X8	27-nov-2008	21,6
10	17-ene-2011	57,2
10	08-abr-2011	--
12	13-jun-2012	0,0
12	19-oct-2012	0,2
12	15-nov-2012	6,4
12	16-nov-2012	--
X8	09-jul-2013	--
X3	18-ago-2014	12,8
X3	09-ene-2015	--
12	23-ene-2015	--

Fuente: YPFB, 2019, p 1

Nota: Permeabilidad Promedio de la Fractura = 20,1 [md]

**Radio del pozo**

La mayoría de los pozos fueron perforados en esta formación con un diámetro de trépano de 8,5 pulgadas y revestidos por un liner de 7 pulgadas de diámetro (YPFB, 2019). Considerando que la cementación puede no ser la mejor, se utiliza el diámetro del trépano para calcular el radio del pozo:

$$r_w = 8,5 \text{ [pulgadas]}$$

$$r_w = 0,354 \text{ [pies]}$$

**Espaciamiento de la Fractura**

De acuerdo a las pruebas de presión Build Up del pozo 8, se obtuvo valores promedio para la relación de coeficiente de almacenamiento y para el parámetro de flujo Inter-poroso (YPFB).

$$\omega = 0,2$$

$$\lambda = 6,21 e^{-7}$$

La formulación matemática propuesta por Warren y Root para un modelo de doble porosidad, permite asumir un despeje de la fórmula del parámetro de flujo interporoso (ecuación 2.51) para encontrar el valor de espaciamiento de fractura.

$$\alpha = \frac{1,24e^{-04} * 20,1}{0,0011 * (0,2083)^2} \tag{Ecuación 6}$$

$$\alpha = 52,3 \text{ [pies]}$$

De la formula del factor de forma propuesto por Warren y Root (1963), se despeja el valor de (L) que viene a ser el valor del espaciamiento de Fracturas.

$$L = \sqrt{\frac{4N(N+2)}{\alpha}} \tag{Ecuación 7}$$

donde:

$\alpha$  = Parámetro característico del sistema geométrico [Pies]

$K_{mavg}$  = Permeabilidad Promedio de la Matriz [md]

$K_f$  = Permeabilidad de la Fractura [md]

$r_w$  = Radio del Pozo [Pies]

J = Número de Planos que limitan el medio permeable [Adimensional]

L = Espaciamiento de Fractura (Dfrac) [Pies]

Reemplazando valores, se asume un valor de tres para el parámetro  $j$  de acuerdo con la idealización de Warren y Root.

$$L = \sqrt{\frac{4 \cdot 3(3+2)}{52,3}} = 1,07 \text{ [ft]} \quad \text{Ecuación 8}$$

### Compresibilidad del Sistema Matriz Fractura

Se cuantifica en el estudio de coronas, que se realizó en una secuencia desde 200 psi a 6.520 psi, midiendo la variación de volumen en cada intervalo de presión.

Para obtener un valor promedio, se realiza el promedio de valores de las muestras a 6.520 psi de referencia, obteniendo el valor:

$$CPOR \text{ Matriz} = 1,22^{-0,5} \text{ psi}^{-1}$$

Compresibilidad de la fractura:

$$C_{tf} = \frac{c_{tm} \phi_m}{\phi_f \left( \frac{1}{\omega} - 1 \right)} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$C_{tf} = \frac{1,22E-05 (0,0651)}{0,006 \left( \frac{1}{0,2} - 1 \right)} = 3,31^{-0,5} \text{ psi}^{-1} \quad \text{Ecuación 10}$$

### Permeabilidades Relativas

El cálculo de las permeabilidades Relativas se realizó con el modelo propuesto por Corey (1954). Como parámetro base se tomó la saturación de Agua connata en 0,4036, valor obtenido del estudio de presiones capilares y para la permeabilidad de la fractura, se seleccionó un método lineal variando los end points hasta conseguir un buen ajuste de la producción.

Figura 11. Curva de permeabilidad relativa Agua – Condensado para el Sistema Matriz-fractura.

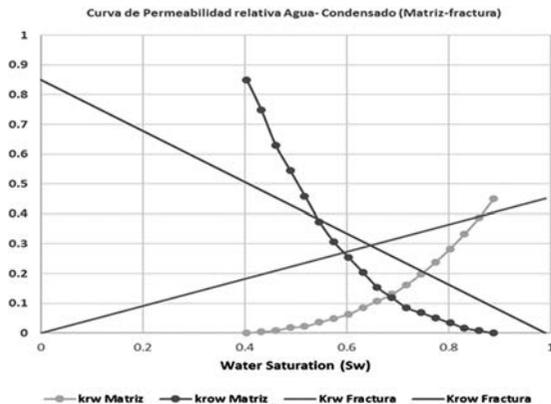
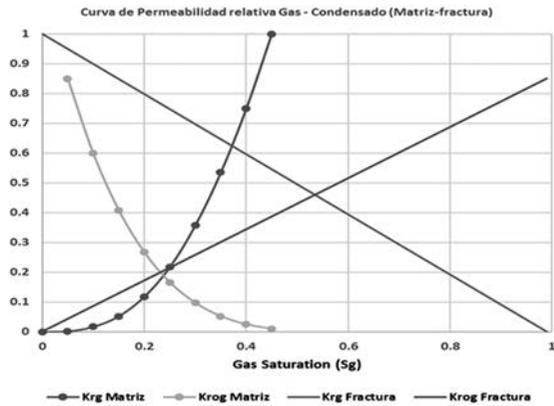


Figura 12. Curva de permeabilidad relativa Gas – Condensado para el Sistema Matriz-fractura



## CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A

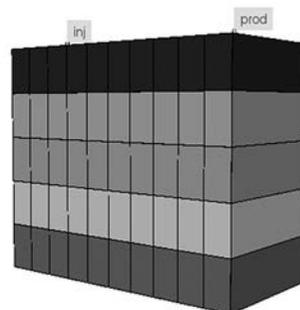
El modelo de simulación sintético (A) se construyó como un modelo en base al modelo pseudoestable de doble porosidad propuesto por Warren y Root (1963) con propiedades de roca y fluido similares al reservorio en estudio. Se optó por este modelo debido a que en una de las pruebas de presión se observó este tipo de comportamiento.

Por otro lado, de acuerdo con una revisión bibliográfica, el modelo pseudoestable de doble porosidad es uno de los mejores métodos para modelar un reservorio naturalmente fracturado de tipo A. Este modelo se creó con el objetivo de representar el comportamiento del reservorio bajo condiciones de producción normal y sometido a una inyección de Nitrógeno.

### Grilla de Simulación

El modelo de simulación A se construyó empleando una grilla cartesiana de 50 (10x1x5) celdas con una dimensión de 200 pies en la dirección I y 1.000 pies en la dirección J.

Figura 13. Modelo A – Grilla de simulación



**Propiedades Petrofísicas y componentes**

Se presenta la tabla resumen con los datos de petrofísica empleados en el estudio.

Tabla 14. Modelo A - Tabla resumen de propiedades de la roca

Propiedad	Capa 1&2	Capa 3	Capa 4&5
Tope de la grilla [ft]	10.000		
Espesor de la grilla [ft]	50	50	50
Porosidad de la matriz	0,0651	0,0651	0,0651
Porosidad de la fractura	0,006	0,006	0,006
Permeabilidad de la matriz I [md]	0,0011	0,0011	0,0011
Permeabilidad de la matriz J [md]	0,0011	0,0011	0,0011
Permeabilidad de la matriz K [md]	0,0011	0,0011	0,0011
Permeabilidad de la fractura I [md]	20,1	20,1	20,1
Permeabilidad de la fractura J [md]	20,1	20,1	20,1
Permeabilidad de la fractura K [md]	20,1	20,1	20,1
Espaciamiento de la fractura DIFRACT	1,07	1,07	1,07
Espaciamiento de la fractura DJFRACT	1,07	1,07	1,07
Espaciamiento de la fractura DKFRACT	1,07	1,07	1,07
Implicit Flag - Matrix	2	2	2
Implicit Flag - Fracture	3	3	3
Compresibilidad de la Matriz	1,22e-05		
Compresibilidad de la Fractura	1,08e-04		
Presión de referencia de la compresibilidad	6.520		

**Condiciones Iniciales**

Se estableció como fecha de inicio de simulación, para este modelo, el 01-01-2015 y el fin en 01-01-2030, evaluando el proceso por 15 años. La inicialización del modelo (A) especifica la profundidad de contacto agua-gas, junto con una presión de referencia a una profundidad de referencia, una profundidad crítica y, además, un gradiente composicional. A profundidades por debajo de la profundidad crítica, los bloques de una sola fase de hidrocarburo se identifican que contienen condensado, mientras que, a profundidades por encima de la profundidad crítica, los bloques de una sola fase de hidrocarburos se identifican que contienen gas.

**Pozos**

Se establecieron dos pozos, un inyector y un productor en ambos extremos a una distancia de 1.600 pies. Las constantes operacionales de los pozos, consideradas para este caso, se definen inicialmente con valores expresados en la tabla 15 para el pozo inyector y en la tabla 16 para el pozo productor.

Figura 15. Modelo A - Pozo Inyector y productor en vista de corte transversal

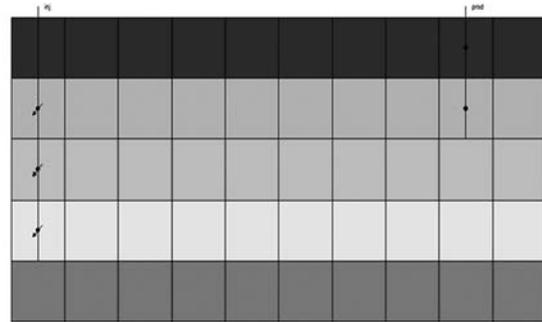


Tabla 15. Modelo A - Constantes Operacionales del pozo Inyector

TIPO	INYECTOR	
CONSTANTES OPERACIONALES		
Caudal de gas	500.000	ft3/día
FLUIDO DE INYECCIÓN	Nitrógeno	
ESTADO	Abierto	

Tabla 16. Modelo A - Constantes Operacionales del pozo Productor

TIPO	PRODUCTOR	
CONSTANTES OPERACIONALES		
Caudal de gas	1.000.000	ft3/día
BHP	500	Psi
ESTADO	Abierto	

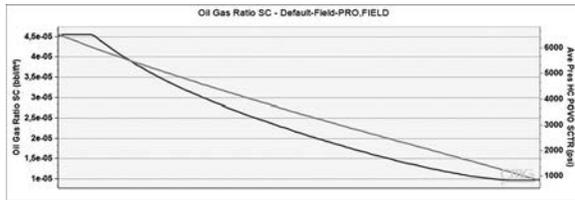
**Caso de Simulación Inicial**

La evaluación del impacto de la inyección de Nitrógeno en el modelo A, requiere de la creación de un modelo sin inyección (Pozo Inyector cerrado) denominado "Caso base".

Se presenta una gráfica de la relación condensado gas (CGR) y la presión de reservorio para el modelo base (figura 16), donde se confirma que el modelo es

representativo al campo en estudio ya que se observa que se alcanza un CGR de 46 Bbl/MMScf<sub>d</sub> iniciales del campo y empieza a declinar a una presión de rocío de 5.980 libras/pulgadas<sup>2</sup>.

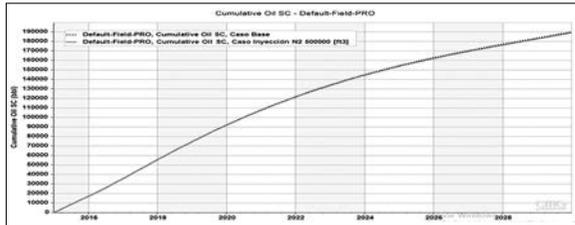
Figura 16. Modelo A – Relación condensado-gas vs Presión de reservorio



**a) Comparación entre el caso base y caso de Inyección**

El modelo de inyección inicial se corrió asumiendo inyectar un 50% de nitrógeno en función al caudal de producción, para observar el impacto en la recuperación de condensado en el modelo. Se presentan los resultados de la simulación Inicial con inyección de Nitrógeno.

Figura 17. Modelo A – Comparativa Producción acumulada de condensado Caso base vs Caso Inyección



Los resultados de la inyección para un caudal de 500.000 pies<sup>3</sup> de Nitrógeno (50%), una recuperación de condensado menor que comparada con la del caso base, evidencia un fenómeno típico esperado después de la revisión bibliográfica, que es la canalización del fluido inyectado a través de la red de fracturas.

Por ello, se llevó a cabo una prueba de trazador y una serie de simulaciones analizando diferentes parámetros que pueden influenciar la inyección de Nitrógeno en un reservorio de gas-condensado naturalmente fracturado.

**b) Análisis de trazador al fluido de Inyección**

Debido al comportamiento observado donde la recuperación de condensado se encuentra por debajo del caso base sin inyección, se añadió un trazador al modelo para el fluido de inyección (nitrógeno),

con el fin de comprender el fenómeno de la baja recuperación de condensado.

Figura 18. Modelo A – Análisis de trazador Matriz-Fractura

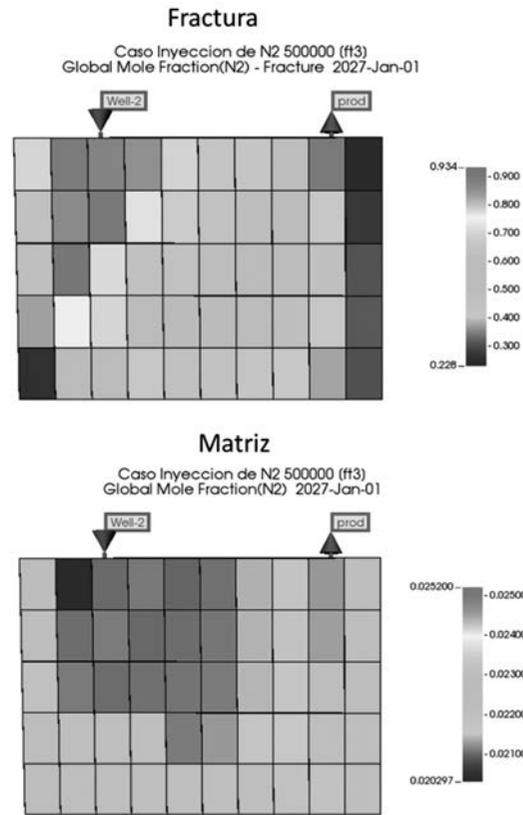
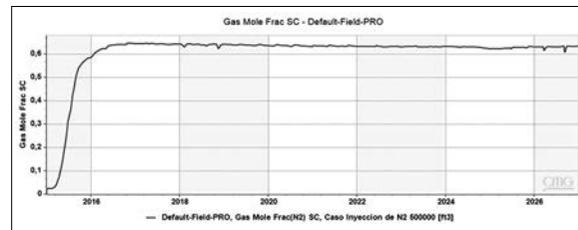


Figura 19. Modelo A – Concentración de Nitrógeno para el análisis de trazador



El análisis de trazador confirma una canalización del fluido inyectado, debido a que se observa que el fluido de inyección avanza más rápido a través de la red de fracturas, al término del primer año de inyección, con una fracción de 0,65, evitando de esta manera que el fluido de inyección logre ingresar a la matriz para poder barrer el condensado remanente que se almacena por el efecto de condensación retrograda.

### Análisis de Sensibilidad

El modelo A, al ser un modelo sintético construido con el propósito de analizar distintos parámetros que pueden influenciar el proceso de inyección de nitrógeno, en menor tiempo, se utiliza para realizar distintos tipos de análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de ciertas propiedades o condiciones en la recuperación adicional de condensado.

#### a) Análisis de sensibilidad a propiedades petrofísicas

La evaluación de las propiedades petrofísicas se llevó a cabo con la herramienta CMOST, donde se construyeron 40 distintos escenarios conservando las características del modelo: se evaluó la permeabilidad de la matriz en un rango de 0,0001 md a 0,1 md, la permeabilidad de la fractura en un rango de 10 md a 30 md, el espaciamiento de las fracturas en un rango de 1,07 pies a 20 pies, la porosidad de la matriz en un rango de 0,0045 a 0,0075 y, por último, la porosidad de la fractura en un rango de 0,048 a 0,08.

Se presentan los resultados del impacto de las propiedades en la producción de condensado, la producción de gas y la presión de reservorio.

Figura 20. Modelo A – Impacto de las propiedades petrofísicas en la producción de condensado

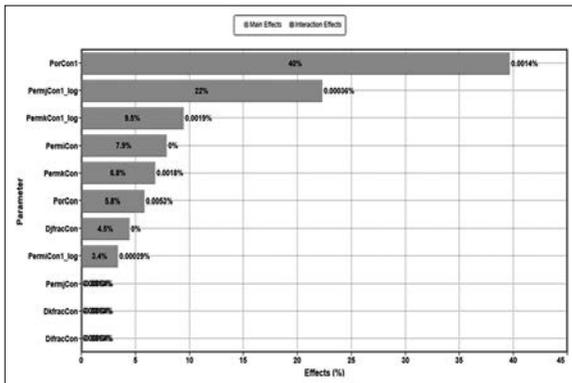


Figura 21. Modelo A – Impacto de las propiedades petrofísicas en la producción de gas

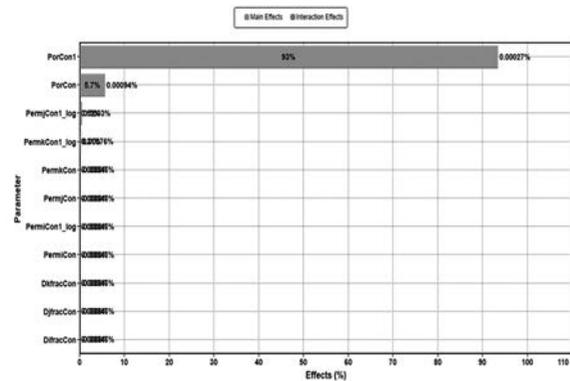
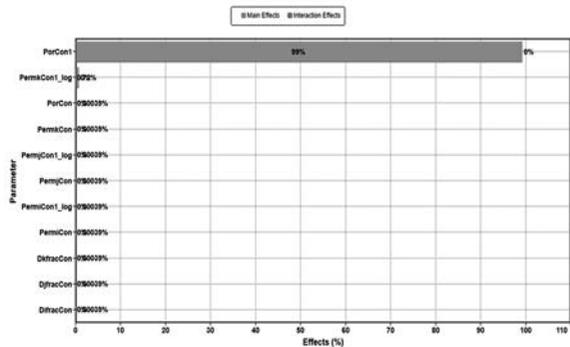


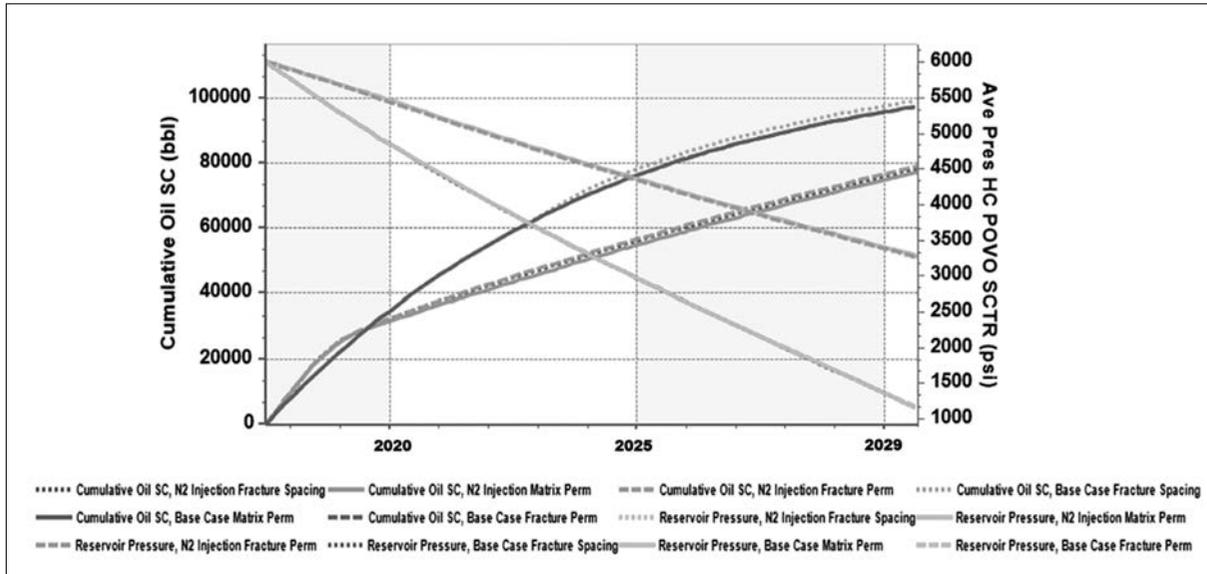
Figura 22. Modelo A – Impacto de las propiedades petrofísicas en la presión de reservorio



Las propiedades petrofísicas tienen cierto impacto en el modelo, pues se observa su efecto en la producción de condensado, generado por la porosidad de la fractura y la permeabilidad de la fractura en más del 20% y, las propiedades como permeabilidad de la matriz, porosidad de la matriz y espaciamiento de las fracturas, presentan un efecto menor al 10%. En cuanto a la producción de gas se observa que la propiedad con mayor efecto es la porosidad de la fractura, y por último, la presión de reservorio está influenciada por la porosidad de la fractura.

Sin embargo, se realizaron simulaciones independientes con valores dentro de los rangos establecidos. Los resultados reportan que las propiedades no juegan un rol fundamental en la recuperación de condensado, puesto que en todos los casos se observa que el caso de inyección es menor al caso base, exponiendo una pérdida en la recuperación en todos los casos (figura 23).

Figura 23. Modelo A – Resumen de simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad a las propiedades petrofísicas

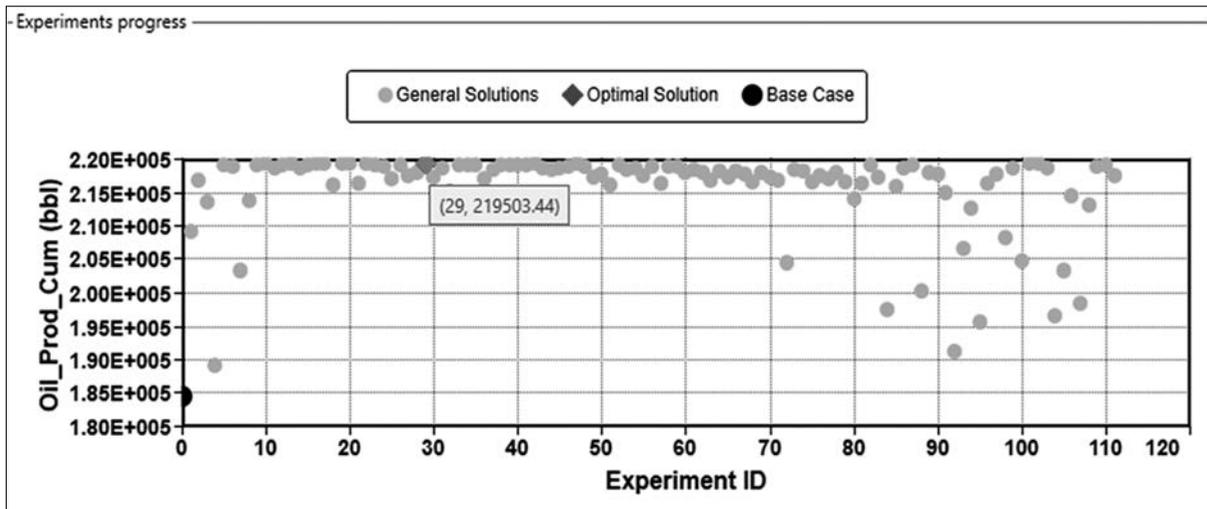


**b) Análisis de sensibilidad a caudales de Inyección**

El análisis de sensibilidad a los caudales de inyección se realizó creando 111 experimentos con

la herramienta CMOST variando los caudales de inyección en un rango de 50 MScfd a 900 MScfd para un caudal de producción de un millar de pies<sup>3</sup>-día.

Figura 24. Modelo A – Análisis de sensibilidad a los caudales de inyección experimentos

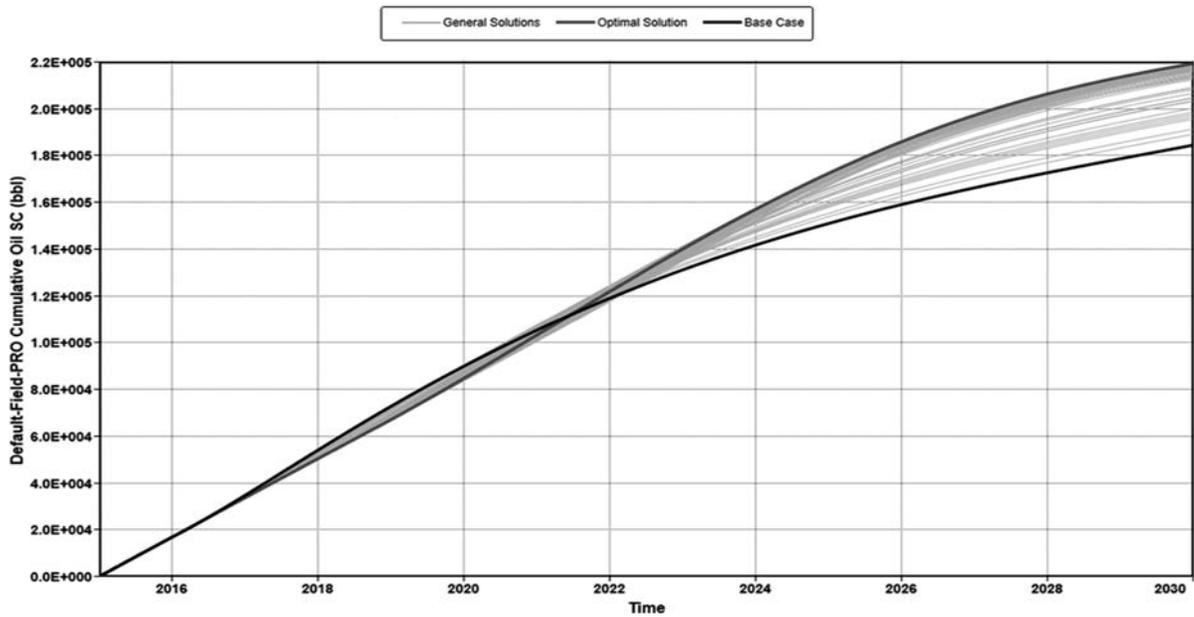


Los resultados presentan un impacto significativo en la recuperación de condensado, pues se observa una recuperación mayor de condensado dependiente al porcentaje de inyección de nitrógeno. Los resultados brindaron una relación de al menos el 10%, entre el caudal Inyección/Producción.

Q producción = 100%

Q inyección = +- 10% del caudal de producción

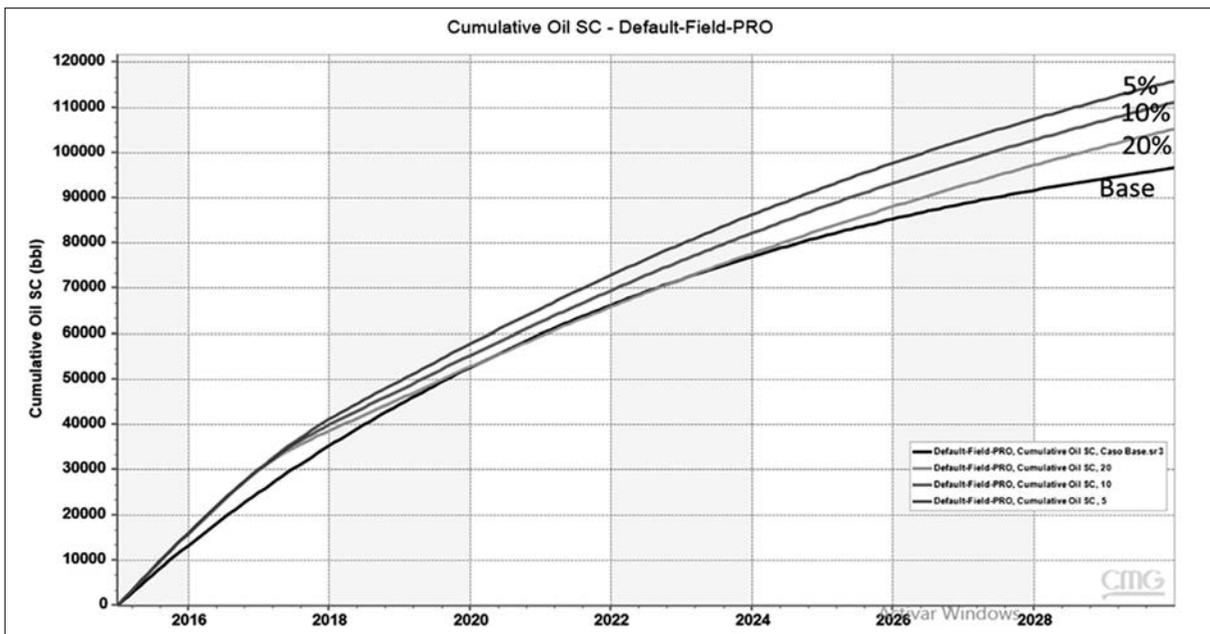
Figura 25. Modelo A – Optimización para los caudales de Inyección



Posteriormente, se corrieron tres simulaciones independientes adicionales con valores del 5%, 10% y 20% para confirmar la relación del caudal de inyección en relación con el caudal de producción. Estas simulaciones confirmaron la relación y, de la misma

manera, adicionaron una nueva interpretación, mientras más pequeño es el caudal de inyección en relación con el caudal de producción se obtendrán mejores factores de recobro.

Figura 26. Modelo A – Confirmación de resultados para la optimización de caudales

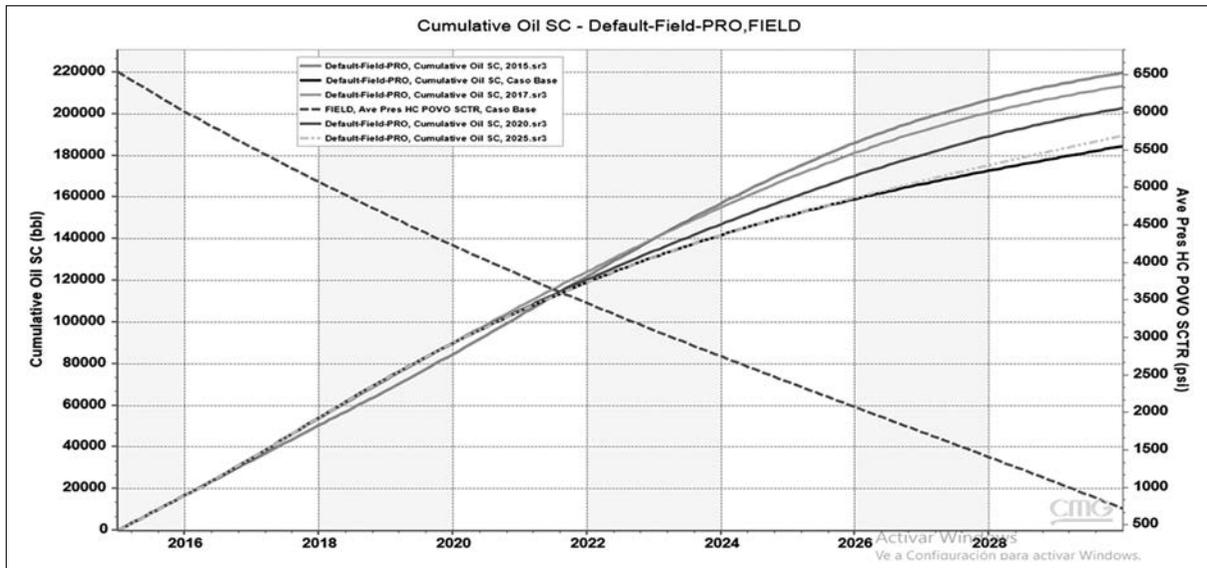


**c) Análisis de sensibilidad al inicio de la inyección**

La evaluación de la fecha de inicio de la inyección se llevó a cabo bajo una inyección de 74.709 pies<sup>3</sup> de nitrógeno puro correspondiente al mejor caudal. Luego del análisis de sensibilidad del caudal de inyección, se evaluaron cuatro fechas para analizar el impacto del inicio de la inyección en diferentes etapas de la vida productiva del yacimiento.

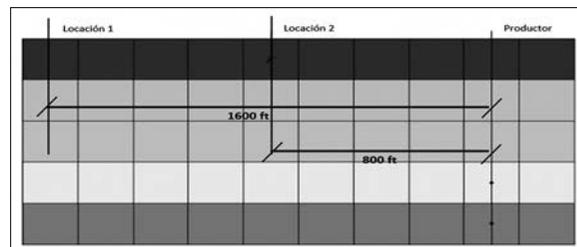
El escenario 2015 corresponde al inicio de la inyección donde el yacimiento inicia la producción con una la presión de reservorio que se encuentra por encima al punto de rocío (6.540 psi). El escenario 2017 corresponde a una presión donde el reservorio se encuentra recién ingresando a una etapa de condensación retrograda (5.500 psi) y los escenarios 2020 y 2025, donde el reservorio ya se encuentra en una etapa de depleción avanzada con presiones de reservorio de alrededor de 4.200 psi y 2.400 psi, respectivamente.

Figura 27. Modelo A - Análisis de sensibilidad a la fecha de inicio de la inyección



Los resultados del análisis de sensibilidad (figura 26), presentan una recuperación adicional para todos los escenarios. Sin embargo, los escenarios donde la presión de reservorio se encuentra en una etapa cercana o antes de que ésta caiga por debajo de la presión de rocío, se observa una producción acumulada de condensado mayor, en contraste a los escenarios donde el reservorio ya se encuentra en una etapa avanzada de declinación.

Figura 28. Modelo A – Esquema de ubicaciones para el análisis de sensibilidad a la ubicación del pozo inyector

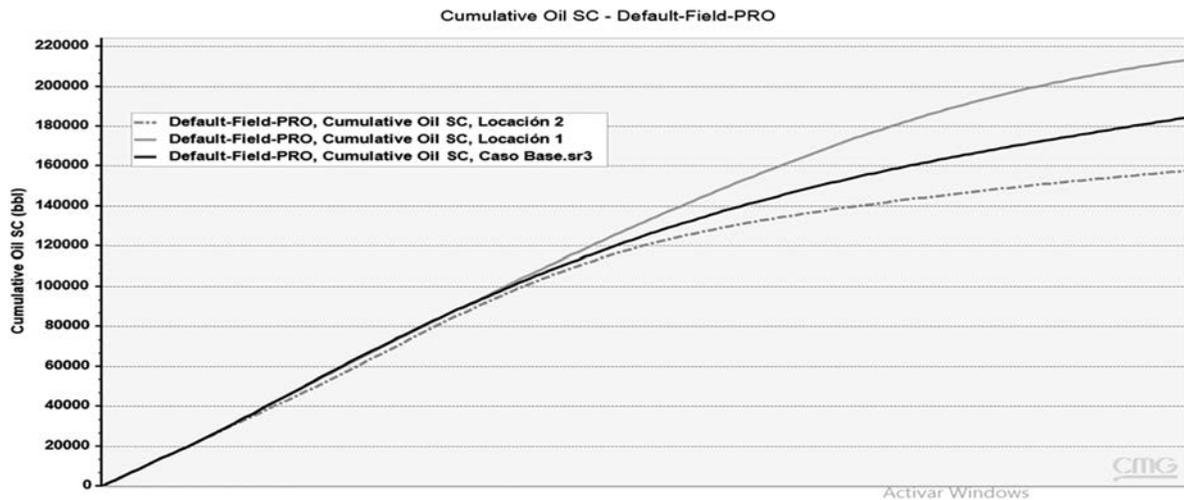


**d) Análisis de sensibilidad a la ubicación del pozo inyector**

Se realizó en base al mejor caudal de inyección y el mejor tiempo de inicio de la inyección, es decir, una inyección de 74.709 pies<sup>3</sup> de nitrógeno puro iniciando el año 2017. Se evaluaron dos ubicaciones: la primera, corresponde a una distancia de 1.600 pies entre el pozo inyector/productor y, la segunda, a la mitad de la distancia, 800 pies, entre ambos pozo (figura 28). Se presenta un esquema de las dos ubicaciones para los pozos inyector.

Los resultados observados (figura 29) reportan una pérdida en la producción acumulada de condensado de al menos el 11% (21 Mbbl) para la segunda ubicación que corresponde a una distancia de 800 pies entre el pozo inyector/productor. Sin embargo, para una distancia de 1.600 pies, se observa un incremento en la producción acumulada de condensado de alrededor del 21% (38 Mbbl).

Figura 29. Modelo A – Resultados para el análisis de sensibilidad a la locación del pozo inyector



Del análisis de sensibilidad se concluye que la mejor ubicación para el pozo inyector es la que se encuentra mas alejada del pozo productor, confirmando lo propuesto por Subero (2009).

#### Discusión de resultados modelo A

La construcción del modelo A proporcionó pautas importantes y coadyuvó en hallar parámetros que juegan un rol fundamental en el proceso de inyección de nitrógeno luego de realizar los distintos análisis de sensibilidad. Vale recalcar que estos resultados permiten comprender mejor los fenómenos que pueden estar presentes en el proceso de inyección de nitrógeno en el caso de estudio modelo (B).

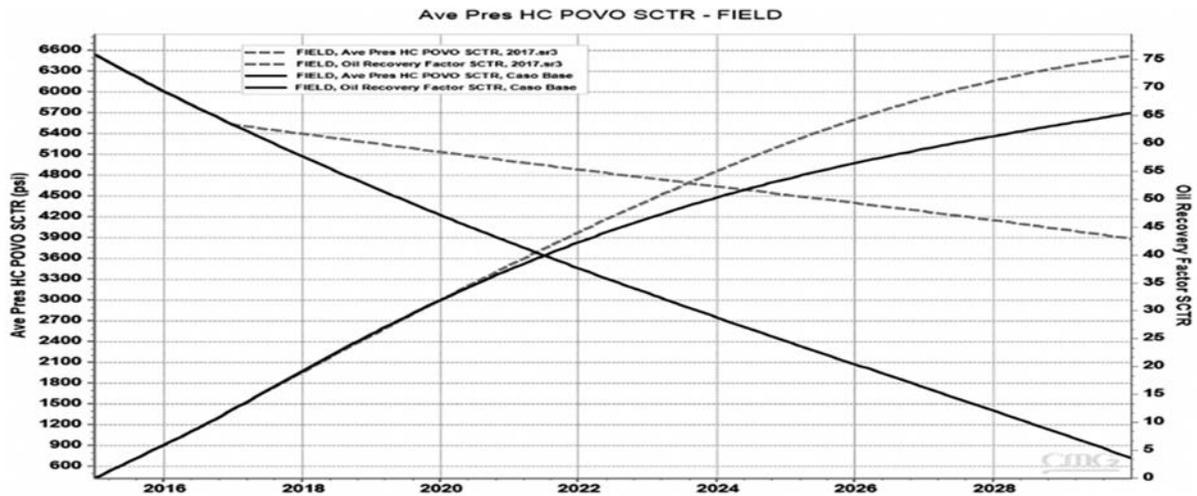
Del análisis de sensibilidad a las propiedades petrofísicas del modelo se concluye que las mismas tienen un impacto considerable en la producción de gas, condensado y presión de reservorio. Sin embargo, no juegan un rol fundamental en la recuperación de condensado pues se observa en todos los casos, prácticamente, el mismo comportamiento de inyección que el caso inicial.

Los caudales de inyección utilizados en el análisis sensibilidad indican que existe la posibilidad de retrasar el fenómeno de canalización a través de la red de fracturas, y se determinó que, para ello, la relación entre el caudal Inyección/Producción debe estar entre el 5% al 10%. La solución óptima para este modelo fue inyectar un caudal de 74,71 [MScfd] con un caudal de Producción de 1 MScfd.

En cuanto al tiempo de inicio de la inyección, se confirma que el inicio de la inyección en una etapa cercana a presión de rocío, o ligeramente superior, reportó mayores caudales de producción acumulada.

Por último, de acuerdo a la afirmación propuesta por Subero (2009) donde se recomienda que el pozo inyector se debe situar lo más lejano posible de los pozos productores para poder evitar un fenómeno de canalización del fluido inyectado, el modelo A confirmó este hecho ya que se reporta como escenario más idóneo (figura 30), ubicación de una distancia entre los pozos inyector/productor de 1.600 pies en comparación a una distancia de 800 pies. Se presenta una comparación entre el factor de recobro y la respuesta a la mantenimiento de presión del reservorio para el caso optimizado, siguiendo las recomendaciones luego de los análisis de sensibilidad, donde se obtuvo un factor de recobro adicional de aproximadamente el 10% y una respuesta positiva al mantenimiento de la presión de reservorio como se esperaba.

Figura 30. Modelo A – Gráfica factor de recobro vs presión de reservorio para el mejor escenario



## MODELO B

El modelo de simulación dinámica del caso de estudio se construyó para obtener una visualización real del campo. Se incluyen los datos PVT, curvas de permeabilidad relativa, historiales de producción para una muestra ideal del modelo. Para poder representar las condiciones de producción pasadas, actuales y futuras del campo, el modelo requirió ser adecuado mediante un ajuste histórico global y local de producción.

### Ajustes de entrada y grilla de simulación

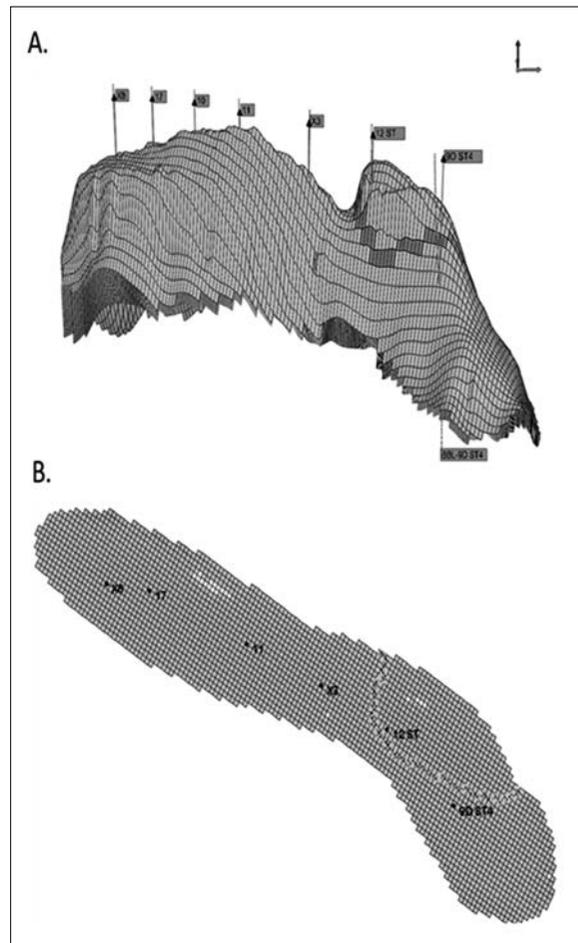
El modelo se inicializó asumiendo un modelo pseudoestable de doble porosidad y el cálculo de factor de forma propuesto por Warren and Root (1963) como se realizó en el modelo sintético.

Tabla 17. Modelo B – Ajustes de entrada en el simulador

AJUSTES DEL SIMULADOR	
Simulador	GEM
Unidades	FIELD
Fracturado	SI
Tipo de doble porosidad	Doble Porosidad
Sub divisiones	2
Factor de Forma	Warren and Root
Inicio de la simulación	1/1/1993

Se construyó una grilla de simulación de 88.960 (32x139x20) celdas que representan de manera eficiente el perfil de producción de los fluidos.

Figura 31. Modelo B – Grilla de simulación vista 3D y área



**Propiedades del fluido y permeabilidades relativas**

Se incluyó la ecuación de estado descrita anteriormente y las permeabilidades relativas de la misma manera. La sección de ajuste histórico explica como estos parámetros fueron ajustados para una caracterización adecuada del reservorio.

**Condiciones de inicialización modelo B**

El modelo se inicializa con valores de presión y temperatura iniciales para el reservorio y en la sección de ajuste histórico se explica como el valor del contacto agua/gas fue ajustado y el porqué de la necesidad de incluir un gradiente composicional al modelo para una caracterización correcta

Tabla 18. Modelo B – Condiciones de inicialización

PARÁMETROS DE INICIALIZACIÓN		
Presión de Referencia	6.540	psi
Temperatura	265	F
Profundidad de Referencia	13.077	ft
Contacto Agua-Gas	12.950	ft
Profundidad de Critica	13.300	ft
COMPONENTES	COMPOSICIÓN	
Profundidad de Referencia	13.077	Ft
CO2	0,004	
N2	0,0252	
CH4	0,8514	
C2H6	0,0508	
C3H8	0,0211	
IC4	0,0034	
NC4	0,0072	
IC5	0,0032	
NC5	0,003	
FC6	0,0045	
C07-C09	0,01252431	
C10-C12	0,00653735	
C13-C14	0,00251067	
C15-C17	0,00221215	
C18+	0,00241552	

**Pozos**

El campo en estudio cuenta con siete pozos perforados. En base a ellos, se introdujeron los valores de las perforaciones e históricos de producción para crear un modelo con valores reales de campo los cuales son validados en el proceso de ajuste histórico.

Los pozos fueron puestos en producción en distintas fechas de la vida productiva del reservorio. En el estudio, se consideraron dos regiones, la primera región que abarca la sección donde se encuentran perforados los pozos X8, 17, 11, y 10, denominándola zona de pozos productores y la segunda región, la de los pozos X3, 9D ST4 y 12 ST de los cuales, los dos últimos se encuentran cerrados por problemas de agua, y el caso del X3 fue cerrado debido a problemas mecánicos.

**Ajuste Histórico**

Para obtener un modelo que represente las condiciones reales del reservorio en estudio, es necesario validar el modelo mediante un ajuste histórico global y local. Como variables de ajuste se consideran los parámetros hidrocarburo In-situ, caudales de producción, presión de reservorio y presiones de fondo de cada uno de los pozos, datos obtenidos en campo a lo largo de la vida productiva.

La validación del modelo consiste, en una primera instancia, en correr el simulador con el histórico de producción generando un primer cálculo de presiones y movimientos de los fluidos para poder compararlos con los históricos de producción y de presión. Es poco probable que, en una primera instancia, el modelo se encuentre ajustado al 100%. Por ello, se empieza a modificar propiedades de mayor incertidumbre a base de prueba y error, hasta alcanzar el resultado con mayor confiabilidad y poder representar, de la mejor manera, el comportamiento reservorio (Carlson, 2003, p. 251).

Se presenta una primera simulación con los datos disponibles de reservorio y, efectivamente, se observa que el ajuste no es óptimo por lo que se requiere realizar una sensibilización a diferentes parámetros para reproducir un modelo de simulación confiable (figuras 32 a 36).

Figura 32. Modelo B – Pozos existentes

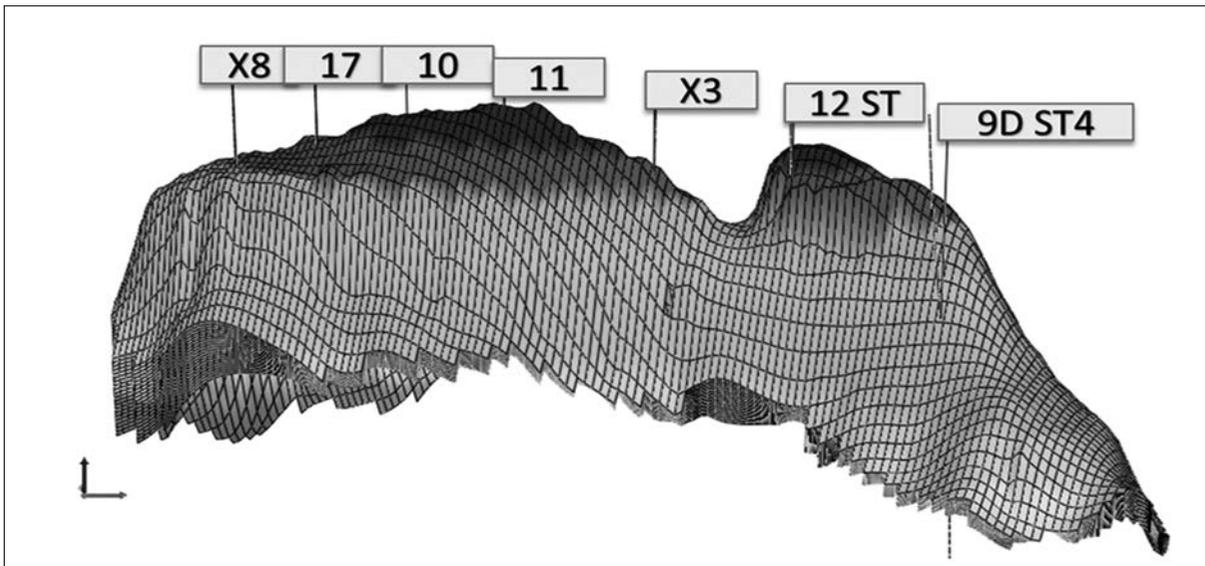


Figura 33. Modelo B – Primera simulación  
“Presión de reservorio vs tiempo”

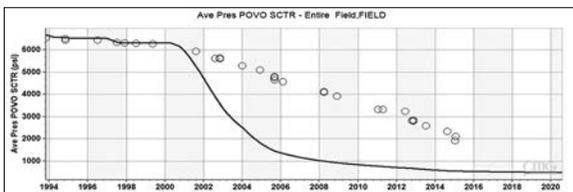


Figura 34. Modelo B – Primera simulación  
“Caudal de condensado vs tiempo”

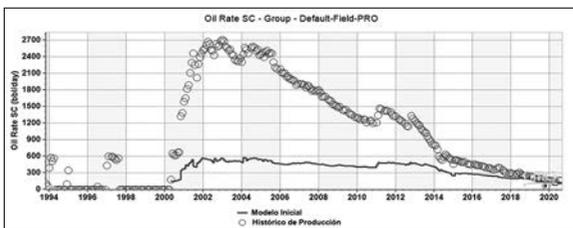


Figura 35. Modelo B – Primera simulación  
“Caudal de gas vs tiempo”

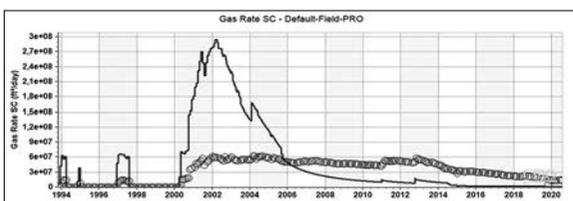
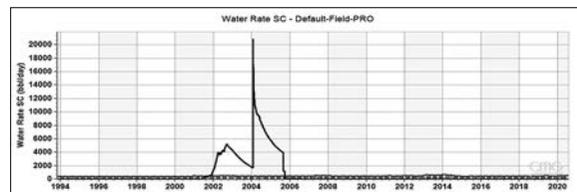


Figura 36. Modelo B – Primera simulación  
“Caudal de agua vs tiempo”



### Ajuste Global

Se considera:

#### a) Ajuste del volumen In-situ y la presión de reservorio

La presión de reservorio y el volumen In-situ se calibraron realizando un análisis de sensibilidad a parámetros como la transmisibilidad de la falla, el contacto agua-gas y un modificador de volumen poral.

La transmisibilidad es un parámetro importante debido a que el pozo 12 ST se encuentra separado por una falla sellante con transmisibilidad baja impactando de gran manera en el volumen In-Situ de HC y en la presión de reservorio. El contacto agua-gas, de igual manera, es un parámetro que juega un rol importante en el ajuste por el caudal de agua.

En la primera parte del ajuste se encontró el mejor contacto y la mejor transmisibilidad para la falla ajustando la presión del pozo 12. Posteriormente, el reto consistió en ajustar la presión de reservorio y Volumen In-Situ ya que con estas modificaciones

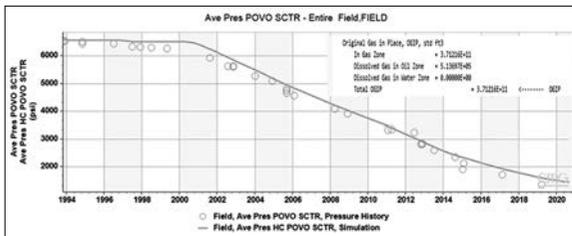
aún no se lograba un ajuste óptimo. Se evaluó un modificador de volumen poral para todas las capas del modelo.

Se presenta una tabla resumen de los parámetros modificados en el ajuste y la gráfica de ajuste de presión y volumen In-situ.

Tabla 19. Modelo B – Tabla resumen del ajuste histórico al volumen in-situ

Ajuste de la Presión de Reservorio y El Volumen de HC In-Situ					
	Transmisibilidad	Contacto WOC	MOD Porosidad	Volumen In-Situ [Bcf]	Comentario
Caso 1	0	12950	-	383,4	Se comprobó que la falla estaba completamente cerrada, para así ajustar la transmisibilidad.
Caso 2	0,2	13200	-	455,3	Ajuste de la Presión bastante alejado
Caso 3	0,4	13100	-	455,3	Ajuste de la Presión bastante alejado
Caso 4	0,01	13300	0,85	425,3	Ajuste de la Presión bastante alejado
Caso 5	0,005	13300	0,5	425,3	Ajuste de la Presión bastante alejado
Caso 6	0,002	13300	0,75	386,5	Ajuste de la Presión bastante alejado
Caso 7	0,001	13300	0,75	386,5	Ajuste de la Presión bastante alejado
Caso 8	0,0007	13300	0,7	371,2	AJUSTE CONFIABLE

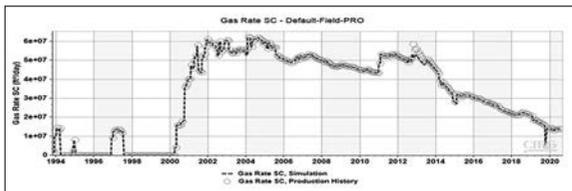
Figura 37. Modelo B – Resultados del ajuste histórico a la presión de reservorio y el volumen in-situ



**b) Ajuste a los caudales de producción**

La producción de gas fue considerada como un dato de entrada operacional principal para el modelo después de ingresar la producción.

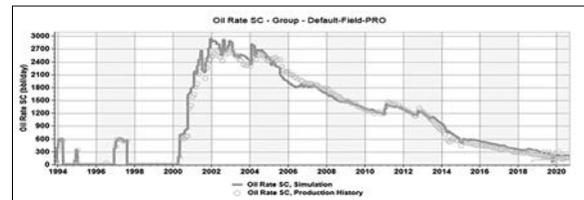
Figura 38. Modelo B – Ajuste histórico “Caudal de gas vs tiempo”



La producción de condensado fue ajustada mediante una revisión de la ecuación de estado ya que esta impacta directamente y un análisis de sensibilidad a las curvas de permeabilidad relativa. La ecuación de estado presenta una representación de la EOS adecuada después del ajuste de la regresión.

En el modelo inicial, la curva de permeabilidad relativa, para la matriz en el sistema agua - condensado, reportó permeabilidad alta para el agua, debido al cual se observó un caudal alto en el periodo del 2002 al 2006. Las curvas de permeabilidad relativa se trabajaron modificando los valores de “end point” del sistema matriz-fractura.

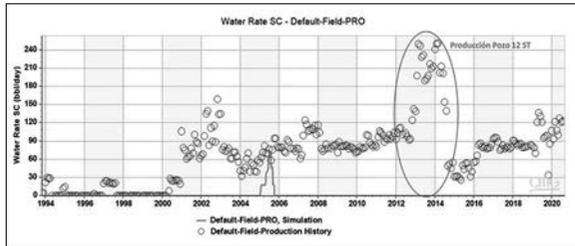
Figura 39. Modelo B – Ajuste histórico “Caudal de condensados tiempo”



El caudal de agua presenta valores pequeños, debido a que probablemente se trata de agua de condensación. Este ajuste reporta un ajuste aceptable para el campo, a excepción del pozo 12 ST, que se encuentra localizado en un bloque separado produciendo por un año, desde 2013 hasta 2014.

Adicionalmente, debido a la presencia de una columna de gas considerable de 680 metros, fue importante añadir un gradiente composicional al modelo. Finalmente, en esta etapa del proyecto, se evaluó el rol de la “difusión molecular del gas” para el sistema matriz/fractura, pero, debido a la densidad de fracturas alta y espaciamiento reducido (1,07 pies), no tuvo un impacto representativo.

Figura 40. Modelo B – Ajuste histórico  
“Caudal de agua vs tiempo”



### Ajuste Local

En esta etapa del proyecto se realizó un análisis de sensibilidad a las variables multiplicadores de productividad, permeabilidades relativas y presión de separación para todos los pozos. Se presenta una tabla resumen con los modificadores de productividad más relevantes para cada uno de los pozos, el ajuste obtenido para la presión de fondo fluyente y para los caudales de producción por pozo (figuras 41 y 42).

Tabla 20. Modelo B – Resumen del ajuste local por pozo

POZO	MOD Productividad 1	MOD Productividad 2	MOD Productividad 3	MOD Productividad 4	Pwf Medida [Psi]	Pwf Simulada	Error %
9D ST4	0,02	0,017	0,017	0,017	2250	2220	1.3
10	0,5	0,65	1,4	1,4	3184	3160	0.8
11	0,07	0,09	1,1	1,1	2100	2100	0
12 ST	0,02	0,02	0,02	0,02	2031	2031	0
17	0,5	0,7	1	1,4	1050	1050	0
X3	1,3	1,3	1,3	1,3	6233	6200	0.5
X8	0,007	0,09	0,15	0,2	1360	1360	0

Figura 41. Modelo B – Ajuste histórico local “Presiones de fondo”

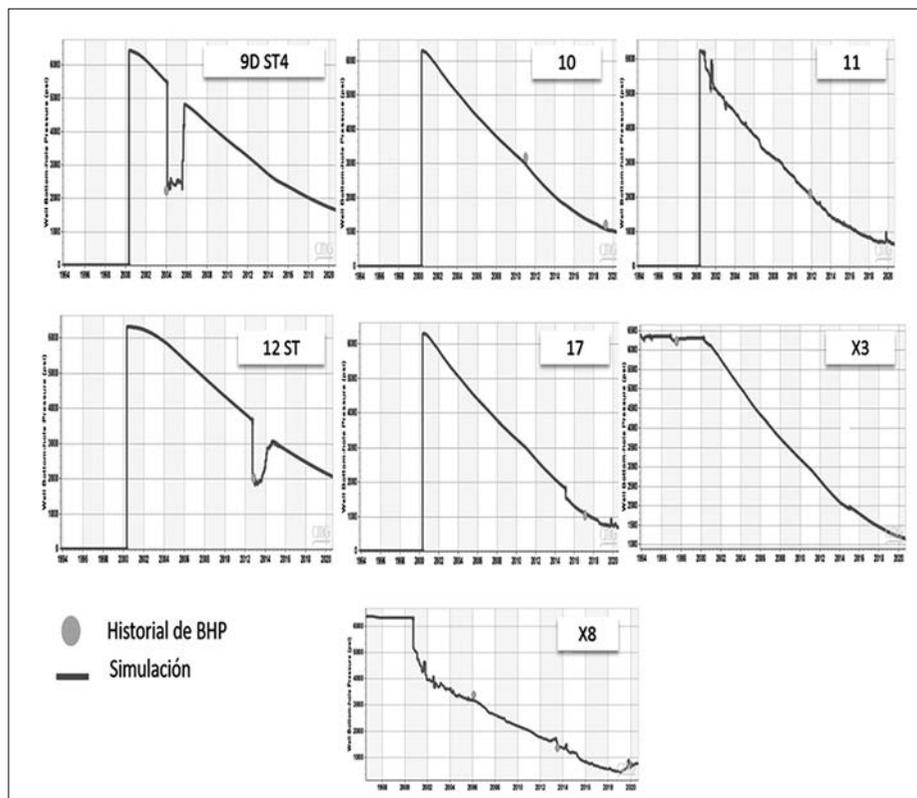
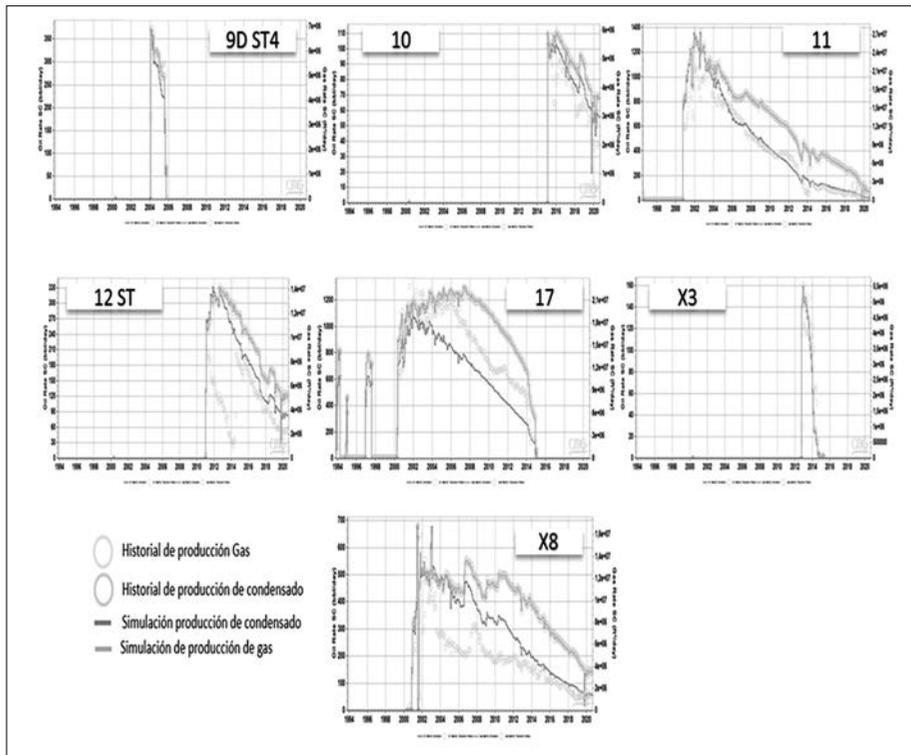


Figura 42. Modelo B – Ajuste histórico local “Caudales de producción”



**Pronóstico de Inyección**

La construcción del pronóstico de inyección consideró dos escenarios de depleción natural con el fin de evaluar parámetros de inyección como la ubicación del pozo inyector, el tiempo de inicio de la inyección y un análisis de sensibilidad a distintos caudales de inyección.

**a) Escenarios de depleción natural**

Se consideraron dos fechas de depleción natural para evaluar la recuperación adicional de condensado. El primer escenario denominado 2021, representa el estado maduro real del campo donde la presión de reservorio se encuentra a unos 1.300 psi y, el segundo, denominado 2006, considera una inyección hipotética en el que la presión de reservorio se encuentra en un punto cercano a la presión de rocío, a unos 5.000 psi. Adicionalmente, el 2005 dejó de producir el pozo BBL-9, y se consideró reutilizar este pozo para la evaluación en ambos escenarios con el fin de minimizar las inversiones.

Como constantes operacionales para ambos escenarios, se consideró la última presión de fondo fluyente, medida un Omes antes del inicio de la inyección para algunos pozos y, para otros, un drawdown constante con una presión de fondo

fluyente mínima de 500 psi. Así mismo, se desactivo el historial de producción a partir de las fechas de inicio de inyección.

Es importante mencionar que se revisó el estado de cada uno de los pozos para obtener una transición suave entre el histórico de producción y el de pronóstico. Si los pozos presentan un drawdown alto, el control por presión de fondo fluyente se considerará válido ya que el pozo tendrá la fuerza necesaria para producir por el tiempo de pronóstico. Sin embargo, si el drawdown es muy bajo, la presión de bloque alcanza la presión de pozo rápidamente generando una caída drástica en la producción.

Figura 43. Modelo B – Escenario de depleción natural 2021

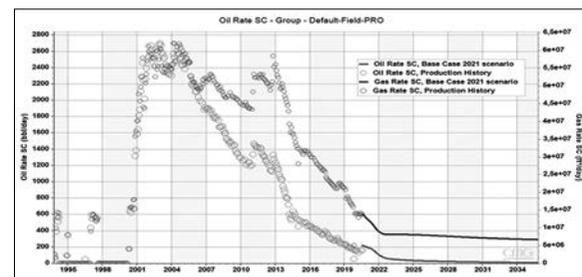
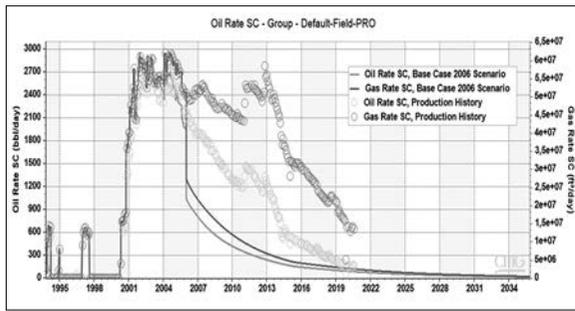


Figura 44. Modelo B – Escenario de depleción natural 2006



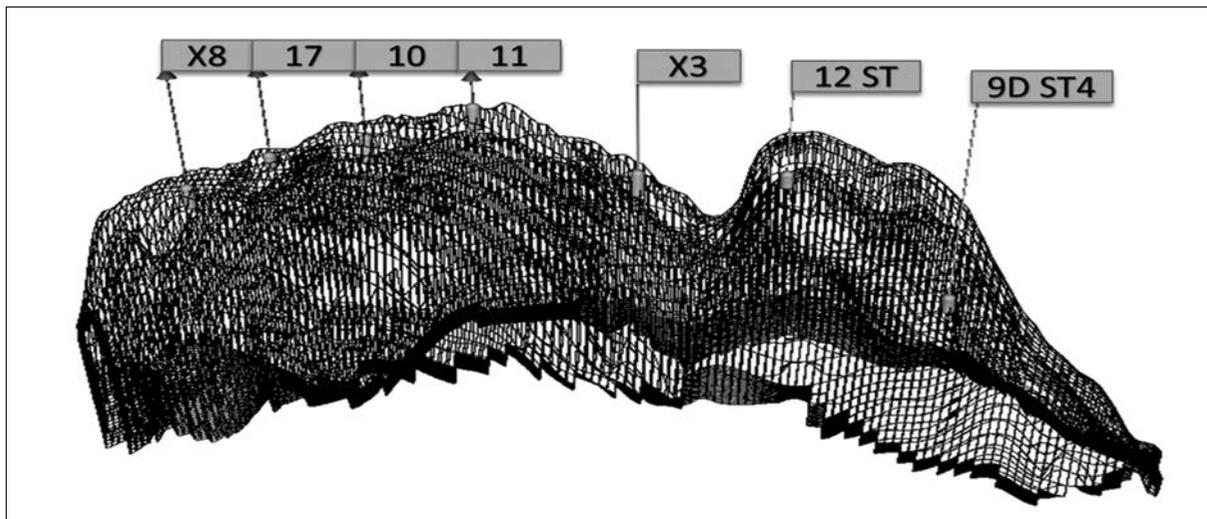
requieren una inversión importante y sumar la perforación de nuevos pozos, en una etapa madura del campo, haría el proyecto no rentable, considerando que el campo cuenta con pozos candidatos a reacondicionamiento.

Los pozos que se tomaron en cuenta como candidatos a reacondicionamiento son pozos que para las fechas de inicio de inyección se encuentran cerrados debido a distintos problemas mecánicos o a problemas de producción de agua (pozos X3, 12 ST y 9D ST4). El pozo 12 ST es un pozo que se encuentra en un bloque separado por una falla de baja transmisibilidad, razón por la cual no es considerado. Por este motivo, el estudio evaluó la inyección únicamente en los pozos 9D ST4 y X3.

**b) Ubicación del pozo inyector**

La evaluación de la ubicación del pozo inyector, consideró solamente pozos que ya fueron perforados, debido a que los métodos de recuperación mejorada

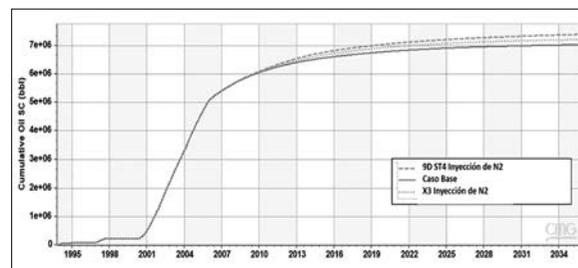
Figura 45. Modelo B – Ubicación de los pozos Inyectores/productores



La evaluación de la ubicación del pozo inyector consistió en inyectar un caudal constante de 6 MMScfd iniciando la inyección el año 2006 para ambas ubicaciones.

Se presenta una comparativa entre las simulaciones para las dos ubicaciones reportando el mejor comportamiento para la ubicación del pozo 9D ST4, presentando una producción acumulada de gas mayor en comparación a la inyección en el pozo X3. Los resultados concuerdan con la investigación de Subero (2009) quien afirma que el pozo inyector se debe encontrar lo más alejado posible de los pozos productores.

Figura 46. Modelo B – Resultados del análisis a la ubicación del pozo inyector



**c) Tiempo de inicio de la Inyección y Caudales de Inyección**

De acuerdo con la primera evaluación de la ubicación de los pozos inyectoros y la disponibilidad del pozo 9D ST4 para convertirse en inyector, debido a que se encuentra cerrado desde el 2006, trabajando como monitor de presión del campo, se evaluaron el tiempo de inicio de la inyección y los caudales de inyección en el mismo. El reservorio en estudio inicia su producción el año 2001. Las fechas de inicio de la inyección fueron definidas en el tiempo para poder evaluar su impacto.

La evaluación del caudal de inyección se realizó para los dos escenarios de depleción natural de manera que se pueda evitar problemas típicos que se describen en la literatura como la canalización del fluido inyectado. Se definieron cinco valores (tabla 21) variando en un rango de uno a ocho MMScfd. Se presenta la producción acumulada de condensado para el análisis de sensibilidad del escenario 2021 (figura 47) y presenta la producción acumulada de condensado para el análisis de sensibilidad del escenario 2006 (figura 48).

Tabla 21. Modelo B - Valores análisis de sensibilidad a los caudales de Inyección

POZO	Escenario 2021	Escenario 2006
	Caudal de Inyección	Caudal de Inyección
9D ST4	1 MMScfd	1 MMScfd
9D ST4	2 MMScfd	2 MMScfd
9D ST4	4 MMScfd	4 MMScfd
9D ST4	6 MMScfd	6 MMScfd
9D ST4	8 MMScfd	8 MMScfd

Figura 47. Modelo B – Análisis de sensibilidad al caudal de inyección escenario 2021

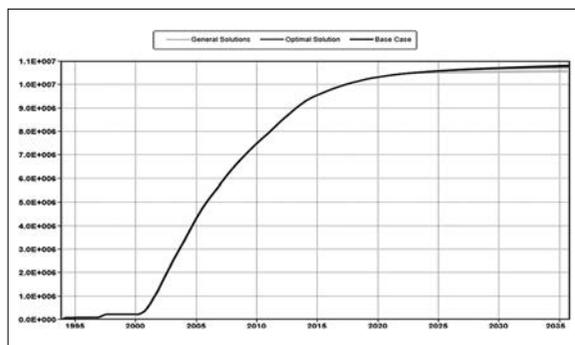
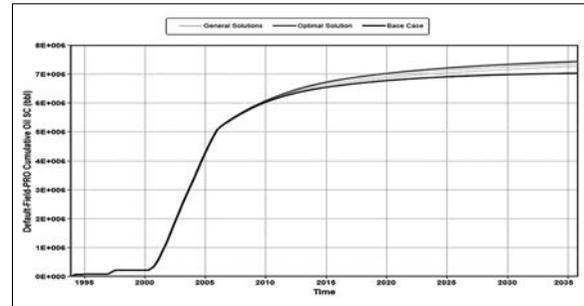


Figura 48. Modelo B – Análisis de sensibilidad al caudal de inyección escenario 2021



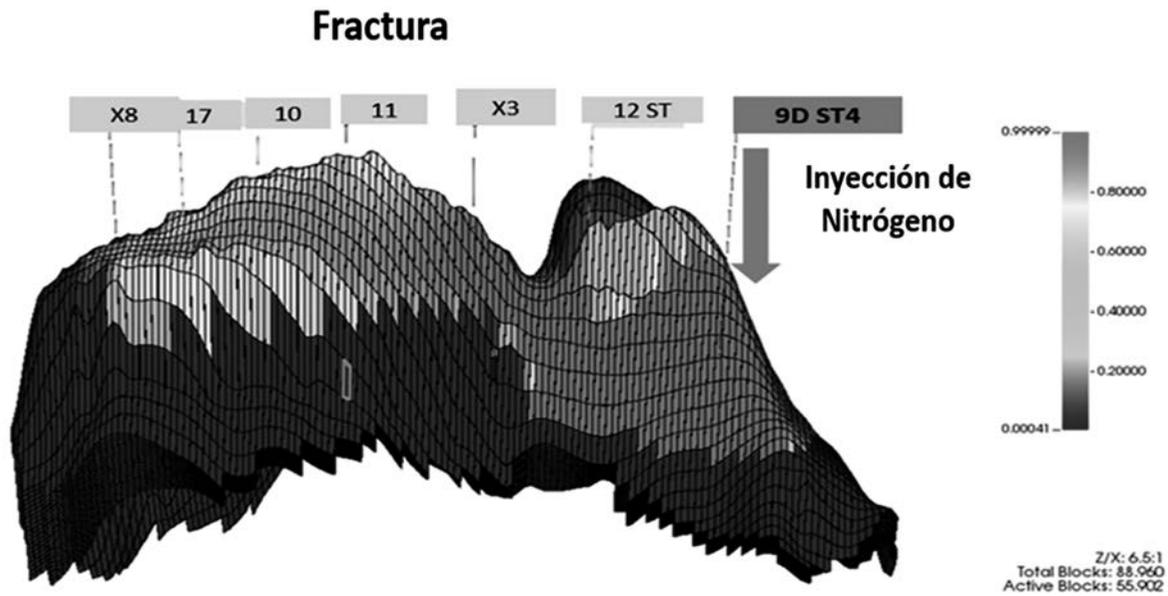
Se reporta como escenario idóneo, el inicio de la inyección en el año 2006 inyectando en el pozo 9D ST4, un caudal de Inyección de 4MMScfd. En este escenario, la presión de reservorio se encuentra en una etapa cercana a la presión de rocío. Iniciando la inyección en esta etapa de la vida productiva del yacimiento, se logra retrasar la depleción de reservorio mediante la manutención de la presión y, a la vez, retrasar el fenómeno de condensación retrograda en el yacimiento alcanzando factores de recobro de condensado mayores.

El escenario 2021 reportó una pérdida de condensado de alrededor de 0,05 MMbbl en todos los casos siendo la razón principal de ello una canalización del fluido inyectado a través de la red de fracturas.

**d) Prueba de trazadores para los escenarios de Inyección**

Se añadió un trazador inyectando en el pozo 9D ST4 (escenario 2021) con el fin de rastrear el avance del Nitrógeno inyectado a través de la red de fracturas, debido a la pérdida de condensado observada para los caudales de inyección en este modelo.

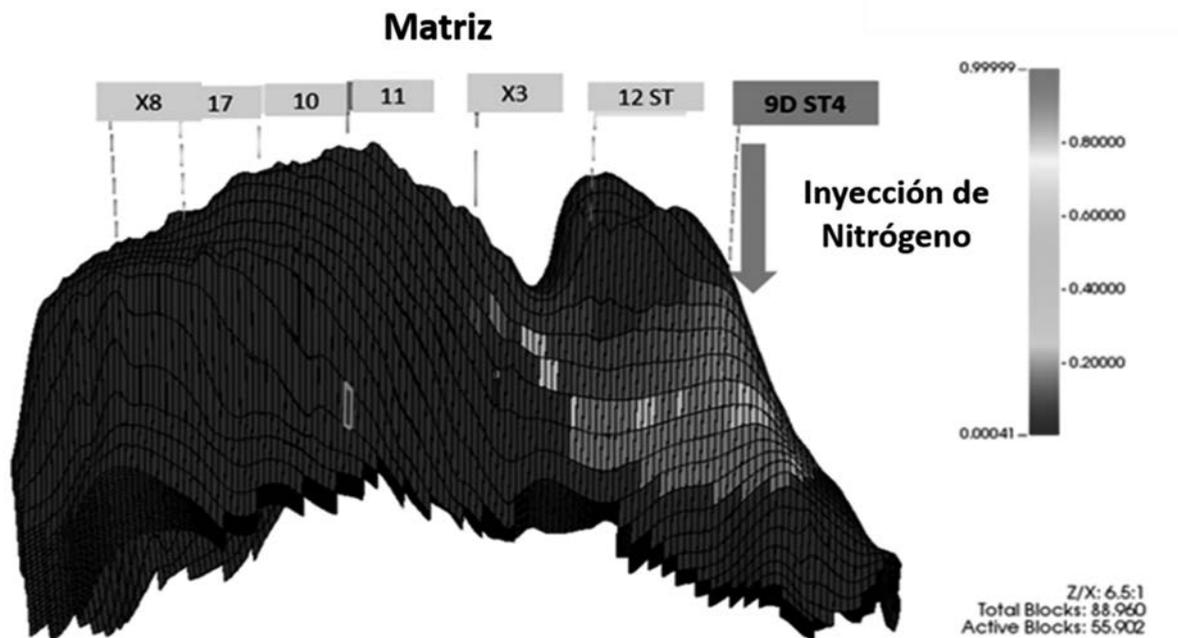
Figura 49. Modelo B – Análisis de trazador en el sistema de fracturas



Se presenta el resultado para el análisis de trazadores. Se observa como el fluido inyectado aumenta su concentración a través de la red de fracturas del modelo con un valor aproximado de 0,8 [gr mol/m<sup>3</sup>] (figura 49). No obstante, la concentración de nitrógeno en la matriz no alcanza

los pozos productores en ninguna etapa del modelo evidenciando una canalización del nitrógeno inyectado a través de la red de fracturas, en vez de desplazar el condensado remanente de la matriz (figura 50).

Figura 50. Modelo B – Análisis de trazador en la matriz



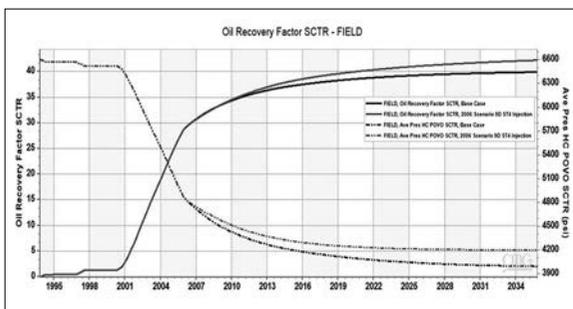
**Discusión de resultados modelo B**

La construcción del modelo B se calibró mediante un proceso de ajuste histórico, adecuado para la producción de condensado, gas y la presión de reservorio, presentando un error menor al 2% para los 27 años de historia de producción del campo. El agua no reportó la producción adecuada debido a que se podría tratar de agua de condensación del campo, por ende, es poco probable obtener una reproducción certera del comportamiento. Sin embargo, el ajuste es adecuado para su representación.

Se reporta el escenario de inyección 2006 con un caudal de inyección de 4 MMScfd como el más idóneo para este modelo pues, a esta fecha, el reservorio se encuentra ingresando en la etapa de condensación retrógrada, alcanzando una re-presurización del reservorio y retrasando la depleción de la presión, para así obtener mayor producción de condensado de la matriz de reservorio.

El modelo B confirmó la relación de caudales propuesta por el modelo sintético pues los caudales de inyección más idóneos se encontraron en un rango de 4% a 6% para retrasar el fenómeno de canalización a través de la red de fracturas.

Figura 51. Modelo B – Factor de recobro de condensado y Presión de reservorio 2006

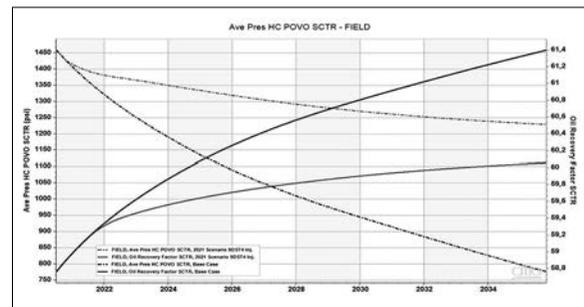


Se presenta la comparación entre el factor de recobro en el caso base y en el caso de inyección para el mejor escenario (figura 51), iniciando la inyección en una etapa cercana a la condensación retrógrada donde se obtiene un factor de recobro de condensado del 4% a 5% adicional y en cuanto a la presión de reservorio, tal como se espera, se alcanza una re-presurización del reservorio para todos los casos.

El escenario 2021 reporta una pérdida de condensado de 0,05 MMbbl para todos los casos. Por ende, el modelo B en contraste a recomendaciones realizadas por diferentes autores que estudiaron

la inyección de nitrógeno en un campo de gas condensado, su inyección en un campo de gas condensado naturalmente fracturado con características de matriz estrecha, a una presión de inyección de 4.000 psi, no llega a ingresar a la matriz, como es el caso del escenario 2021 donde se observa una clara canalización del fluido inyectado. Se presenta la comparación entre el factor de recobro del caso base y el caso de inyección para el escenario 2021 evidenciando un menor factor de recobro del 1,5% (figura 52).

Figura 52. Modelo B – Factor de recobro de condensado y Presión de reservorio 2021



**Evaluación económica**

Se considera:

**a) Costos de Inversión CAPEX**

Se presenta un desglose de los costos de Inversión necesarios para poner en marcha la evaluación de la factibilidad económica de un proyecto de Inyección de Nitrógeno.

Tabla 22. Costos de Inversión

CAPEX		
Perforación	127	MMU\$D
Planta Separadora de Nitrógeno	8	MMU\$D
Reacondicionamiento del pozo inyector	7	MMU\$D
<b>TOTAL</b>	<b>142</b>	<b>MMU\$D</b>

**b) Perforaciones**

El reservorio en estudio cuenta con siete pozos perforados cuyos costos de perforación. Se presentan sus costos de perforación (tabla 23).

Tabla 23. Costos de la Perforación Aproximados

Pozos	Costos de la Perforación																TOTAL	MMU\$D
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013		
X3			1,44E+06	9,85E+03		7,62E+04										7,59E+06		9,12
X8			1,43E+06			1,11E+04												1,44
9D ST4	1,41E+07	2,07E+07	2,32E+06	4,53E+05		3,53E+06		3,78E+06	3,29E+04									44,9
10	5,30E+04	1,38E+03							6,15E+03	2,50E+06	2,03E+07							25,6
11	2,38E+03	5,29E+05	1,66E+07	1,73E+06	1,76E+05	6,32E+04		6,15E+03				2,74E+06						19,1
17														1,63E+06	2,26E+07	2,56E+06	9,67E+04	26,9
Total	1,42E+07	2,13E+07	2,03E+07	2,19E+06	1,76E+05	3,68E+06	0,00E+00	3,79E+06	3,79E+06	2,50E+06	2,03E+07	2,74E+06	0,00E+00	1,63E+06	2,26E+07	1,02E+07	9,67E+04	127,06

### c) Planta de Separación de Nitrógeno

Se considera la compra de una planta PSA (Planta de Separación del Aire) de generación de Nitrógeno con una capacidad de producción de 26,88 MMSCFD y una pureza >95%.

Las plantas PSA son plantas de separación de gases que utilizan presión para separar mediante un tamiz molecular. Estas plantas producen de forma inmediata el nitrógeno.

Tabla 24. Costos Aproximados de planta PSA separadora de Nitrógeno

Modelo	Capacidad Nitrógeno [MMSCFD]	Pureza	COSTO [\$]
KDON(Ar)-20000/30000-650	26,88	>90%	8 MMU\$D

### d) Reacondicionamiento de Pozo Inyector

El proyecto considera el hecho de reacondicionar un pozo productor cerrado, debido a que en los estudios de sensibilidad del pronóstico, se muestra que éste es el mejor caso para realizar una inyección de Nitrógeno en el campo. El pozo 9 se encuentra en una zona alejada de los productores y se encuentra cerrado desde el 2005.

El acondicionamiento del pozo 9 como pozo inyector se estima en un valor máximo de 7 MMUSD.

### e) Costos Operativos

Los costos operativos de producción se obtuvieron mediante entrevistas con especialistas obteniendo valores para las diferentes operaciones, mientras que el costo de la inyección de nitrógeno se estimó tomando como referencia los costos en EE. UU. y Canadá.

Tabla 25. Costos Operativos

Costos de Producción		
Tratamiento de Agua	0,5	\$/Bbl
Procesamiento del gas	1,73	\$/MSCF
Extracción de Petróleo	7	\$/Bbl
Nitrógeno	1	\$/MSCF

### f) Tasa de Descuento

La tasa de descuento para el sector Hidrocarburos en Bolivia está regida por la Agencia Nacional de Hidrocarburos según el D.S. 2830 de Julio 2016 artículo 7mo.

El último dato registrado de la tasa de descuento, por la Agencia Nacional de Hidrocarburos, definido el 2017, es de 13,18%, valor utilizado en los cálculos de flujo de caja.

### g) Precio de los Hidrocarburos

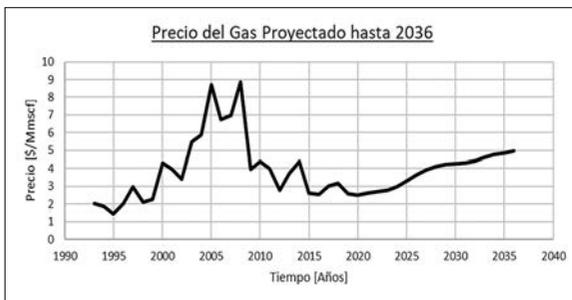
Se presenta el precio de los hidrocarburos a lo largo del tiempo. El precio fijado desde 1993 hasta 2020 es una media de los precios para los años mencionados y, de la misma manera, a partir del 2020, se toma una proyección realizada por la U.S. Energy Information Administration.

Figura 53. Precio del Petróleo proyectado hasta 2036



Datos: U.S. Energy Information Administration, 2020

Figura 54. Precio del Gas proyectado hasta 2036



Datos: U.S. Energy Information Administration, 2020

### h) Flujo de Caja

El proyecto presentado busca maximizar el VAN mediante una Inyección de nitrógeno alcanzando mayor recuperación de hidrocarburos en el yacimiento. Por esta razón, se realizó un flujo de caja para el mejor escenario de inyección y para su respectivo caso base, con la correspondiente inversión CAPEX y OPEX.

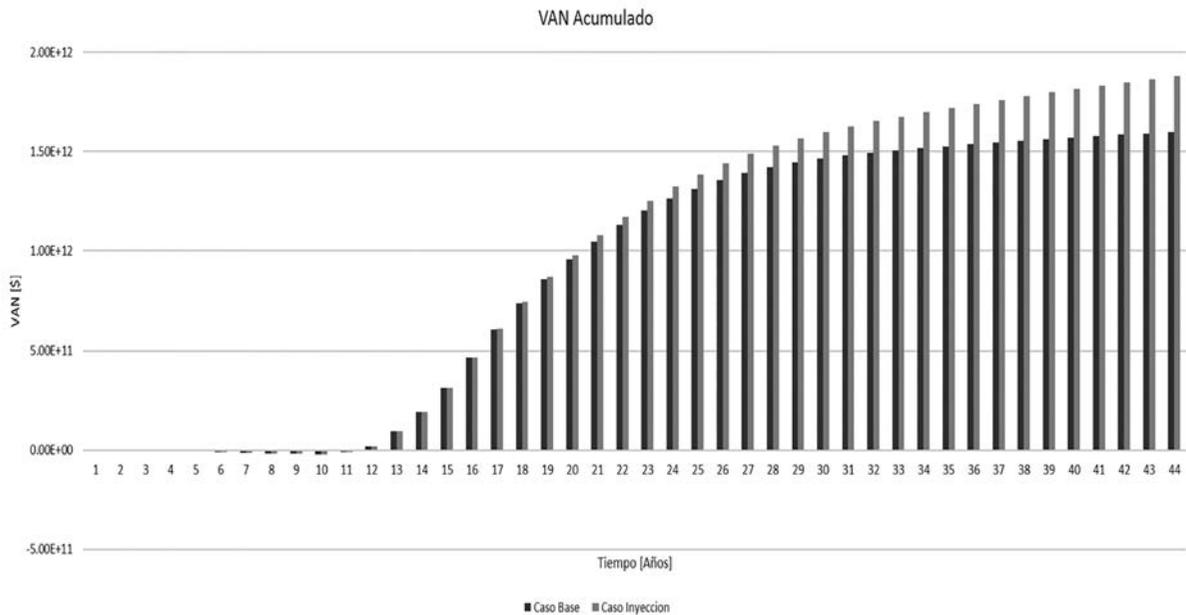
### i) Flujo de Caja Escenario 2006

Se realiza el flujo de caja para este escenario en comparación con el caso base, siendo este positivo, con un VAN de 17% mayor frente al caso base.

Tabla 26. Resumen Flujo de Caja Escenario 2006

	VAN [\$]	TIR	Volumen total de Gas	Volumen total de condensado [bb]
Caso Base Escenario 2006	1,60E+12	69%	1,68E+11	7,04E+06
Intección de N2 Escenario 2006	1,88E+12	69%	2,02E+11	7,44E+06

Figura 55. VAN Acumulado Escenario 2006



## CONCLUSIONES

El reservorio en estudio es naturalmente fracturado, productor de gas-condensado con una relación inicial condensado/gas de 46 bbl/MMscf. La presión inicial fue de 6.540 psi y 265 °F de temperatura. Se encuentra en producción desde noviembre de 1993 con un volumen acumulado de 314,63 Bscf y 9,98 MSTB de condensado. Actualmente, la presión del reservorio se encuentra alrededor de 1.300 psi y, a partir del 2004, la presión cayó por debajo del punto de rocío ingresando a una etapa de condensación retrógrada.

La evaluación del Proyecto de Inyección de Nitrógeno en campos de gas-condensado naturalmente fracturados fue realizada mediante simulación numérica para lo cual se construyeron dos modelos. El primero un modelo sintético conceptual (A), con características de fluido y petrofísicas similares al modelo real. El segundo modelo (B) corresponde a un campo real, ubicado en la zona del Boomerang boliviano.

El modelo A mostró un comportamiento típico de este tipo de reservorios, citado en algunas publicaciones, como lo es la reducción en la recuperación de condensado debido a la canalización del nitrógeno a través de la red de fracturas durante el primer año de inyección. Para mejorar esta condición, se realizó una sensibilización a diferentes propiedades petrofísicas y al caudal de inyección/producción. Como resultado, se encontró una relación entre el caudal Inyección/Producción de +- 5%.

El modelo B fue construido y calibrado mediante el proceso de ajuste histórico de manera que represente adecuadamente el comportamiento pasado y futuro del reservorio. Para el pronóstico de producción se definió como condición operativa, una presión de fondo fluyente constante para los pozos productores desde la fecha de inicio de inyección. Se evaluaron tres estrategias de inyección: ubicación de los pozos inyectoros, fecha de inicio para la inyección y caudales de inyección.

Como resultado del modelo B se determinó que el pozo inyector debe estar ubicado lo más lejano posible de los pozos productores. Por otro lado, se debe iniciar la inyección antes o cerca a la presión de rocío, para brindar mejores factores de recuperación a lo largo de la vida productiva del yacimiento. Finalmente, la relación inyección/producción debe ser del 5% al 10%.

El análisis de la viabilidad económica se realizó mediante la construcción de un flujo de caja para el mejor escenario de inyección con su respectivo casos base. Se tomó en cuenta OPEX y CAPEX correspondientes. El mejor escenario para este modelo fue el inicio de la inyección el año 2006 en el pozo 9DST4 con un caudal de inyección de 4 MMScfd (caso hipotético), generando un VAN adicional del 17%.

## RECOMENDACIONES

Para modelar reservorios naturalmente fracturados se recomienda iniciar con un modelo de simulación sintético, para así poder evaluar un comportamiento inicial del reservorio a estudiar, pues proporciona pautas de los resultados y desafíos que se pueden encontrar en un modelo a escala real.

Una posible ampliación del trabajo sería la recuperación mejorada mediante la Inyección alterna de nitrógeno y gas pesado, con el fin de evaluar la posibilidad de alcanzar miscibilidad con el condensado de la matriz. Por otro lado, se podría evaluar también la aplicación de la técnica Huff and Puff con inyección de nitrógeno.

En cuanto al uso de la EOS para la simulación de reservorios de gas-condensado, se recomienda el agrupamiento de los componentes (lumping) pues inciden directamente en el tiempo de simulación. En el presente trabajo, para una composición total de 28 componentes, se redujo la composición a 18 componentes obteniendo, como resultado, una reducción aproximada del 66% en el tiempo de simulación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abduwahab, Belhaj (2010). Managing the Breakthrough of Injected Nitrogen at a Gas Condensate Reservoir in Abu Dhabi. SPE Internacional, Capital de los Emiratos Arabes, Abu Dhabi: SPE
- Aguilera Roberto (1980). Naturally Fractured Reservoirs. Oklahoma, USA: PennWell Books.900
- Aguilera, Roberto (2010). A Method for Estimating Hydrocarbon Cumulative Production Distribution of Individual Wells in Naturally Fractured Carbonates, Sandstones, Shale Gas, Coalbed Methane and Tight Gas Formations. Schlich School of Engineering. Calgary, Canada: Journal of Canadian Technology.

- Ayala L.F, Ertekin T, Adewumi M.A. (2004). Analysis of Recovery Mechanisms for Naturally Fractured Gas-Condensate Reservoirs. Pensilvania, USA: SPE International.
- Blasingame T. A., and Lee W. J. (1986). Variable-Rate Reservoir Limits Testing. Permian Basin Oil & Gas Recovery Conference of the SPE. Midlan, TX, March 13-14, SPE 15028.
- Barenblatt G. I., Z. Y. (1960). Basic Concepts in the Theory of. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Volume 24, Issue 5. Paginas: 1286-1303.
- Clancy, Gilchrist, Cheng, Bywater (1985). Analysis of Nitrogen-Injection Projects to Develop Screening Guides and Offshore Design Criteria. SPE internacional. Aberdeen, Escocia: SPE.Castelijns, J.H.P., and Hagoort J. (1984) "Recovery of Retrograde Condensate from Naturally Fractured Gas-Condensate Reservoirs." SPE J. 24: 707-717.
- Cinco Ley H. and Samaniego F. (1982). Pressure Transient Analysis for Naturally Fractured Reservoirs. ATCE Conference. New Orleans, USA. September 26-29SPE 11026
- Craft B.C, Hawkins M. (2015). Gas Condensate Reservoirs. En Applied Petroleum Reservoir Engineering Tercera Edición, Massachusetts, USA: Pearson.
- Corey A.T. (1954). The Interrelation Between Gas and Oil Relative Permeabilities. Pensilvania,USA: Gulf Research & Development Company.
- DeSwaan O. (1976). Analytic Solutions for Determining Naturally Fractured Reservoir Properties by Well Testing. Society of Petroleum Engineers Journal. June. pp 117-122. SPE 5346.
- Gachuz-Muro H. et al. (2011) "Laboratory Tests with CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and Lean Natural Gas in a Naturally Fractured Gas-Condensate Reservoir under HP/HT Conditions." Paper presented at the SPE Enhanced Oil Recovery Conference, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Hashemi Fath, Pouranfard, Parandvar, Pourhardi (2016). An Investigation of Different Gas Injection Scenarios as Enhanced Condensate Recovery Method in a Naturally Fractured Gas-Condensate Reservoir. Petroleum Science and Technology. Omidiyeh, Iran: Petroleum Science and Technology.
- Hernández R, Baptista L, Fernández C (2014). Metodología de la Investigación. México: Mc Graw Hill.
- Kazemi H. (1969). Pressure Transient Analysis of Naturally Fractured Reservoirs with Uniform Fracture Distribution. SPE Journal (SPE 2156). December.
- Linderman, Al-Jenaibi, Ghori, Putney, Lawrence, Gallet, Hohensee (2008). Substituting Nitrogen For Hydrocarbon Gas in a Gas Cycling Project. SPE Internacional, Abu Dhabi, Capital de los Emiratos Arabes: SPE.
- Maleki, Rashidi, Mahani, Khomehchi (2012). A simulation Study of Condensate Recovery From One of the Iranian Naturally Fractured Condensate Reservoir. El Sevier. Theran, Iran.
- Mavor M. J. and Cinco Ley H. (1979). Transient Pressure Behavior of Naturally Fractured Reservoirs. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. California. April 18-20. SPE 7977.
- Najurieta H. L. (1980). A Theory for Pressure Transient Analysis in Naturally Fractured Reservoirs. J Pet Tech. July 1980.
- Odeh A. S. (1965). Unsteady-state Behavior of Naturally Fractured Reservoirs. Soc. Pet. Eng. J. March: 60-64.
- Peng, D., and Robinson, D. (1976), "A New Two-Constant Equation of State", Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol. 15, 1976.
- Rojas G. (2003). Inyección de Nitrógeno. En Ingeniería de Yacimientos de Gas Condensado. Puerto la Cruz, Venezuela.
- Reiss L.H (1980). Recovery Mechanisms in Fractured Reservoirs. En The Reservoir Engineering Aspects of Fractured Formations. Paris, Francia: Technip Edition.
- Subero, Candance L. (2009). Numerical Modeling of Nitrogen Injection into Gas-condensate reservoir. Graduate Theses, Dissertations and problems
- Serra K., Reynolds A. C. and Raghavan R. (1983). New Pressure Transient Analysis Methods for Naturally Fractured Reservoirs. January 1st. SPE 10586.
- Turta A.T, Sim S.S.K, Singhal A.K, Hawkins B.F (2008). Basic Investigations on Enhanced Gas Recovery by Gas-Gas Displacement. Alberta Research Council. Alberta, Canada: Journal of Petroleum Technology.
- U.S. Energy Information Administration, (2020). Annual Energy Outlook 2020. recuperado de U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/#/?id=1AEO2020&cases=ref2020&sourcekey=0>

Xingru,Wu (2013). Nitrogen Injection Experience to Development Gas and Gas Condensate Fields in Rocky Mountains. SPE Internacional. Oklahoma, USA: IPTC.

Warren J.E, Root P,J (1963). The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs.Pittsburgh, USA: SPE International.

YPFB (2019). Informe de Reservas. YPFB. Bolivia

YPFB (2011). Informe Geológico. YPFB. Bolivia



# ¿ELASTICIDAD PRECIO DE LA CONTRIBUCIÓN?

Carlos Hugo Barbery Alpire, CPP<sup>1</sup>

El primer indicador a analizar en cualquier negocio es sin lugar a dudas el nivel de contribución, pues si éste no está controlado y en niveles adecuados en relación al mercado, poco se puede hacer y menos esperar para que el resultado neto sea satisfactorio. Por ello, el nombre de “contribución” porque contribuye al resultado neto, parafraseando a Kiyosaki R. (2012). Es así que, negocios con mucho sustento en costos variables, tendrán un nivel de contribución bajo y viceversa. Por ello, la trascendencia de su quirúrgica medición, control y seguimiento.

El margen de contribución según De Jaime J. (2007) no es otra cosa que la diferencia entre el ingreso por ventas netas menos el costo variable. Si se considera el volumen de ventas será absoluto, si se considera por unidad será unitario y, en ambos casos, relacionado con el ingreso por ventas netas, será relativo en términos porcentuales.

¿Habrá entonces una elasticidad precio de la contribución? Es lo que se trata de ilustrar en el presente documento, pero, para ello, es preciso profundizar en algunos conceptos previos, aunque ya conocidos pero poco interrelacionados.

Para ello, se sustentará con definiciones gracias a Keat P. & Young P. (2004) que sintetizan los conceptos siguientes:

a) *Elasticidad precio de la demanda*, un cambio porcentual en la cantidad demandada causado por un cambio porcentual en el precio, dentro de un mismo periodo de tiempo.

$$Epd = \frac{\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1}}{\frac{P_2 - P_1}{P_1}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Si el resultado es  $> 1$ , se considera demanda elástica, es decir, el cambio en las cantidades es mayor que el cambio en los precios, y si el resultado es  $< 1$ , se considera demanda inelástica, es decir, el cambio en las cantidades es menor que el cambio en los precios.

b) *Elasticidad ingreso*, un cambio porcentual en la cantidad demandada causado por un cambio porcentual en el ingreso, dentro de un mismo periodo de tiempo.

$$Eid = \frac{\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1}}{\frac{I_2 - I_1}{I_1}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Si el resultado es  $> 1$ , se considera que son bienes normales, es decir, que la cantidad aumenta cuando

<sup>1</sup> Miembro del Consejo de Investigaciones -ANCB-SC.

aumenta el ingreso, y si el resultado es  $< 1$ , se considera bienes inferiores, es decir, cantidad disminuye cuando aumenta el ingreso, por desplazamiento a bienes sustitutos de mayor cuantía.

c) *Elasticidad cruzada*, un cambio porcentual en la cantidad demandada de un bien “x” causado por un cambio porcentual en el precio de otro bien “y” relacionado, dentro de un mismo periodo de tiempo.

$$E_{xy} = \frac{\frac{Qx_2 - Qx_1}{Qx_1}}{\frac{Py_2 - Py_1}{Py_1}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Si el resultado es  $> 1$ , se considera que son bienes sustitutos, es decir, si aumenta el precio del bien “y” aumenta la cantidad del bien “x”, y si el resultado es  $< 1$ , se considera bienes complementarios, es decir, si aumenta el precio del bien “y” disminuye la cantidad del bien “x”.

Hasta aquí, con seguridad, no se ha expuesto nada desconocido, pues de manera individual ya se tienen presentes los conceptos antes mencionados. La dificultad es que con ellos no se incluye una variable fundamental que son los costos de los bienes que normalmente no sufren cambios ante las decisiones de precios de venta de bienes o servicios y, por consiguiente, no se puede valorar el nivel de contribución.

Para saldar esta situación, recorro a otro concepto más analítico, como es el Movimiento de Ventas de Equilibrio – MVE que, de acuerdo a Baños A. (2011), se define como: *La MVE permite calcular la variación requerida en el volumen de ventas, ante una modificación en el precio, para dejar en equilibrado el resultado de la empresa*, entendido como el resultado en la contribución.

$$MVE(\%) = \frac{-\Delta P(\%)}{CMg_0(\%) + \Delta P(\%)} * 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

$\Delta P(\%)$  = Modificación del precio

$CMg_0(\%)$  = Contribución marginal inicial

Con este concepto, se empieza a profundizar en el análisis desde la perspectiva de la contribución, aunque con ello surge una nueva necesidad, que es tomar en cuenta la rentabilidad de la inversión en inventario, pues mientras menor sea el contribución marginal de un bien, mayor será el requerimiento de MVE lo que implica mayor disponibilidad de dicho bien y un costo de oportunidad del dinero invertido en su abastecimiento.

En este sentido, es importante considerar el concepto del retorno sobre la inversión en inventario, GMROI (Gross margin return on inventory investment) que según Stern L., El-Ansary A., et.all. (1999), se define como: *El GMROI permite evaluar el inventario según el rendimiento de la inversión que se produce*. En otras palabras, tiene una doble identidad, es decir, que es equivalente tanto a:

i) El cociente entre la contribución total del periodo y el inventario promedio del periodo,

ii) El margen de contribución (%) por la rotación del periodo.

$$GMROI = \frac{\sum C_0}{Ip_0} = R_0 * CMg_0(\%) \quad \text{Ecuación 5}$$

donde:

$\sum C_0$  = Contribución acumulada en el periodo 0

$Ip_0$  = Inventario promedio en el periodo 0

$R_0$  = Rotación del inventario en el periodo 0

$CMg_0(\%)$  = Contribución marginal en el periodo 0

Un GMROI debe ser  $> 1$  pues, significa que por cada dólar invertido en el inventario, existe un retorno y una agregación de valor.

Por lo tanto, al momento de valorar la conveniencia de un cambio de precios, desde una perspectiva holística, necesariamente debe realizarse considerando su impacto en la contribución como primera variable, luego las elasticidades (en relación del producto mismo, respecto a productos sustitutos o complementarios, como así también del ingreso del segmento o nicho de mercado), la rentabilidad de la inversión en inventario y el costo de oportunidad del efectivo destinado para tal efecto, la participación del mercado y la fortaleza de los competidores, dado

que resulta arriesgado asumir el comportamiento de algunas de estas variables bajo el principio de “ceteris paribus”.

Ahora bien, “elasticidad precio de la contribución” ¿es posible o será de utilidad analítica? Entendemos que sí lo es, pues permitirá: *Evaluar si los cambios de precios han tenido impacto favorable en la contribución sin generar un desmesurado movimiento en las cantidades vendidas.* Para explicar el planteamiento, se expone un modelo analítico.

- a) Se analiza un bien “x” en unos determinados periodos de tiempo:  $t_1, t_2 \dots t_n$
- b) Se considera como insumos para el análisis en dichos periodos de tiempo a:
  - Precios de venta unitarios
  - Costos de venta unitarios
  - Unidades vendidas
- c) Como resultado de lo anterior, se determinan:
  - Márgenes de contribución (CMg%)
  - Contribución total en términos monetarios (CMg\$)
- d) Seguidamente, se debe construir los índices: Cambio en los precios de venta unitarios entre los distintos periodos:

$$\partial P = \frac{Pt_2 - Pt_1}{Pt_1} * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Cambio en la contribución total en términos monetarios entre los distintos periodos:

$$\partial CMg\$ = \frac{CMg\$t_2 - CMg\$t_1}{CMg\$t_1} * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

- e) Posteriormente, se determina el impacto global en la contribución entre distintos periodos, resultado del producto de los dos índices anteriores:

$$IgCMg\$ = \partial P * \partial CMg\$ \quad \text{Ecuación 8}$$

- f) Luego, se determina el cambio en las cantidades vendidas entre los distintos periodos:

$$\partial Q = \frac{Qt_2 - Qt_1}{Qt_1} * 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

- g) Finalmente, con el denominativo de “Control: Ctrl” se calcula en términos absolutos el producto del impacto global en la contribución en términos monetarios entre los distintos periodos y el cambio en las unidades vendidas entre los diferentes periodos:

$$Ctrl = ABS(IgCMg\$ * \partial Q) \quad \text{Ecuación 10}$$

Por lo tanto, considerando todos los periodos de tiempo del análisis, en aquel periodo donde el Ctrl sea el mínimo, será donde se encuentre el punto óptimo que determine que: *El cambio de precio ha tenido impacto favorable en la contribución sin generar un desmesurado movimiento en las cantidades vendidas.*

Para efectos ilustrativos se considera un bien básico de la canasta familiar, que tiene por característica que es un bien normal, con casi nula incidencia de bienes sustitutos o complementarios.

Tabla 1. Canasta familiar

VARIABLE	PERIODOS				
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
Precio unitario	19,90	15,90	17,90	16,90	17,90
Costo unitario	12,90	12,90	12,90	12,90	12,90
CMg unitario	7	3	5	4	5
CMg (%)	35,18%	18,87%	27,93%	23,67%	27,93%
Unidades vendidas	60	270	140	220	135
CMg \$	420	810	700	880	675
<b>CÁLCULOS</b>					
δP	-20,10%	12,58%	-5,59%	5,92%	
δ CMg \$	92,86%	-13,58%	25,71%	-23,30%	
Ig CMg \$	1,5409	0,9729	1,1869	0,8124	
δ Q	4,5000	0,5185	1,5714	0,6136	
<b>Ctrl</b>	<b>6,9341</b>	<b>0,5045</b>	<b>1,8651</b>	<b>0,4985</b>	

**Nota.** El precio unitario debe entenderse como “precio efectivo” es decir: libre de distorsiones como impuestos a la venta, descuentos, bonificaciones o recargos.

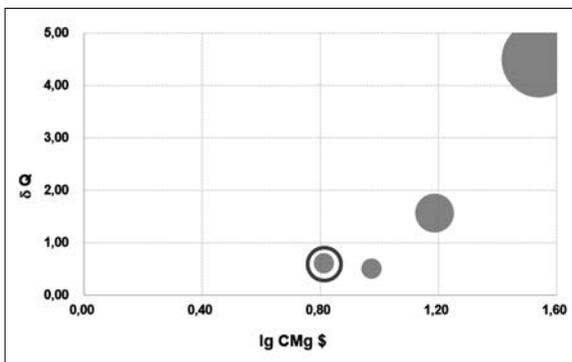
Como se puede apreciar, en el análisis del ejemplo anterior, en el periodo t<sub>5</sub> se encuentra el valor mínimo de Ctrl = 0,4985 lo que implica que, siendo el precio unitario inicial de 19,90, el cambio de precios genera un impacto favorable en la contribución sin generar un desmesurado movimiento en las cantidades vendidas, es 17,90.

Para los periodos de análisis t2 a t5, se cumple el MVE requerido para mantener el resultado a nivel contribución. A manera de demostración, con el nuevo precio de 15,90 resulta un  $\delta P$  de -20,10% y, para ello, el MVE sería 133%, es decir, se requieren 140 unidades, y en el ejemplo, la venta es de 270 unidades, pero, se logra un 93% más de contribución con 4,5 veces más de unidades vendidas, lo que en términos de administración de inventario significa un costo de oportunidad.

Sin embargo, en t5, el precio de 17,90 resulta un  $\delta P$  de -10,05% (respecto al precio inicial de t1) con lo cual el MVE sería 40%, es decir, se requieren 84 unidades, y, en el ejemplo, la venta es de 135 unidades, es decir, se logra un 61% más de contribución, pero, con 2,3 veces más de unidades vendidas, por supuesto, un mejor escenario que el anteriormente descrito, pues mientras menos inventario se administre para conseguir una mejor contribución, el resultado en el GMROI será mejor, es decir, que por cada dólar de inventario se tendrá un mejor retorno y, finalmente, al tener más espacio disponible para administrar otros bienes que generen contribución, en términos de costo de oportunidad, la rentabilidad por metro cuadrado<sup>2</sup> (GMROS), será mayor.

Lo anteriormente mencionado, se aprecia gráficamente en las imágenes que resultan de la tabla expuesta anteriormente. Se visualiza el mejor escenario remarcado con un círculo o rectángulo:

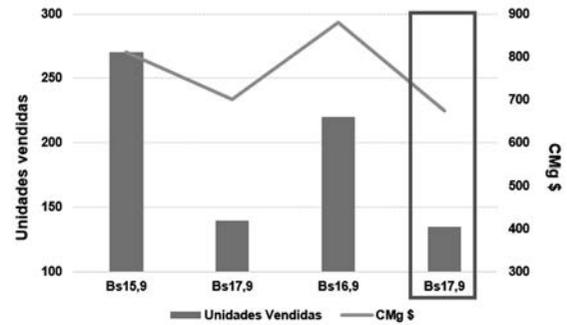
Figura 1. Escenarios



Nota. El tamaño de la burbuja de la imagen es equivalente al valor calculado de *Ctrl* para cada periodo:  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  y  $t_5$ .

2 GMROS, por sus siglas del inglés: Gross margin return on space, es decir, es el retorno en cantidad monetaria por cada m2 de área disponible para la venta.

Figura 2. Unidades vendidas



Como conclusión, se indica que este análisis no se constituye en determinístico, sino, en una herramienta más para contribuir al análisis holístico, multivariable y multivariante que debe tener una adecuada gestión de precios.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baños A. (2011). *Los secretos de los precios, de los dos lados del mostrador*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Granica.

De Jaime J. (2007). *Pricing, nuevas estrategias de precios*. Madrid, España: ESIC Editorial – Business Marketing School.

Keat P. & Young P. (2004). *Economía de Empresa*. Cámara Nacional de la Industria. 4ta. Ed., Mexico D.F., México: Editorial Mexicana.

Kiyosaki R. (2012). *Guía para invertir*. Mexico D.F., México: Penguin Random House Grupo Editorial

Stern L., El-Ansary A., et.all. (1999). *Canales de Comercialización*. 5ta. Ed., Madrid, España: Prentice Hall.

# EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE QUEMAS SOBRE LA RIQUEZA Y DIVERSIDAD DE AVES EN EL MUNICIPIO DE CONCEPCIÓN<sup>1</sup>

Anahi Cosky Paca Condori<sup>2</sup>, Betty Flores Zanabria<sup>3</sup> y Margarita Balcázar Solís<sup>4</sup>

## RESUMEN

La región del bosque chiquitano posee una extraordinaria riqueza en recursos naturales, pero, en estos últimos años, estas áreas están fuertemente afectadas, principalmente, por el incremento de la población humana, a la par de sus requerimientos básicos. Es así que en los últimos años, las quemas indiscriminadas por asentamiento humano ha fragmentado el bosque y puso en riesgo a este tipo de vegetación y sus características como riqueza natural.

Estas áreas, hace tres años, están afectadas fuertemente por incendios provocados de forma aleatoria con la finalidad que apunta a la expansión de fronteras agrícolas, ganaderas, extracción de madera y recursos naturales de forma ilícita, causando un desequilibrio cada vez mayor en este ecosistema.

El presente trabajo de investigación realizado en el municipio de Concepción, tiene como finalidad

evaluar la influencia de la quema sobre la riqueza y la diversidad de especies, en las aves, tomando en cuenta los cambios en la vegetación. Para ello, se definieron criterios de delimitación: grado de las áreas quemadas, imágenes satélites del área, datos locales sobre este tipo de perturbación de los comunarios y autoridades del municipio de Concepción. Mediante esos criterios, se categorizaron estas áreas para poder evaluar la influencia de estas quemas en el grupo de aves.

## ANTECEDENTES

Se describe:

### Tipo de Vegetación

El área de estudio presenta dos tipos de vegetación, el bosque Chiquitano y Cerrado. El primero es una de las nueve ecorregiones del departamento de Santa Cruz que se caracteriza por ser única en el mundo desde el punto de vista biológico. Comprende un conjunto de series de vegetación de manera que, en su interior, alberga una gran diversidad de flora y fauna propia de la zona. El segundo, Cerrado, es una de las más grandes de Sudamérica extendiéndose, por el centro de Brasil, el este de Bolivia y el noreste de Paraguay.

1 Programa UPSA-ANCB-SC.

2 Miembro del Consejo de Investigaciones de la ANCB-SC, Investigador de Aves Bolivianas.

3 Miembro del Consejo de Investigaciones de la ANCB-SC, Investigador de Aves Bolivianas.

4 Investigador.

En Bolivia, el Cerrado constituye una de las unidades biogeográficas más características y que mayor influencia florística y faunística paleo-histórica ha tenido, posiblemente, desde el Pleistoceno. El Cerrado se extiende por el centro y el este del departamento de Santa Cruz (Provincias Guarayos, Ñuflo de Chávez, Velasco, A. Sandoval, G. Busch, Chiquitos, este de Cordillera, A. Ibáñez, Warnes, O. Santiesteban y Sara). Fisiográficamente, su distribución abarca la porción occidental del Escudo Precámbrico Brasileño y sus serranías asociadas (Chiquitanía).

### Estructura del bosque

El bosque medio alto, presenta un dosel entre 15 metros y 25 metros, incluso de 10 metros, en las facies de suelo pedregoso poco profundos; los emergentes suelen ser de hasta 30 metros de altura, con un segundo nivel arbóreo de 10 metros a 12 metros discontinuo. El estrato arbustivo es medianamente denso de 5 metros a 8 metros, lianas abundantes y un estrato arbustivo denso.

La especie dominante es *Anadenanthera columbrina* que, generalmente, va acompañada de ciertas especies arbóreas características, como *Casearia gossypiosperma*, *Amburana cearensis*, *Combretum leprosum*, *Tabebuia insignis*, *Tabebuia serratifolia*, *Eriotheca roseorum*, *Poeppigia procera* y *Aspidosperma cylindrocarpon*.

Los barbechos, presentes en los lugares de estudio, están compuestos por una vegetación juvenil extremadamente tupida con un dosel de 0 metros a 5 metros, donde se encuentran especies colonizadoras características como individuos de la especie *Cecropia concolor* más conocidas como *ambaibo*, *Resinus communis*, *ficus eximia*, *Acrocomia aculeata*, *Attalea phalerata*, entre otras.

Los bosques, sobre todo, en los municipios de Concepción, San Antonio de Lomerío, San Javier, y San Ramón presentan especies maderables valiosas como morado (*Machaerium scleroxylon*), picana negra (*Cordia alliodora*), roble o zorico (*Amburana cearensis*) y tarara amarilla (*Centrolobium cf. microchaete*), curupau blanco (*Anadenanthera macrocarpa*), cuta de monte (*Phyllosthyllon multiflorum*), jichituriqui colorado (*Aspidosperma pyriformium*), jichituriqui amarillo (*Aspidosperma cf. macrocarpon*), paquio (*Hymenaea coubaril*), sirari (*Peltogyne sp.*), tajibo morado (*Tabebuia impetiginosa*), tarara colorada (*Platymiscium sp.*) y verdolago (*Calycophyllum multiflorum*). Entre otras especies, se encuentran

junao (*Pterogyne nitens*), cuchi (*Atrium urundeuva*), momoqui (*Caesalpinia floribunda*), soto (*Schinopsis cf. brasiliensis*), tasa o garroncillo (*Poppigia procera*) y yesquero (*Cariniana estrellensis*)

### Disturbios en un hábitat

Los disturbios causados en un hábitat natural juegan un papel fundamental como estructuradores de las comunidades biológicas ya que modifican los hábitats y, con ellos, la disponibilidad de recursos que son utilizados por las diferentes especies que las componen (Bock *et al.* 1993, Moreira *et al.* 2003, Adeney *et al.* 2006, Allen *et al.* 2006, Martín & McIntyre, 2007). Entre los disturbios frecuentes se tiene los incendios como unos de los principales factores estructuradores en los ecosistemas terrestres (Bond *et al.* 2003, Barlow & Peres, 2004, Bock & Block 2005). Según un estudio realizado por Moritz y colaboradores (2012), se menciona que en las últimas décadas los incendios provocados por el ser humano han cobrado cada vez más importancia a escala global debido a un aumento en su frecuencia e intensidad y también asegura que, para fines de este siglo, se incrementen aún más en todo el planeta.

Desde julio 2019 a octubre 2019, gran parte del territorio nacional fue afectado por el fuego, 2.892.024 hectáreas de bosque (74% del total quemado), y 907.130 hectáreas (23% "no bosque") y 3% áreas antrópicas (uso agropecuario). El 61,7% de estas áreas, históricamente, entre 2001 y 2018 habían enfrentado quemadas y 35,2% se quemaron por primera vez (Anívarro *et al.* 2019).

### Las aves

Bolivia cuenta con 1.437 especies de aves (Herzong *et al.* 2017) y es considerado un país megadiverso, ubicado en el sexto lugar a nivel mundial en biodiversidad de aves. El departamento de Santa Cruz, alberga el 74% de las aves del país, debido a que cuenta con nueve de las 12 ecorregiones que se encuentran presentes en Bolivia que son: Amazonía, Chiquitanía, Chaco, Chaco Serrano, Sabanas Inundables, Yungas, Cerrado, Bosque Boliviano-Tucumano y Valles Secos Interandinos (Ibisch & Mérida 2003).

### Las aves y las quemadas

El grupo de las aves está fuertemente relacionado con la estructura vertical y horizontal de la vegetación, por lo que son sensibles a disturbios como el fuego (Reinking 2005, Coppedge *et al.* 2008). A pesar de que los incendios no provocan una mortalidad alta en las aves adultas en forma directa, debido

a que éstas presentan una movilidad alta (Bendell 1974, Reichman 1987, Zimmerman 1997, Pons *et al.* 2003b), los huevos y los pichones pueden ver afectados (Zimmerman 1997, Robbins *et al.* 2002) y, aunque muchas especies de aves pueden volver a nidificar en una misma temporada y área, otras no lo hacen. Cabe mencionar que el éxito reproductivo de las aves depende de la condición del hábitat, y está relacionado con la época en la que se produce los incendios o las quemas.

## OBJETIVOS

Estos son:

### Objetivo general

Evaluar la influencia y severidad en áreas afectadas y no afectadas por el fuego sobre la riqueza y diversidad de aves.

### Objetivos específicos

- Analizar a partir de datos cartográficos, el cambio de la cobertura boscosa en un periodo de diez años, en el área de estudio seleccionada dentro del municipio de Concepción.
- Realizar la caracterización de la riqueza y biodiversidad enfocada en el estudio de la avifauna en las áreas delimitadas.
- Identificar las especies claves de aves para promover el aviturismo o turismo en aves de la región.

- Proponer medidas orientadas a la prevención y minimización de riesgos e impactos a la Biodiversidad.

## ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

La planificación metodológica para el desarrollo del trabajo, contempla dos componentes:

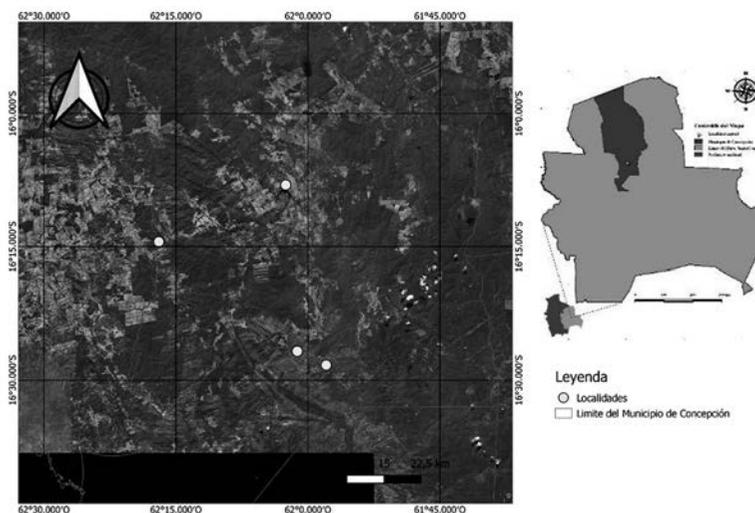
- **Recopilación de información**, que incluye la búsqueda de información secundaria sobre la avifauna de la zona.
- **Trabajo de campo**, identificación de los especímenes observados-capturados y la redacción de los informes correspondientes.

## ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo de investigación se realizó en el municipio de Concepción, ubicado a 290 kilómetros al noreste del municipio de Santa Cruz de la Sierra (figura 1).

Presenta un Bosque meridional del escudo precámbrico, condicionado por el clima subhúmedo pluviestacional. En su forma típica, se sitúa en valles o peniplanicies con suelos pedregosos medianamente profundos, presentándose en los piedemontes bien drenados y, en las llanuras, se instala sobre ondulaciones bien drenadas con suelos de textura arenosa a areno limosa.

Figura 1. Ubicación de las localidades muestreadas en Concepción



Fuente: Google Eath

Nota: Los puntos indican las localidades

### Delimitación área de estudio

Se consideran dos áreas:

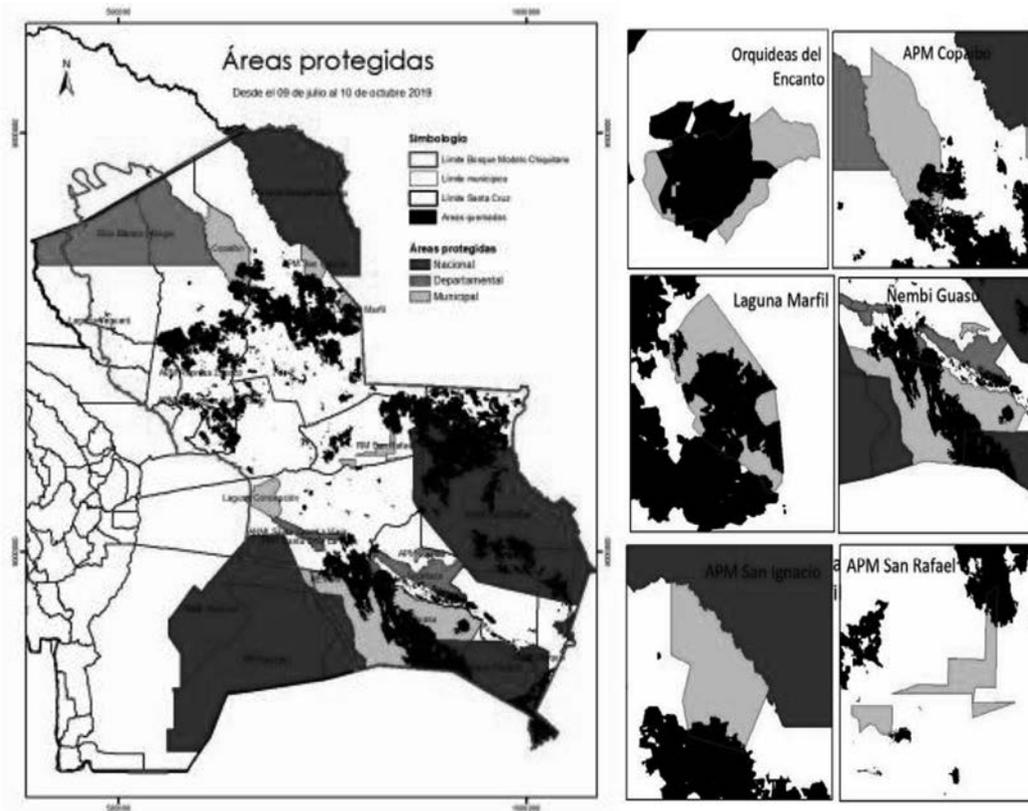
#### a) Áreas de Influencia Directa por el fuego

Se considera área de influencia directa, específicamente, zonas en la que las quemadas hayan tenido mayor impacto en la vegetación, para así poder evaluar los cambios de estructura y dinámica poblacional de las aves. Basados en este criterio se identificaron cuatro localidades (tabla 1).

#### b) Área testigo

Brindan información de especies que naturalmente se encontraban o se encuentran en la zona. Se eligen áreas que se encuentran a más de 5 kilómetros de las áreas de influencia directa. En este caso, basados en información cartográfica, se definió realizar el estudio en las cuatro localidades seleccionadas.

Figura 2. Área quemada en áreas protegidas que se encuentran en el Bosque Modelo Chiquitano



Fuente: Extraído de Anívarro *et. al.*, 2019.

Las localidades seleccionadas son:

Tabla 1. Lista de localidades evaluadas en la primera fase

Localidades	Latitud	Longitud	Altura (m)
Localidad 1	-16,122614	-62,0319237	495
Localidad 2	-16,2435641	-62,245505	619
Localidad 3	-16.471411	-61.965394	593
Localidad 4	-16.445461	-62.020103	665

**Nota:** Localidad 1 corresponde a Laguna Sapocó, Localidad 2 corresponde a La Adolorida, Localidad 3 corresponde a El Encanto y Localidad 4 corresponde a El Camen.

## METODOLOGÍA

Está constituida por:

### Recopilación de información

A pesar de existir grandes vacíos de información en cuanto a estudios de biodiversidad, para llevar a cabo el presente estudio se recopiló información básica de zonas adyacentes existente en publicaciones, trabajos científicos, boletines, estudios de impacto ambiental, y base de datos del Centro de Geoespacial para la conservación de la biodiversidad de Bolivia.

### Evaluación de la avifauna

Para llevar a cabo el presente estudio de riqueza y biodiversidad de aves, considerando su biología y ecología, se usaron diferentes métodos de muestreo.

El trabajo de campo se realizó durante los meses de marzo y junio del 2021, siguiendo la metodología de RAP multidisciplinario (Rapid Assessment Program) que consiste en una evaluación biológica rápida de campo que permite estimar el estado de la biodiversidad en el área. Es así que para el registro de la avifauna presente en la zona, se llevaron a cabo:

**Transectos.** Registros realizados a lo largo de los caminos, cubriendo los lugares posibles de cada senda para registrar a las aves y los diferentes estratos de vegetación. El esfuerzo de muestreo fue distribuido en horas matinales (05:00-11:00) y vespertinas (15:00-18:00), durante los meses de muestreo. Las aves fueron identificadas, principalmente, por observación directa y, secundariamente, mediante grabaciones de cantos.

El uso de registros fonográficos ayuda a maximizar esfuerzos sobre la composición de especies de un determinado lugar en términos de tiempo y número de observadores (Parker 1991). El análisis de los grupos tróficos fue basado en observaciones sobre el comportamiento de forrajeo según Aves del Mundo (Billerman *et al.* 2021), la clasificación de las especies según SACC (2021) y el tipo de migración según la guía de Aves de Bolivia (Herzog *et al.* 2017). En cuanto el estado de conservación, a nivel global, se realizó por medio de IUCN 2021 y, a nivel local, se revisó el libro rojo de Vertebrados de Bolivia.

### Evaluación de la vegetación

Para la evaluación de la vegetación se aplicaron transectos y se utilizaron datos históricos de las localidades evaluadas.

**Transectos.** Este método es ampliamente utilizado por la rapidez con que se mide y por la mayor heterogeneidad con que se muestrea la vegetación. Un transecto es un rectángulo ubicado en un lugar para medir ciertos parámetros de un determinado tipo de vegetación. El ancho del transecto es variable, depende de la clase de plantas y la densidad de individuos. Si se quiere muestrear árboles, en bosques densos, el ancho del transecto es menor, mientras que, en áreas quemadas o pastoreadas (pocos árboles) será mayor. Para árboles medianos (10 cm-30 cm DAP), el ancho puede variar de 10 metros a 20 metros y para los arbustos, árboles pequeños (1 cm-10 cm DAP) y hierbas, el ancho puede ser de unos metros a dos metros.

### Sistema de Información Geográfica (SIG)

Mediante mapas satelitales pasados y actuales, se evaluaron las localidades en el área de estudio. La caracterización del área se realizó con QGIS3 y Google Earth Pro. También se consultó la plataforma SAFIPRO y se utilizó los datos de Fire Information for Resource Management System (MODIS – VIIRS).

### Análisis estadísticos de la avifauna

Se determinó:

**Riqueza específica (S).** Número total de especies encontradas durante la implementación de los métodos.

**Curva de acumulación de especies.** Se determinó mediante el conteo de especies registradas durante cada día de muestreo, en forma acumulativa. Se utilizó EstimateWin910 y, para graficar, se usó Excel.

**Diversidad de especies.** Es analizada con el índice de Shannon-Weaver (Moreno, 2001).

$$H' = - \sum pi \ln (pi) \quad \text{Ecuación 1}$$

**Dominancia de especies.** Es analizada mediante el índice de inversa de Simpson, donde pi es igual a la abundancia proporcional de la especie i.

$$\lambda = \sum pi^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

**Similitud.** Se utilizó el índice de Jaccard, donde H es igual a la cantidad de especies presentes en la comunidad A y B, H'max es igual a la sumatoria de las especies encontradas en la comunidad A y B menos la cantidad de especies comunes entre las comunidades A y B, cuyo resultado expresa la semejanza entre

comunidades según la abundancia de las mismas, siendo 0 cuando ambos sitios son completamente desiguales y 1 cuando son idénticos o iguales.

$$J = \frac{H}{H'máx} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para realizar los análisis se utilizaron PAST3 y EstimateWin910 y para graficar se utilizó el Excel.

## RESULTADOS

Estos son:

### Vegetación

El área Biogeográfica del Cerrado es una de las más grandes de Sudamérica, extendiéndose en general, desde el centro de Brasil, al este de Bolivia y noreste de Paraguay.

El área de estudio presenta, en su mayoría, una vegetación de cerrado, con remanentes de campo cerrado que se intercala con bosque seco Chiquitano, con intervención antrópica considerable, sobre todo, en áreas circundantes a poblaciones como: Concepción, San Josecito, El Carmen o El Encanto.

El Bosque Seco Chiquitano es un tipo de bosque tropical seco, único en el mundo y con una riqueza natural extraordinaria, aún poco estudiada. Corresponde, en el continente, a un bosque que en otras épocas fue más extenso y que, actualmente, se ha retraído a su distribución actual (Killeen et al 1998; Ibisich, Columba & Reichle, 2002). Hay una interrelación del bosque con sabanas arboladas e inundadas del Cerrado y con el Pantanal.

La ecorregión del cerrado incluye desde sabanas abiertas hasta bosques bajos, pero, en general, es una sabana con árboles aislados de 2 metros a 10 metros de alto. El cerrado presenta una comunidad vegetal florísticamente afin a las especies del estrato herbáceo y arbustivo de campo de sujo, fisonomía frecuente en los cerrados del oriente boliviano que cuentan con *Stryphnodendron obovatum*, *Curatella americana* (en suelos empobrecidos), *Qualea grandiflora*, *Erythroxylum suberosum* y *Aspidosperma nobile* (muy raro). También se encuentra una buena diversidad de hierbas como *Vernonia grandiflora*, *Lippia vernonioides*, *Ipomoea haenkeana* y pastos *Axonopus marginatus* y, en suelos empobrecidos, *Elionurus muticus*, todas especies características de esta fisonomía (Libro rojo de plantas de los Cerrados de Bolivia, 2010).

En el estudio se escogieron puntos de muestreo para la observación de aves.

**Localidad Sapocó.** Área protegida municipal que incluye una propiedad privada y áreas aledañas. Esta área, al estar cercana al centro poblacional del municipio de Concepción, presenta un bosque secundario con especies características. La intervención antrópica está causando la pérdida de vegetación arbórea que es remplazada, en su mayoría, por especies forrajeras para ganadería intensiva. En este sector se dá la interacción de la formación de campo de cerrado con el Bosque semideciduo Chiquitano. La propiedad privada, se dedica a la ganadería. Presenta una vegetación de bosque seco chiquitano con especies como *Apeiba tibourbou*, *Vochysia rufa*, *Combretum leprosum*, *Apeiba tibourbou*, *Callisthene faciculata*, además, de *Attalea phalerata*, *Astrocaryum sp.*, *Mauritia flexuosa* presentes en zonas bastante húmedas e inundadizas. El lugar tiene una intervención antrópica alta por el desmonte sufrido para la implantación de pastizales empleados en la cría de ganado vacuno (figura 3).

**Localidad La Adolorida.** Propiedad privada, dedicada casi exclusivamente a la ganadería. Se encuentran pastizales de pastoreo, pero, también, presenta un área bastante conservada que cuenta con bosque semideciduo Chiquitano en sectores aledaños a vertientes o fuentes de agua.

Figura 3. Plantas características de la zona



**Nota:** De izquierda a derecha: *Apeiba tibourbou*, *Vochysia rufa* y *Mauritia flesuosa*.

**Localidad El Encanto.** Reserva comunitaria constituida por una propiedad privada y caminos aledaños. Presenta vegetación característica de campo cerrado, en la cual se evidencia la quema de la vegetación por los troncos corchosos aun teñidos de negro en la base de los tallos (figura 4). En este trayecto,

también se observaron algunos afloramientos rocosos con especies de plantas características, *Commiphora leptophloeos*, *Luehea candicans*, *Magonia pubescens*, *Hippeastrum starkiorum*, *Deuterocohnia meziana*, *Echinopsis rhodotricha*, *Herissantia nemoralis*, *Lantana aristata*, *Bromelia villosa*.

Figura 4. Afloramiento rocoso y vegetación característica de campo cerrado



En la reserva comunitaria Las Orquideas, se presenta una vegetación en su mayoría de campo cerrado con pequeños bosques de galería a orillas de arroyos donde se observan algunas especies representativas como *Sapindus saponaria*, *Aspidosperma cylindrocarpon*, *jacaranda*

*cuspidifolia*, *Dypterix alata*, *Guettarda viburnoides*, *Luehea paniculata*, *Stryphnodendrum obovatum*, *Lantana cámara*, *Chromolaena arnottiana*, *Pavonia angustifolia*, *Andropogon leucostachyus*, *Axonopus marginatus* y *Opuntia brasiliensis*.

Figura 5. Las Orquideas, vegetación característica de campo cerrado



En las áreas aledañas, el tipo de vegetación es de campo cerrado con manchones de campo sujo que se extiende en manchones pequeños e interactúa en algunos sectores con bosque semidecíduo chiquitano con sectores bastante bien conservado y, otros, con presencia de campos de pastura para la ganadería. Presenta barbechos con algunas especies de gran porte a orillas del camino comunal, con especies tales como: *Cecropia concolor*, *Acrocomia aculeata*, *Syagrus sancona*, *Cnidocolus cnicodendron*, *Chorisia speciosa*, *Zanthoxylum rhoifolium*, *Plathyenia reticulata*, *Astronium urundeuva*, *Samanea tubulosa*, *Bromelia balansae*.

**Localidad El Carmen.** Reserva comunitaria conformada por propiedad privada y camino comunidad. Presenta una vegetación de campo cerrado, con alteraciones antrópicas marcadas ya que se encuentra a poca distancia de la comunidad e incluyendo campos de pasturas para el ganado. Las propiedades comunales, se caracterizan por poseer una vegetación de bosque secundario, además de encontrarse en un sector con un desnivel altitudinal lo que genera una composición de flora adaptada a un medio generalmente húmedo con presencia de motacuales (*Attalea phalerata*), ambaibos (*Cecropia concolor*), espino blanco (*Acacia albicorticata*) y gallitos (*Erythrina fusca*). La Reserva comunal cuenta con dos tipos de vegetación de Cerrado y, en su mayoría, de Bosque semidecíduo Chiquitano, con especies de flora características como ser: *Anadenanthera macrocarpa*, *Copaifera langsdorffii*, *Pseudobombax marguinatum*, *Hymenea stigonocarpa*, *Cedrela fissilis*, *Clusia gaudichaudii*, *Attalea phalerata*, *Chusquea ramosissima*, *Kiellmeyera cf. rubiflora*, *Ananas ananassoides* y *Rhynchanthera novemnervia*. Así mismo, presenta pastizales para ganado y senderos de interpretación para el ecoturismo que se adentra en un bosque de galería donde se encuentran especies vegetales como *Pouteria cf. macrophylla*, *Cedrela fissilis*, *Eriotheca roseorum*, *Ficus gomelleira*, *Hymenea stigonocarpa*, *Cereus tacuaralensis*, *Echinopsis calochlora*, *Luehea paniculata*, *Pseudobombax marguinatum*, *Dipteryx alata* y *Chusquea ramosissima* (Figura 6).

Figura 6. El Carmen, con vegetación característica del lugar



Figura 7. Especies de plantas localizadas en Concepción



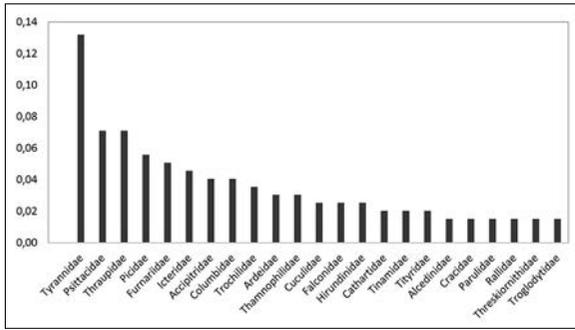
### Avifauna

Se considera:

### Riqueza de especies

Se observaron 2.485 individuos distribuidos en 197 especies correspondientes a 48 familias, siendo las familias más frecuentes Tyrannidae (0,13), mientras que las observaciones menos frecuentes fueron registradas en las familias Thraupidae, Furnariidae, Picidae y Psittacidae y el resto de las familias, menor a un representante (Figura 8).

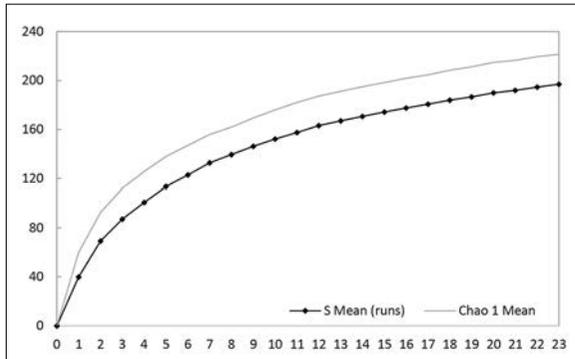
Figura 8. Riqueza de especies por familia en Concepción



Nota: No fueron incluidas las familias con una especie.

En cuanto a la curva de acumulación de especies según los registros de especies por transecto (23 transectos), se tomó en cuenta los datos obtenidos durante el muestreo en las diferentes localidades (Sapocó, La Adolorida, El Carmen y El Encanto). En la primera temporada, se reportó 101 especies, y aumentando el esfuerzo de muestreo, la curva se próxima a la asíntota con 197 especies de aves. Además, se observa que el estimador Chao1 no muestra una diferencia significativa con los valores observados, es decir, que a pesar de ser pocos días de muestreos, los valores esperados no están lejos de los registrados en campo (Figura 9).

Figura 9. Curva de acumulación de especies en Concepción



### Diversidad

Para el análisis de diversidad se tomó en cuenta las localidades estudiadas. Este índice cuantifica la variabilidad de las especies en las diferentes localidades y, de igual manera, la abundancia relativa. Se observa una diversidad alta en el área muestreada, al igual que en las diferentes localidades, ya que sus valores observados son mayores a tres. Por otra parte, también se observa una dominancia alta y una equidad baja en las diferentes localidades (Tabla 2).

Tabla 2. Diversidad de especies en las diferentes localidades muestreadas en Concepción

Localidades	Especies (ind.)	Simpson ( $\lambda$ )	Shannon ( $H'$ )	Margalef	Equitability J
Localidad 1	111 (974)	0,9678	3,975	15,99	0,844
Localidad 2	88 (437)	0,9608	3,870	14,31	0,864
Localidad 3	124 (617)	0,9786	4,332	19,14	0,898
Localidad 4	92 (457)	0,9765	4,093	14,86	0,905

### Similitud

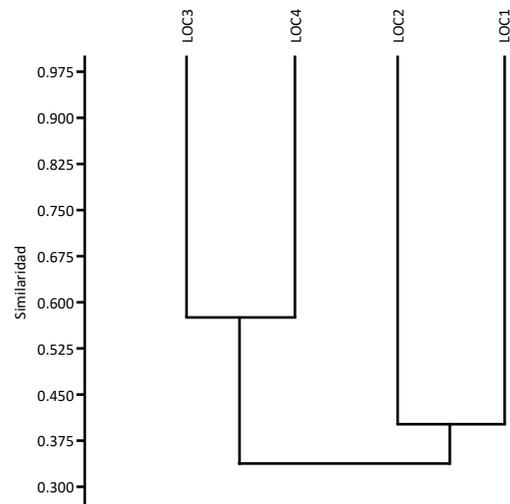
El análisis de similitud se realizó en los indicadores y localidades. Los valores obtenidos muestran una similitud baja entre las diferentes localidades con excepción de la Localidad 3 - 4 (0,58) (Tabla 8; Figura 10).

Tabla 3. Similitud de especies de aves en las áreas de influencia

Localidades	Jaccard J'
LOC1 - LOC2	0,40
LOC2 - LOC3	0,31
LOC3 - LOC4	0,58
LOC4 - LOC1	0,34
LOC1 - LOC3	0,42
LOC2 - LOC4	0,28

Nota: LOC1 = Localidad 1; LOC2 = Localidad 2; LOC 3 = Localidad 3 y LOC4 = Localidad 4.

Figura 10. Cluster de similitud basado en Jaccard J' para las diferentes localidades

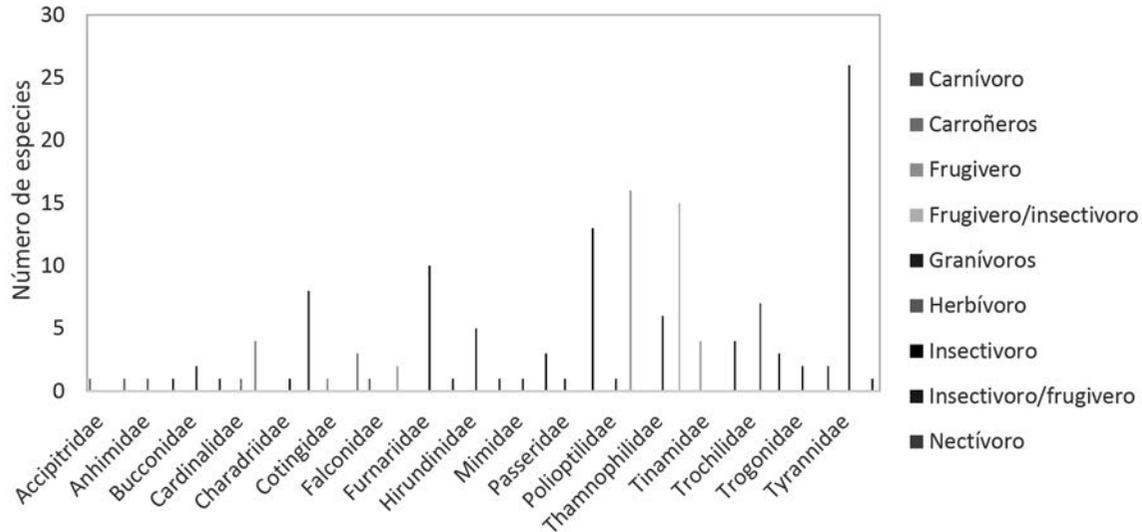


Nota: LOC1 = Localidad 1; LOC2 = Localidad 2; LOC 3 = Localidad 3 y LOC4 = Localidad 4.

## Gremios alimenticios

De las 197 especies de aves, se identificó que el 40% pertenecían al gremio Insectívoro, seguido del Omnívoro con 27% y el resto de los gremios presentan una menor representatividad.

Figura 11. Gremios Alimenticios de las aves presentes en Concepcion



## Migración

En las 197 especies, se identificaron 31 especies migrantes, siendo: la Migrante Austral Parcial con 29 especies y la Migrante Parcial con dos especies. La familia más representada en esta categoría es Tyrannidae con 26 especies.

## Estado de conservación de las especies de aves

Según el estado de conservación de las especies de aves observadas durante el muestreo, cabe resaltar, que 169 se encontraron dentro de la categoría de menor preocupación como *Brotoyeris chiriri*, *Ardea alba*, *Progne chalybea*, *Machetornis rixosa*, *Furnarius rufus*, *Megasceryle torquata*, *Rhynchotus rufescens*, *Crypturellus undulates*, *Cariama cristata*, *Crotophaga ani*, *Campylorhynchus turdinus*. Por otra parte, dos especies de aves se encuentran en la categoría Casi amenazado: *Amazona aestiva* y *Spizaetus ornatus*, y, una especie, en la categoría de Vulnerable, la *Patagioenas subvinacea*.

## Especies claves para el aviturismo

Las especies claves para esta disciplina se consideran a Thraupidos entre ellos, las tangaras; los Psittacidos como guacamayos y loros, por ser especies coloridas, de gran porte y difíciles de observar en otras regiones. Las especies con categoría de amenaza como *Amazona aestiva*, *Spizaetus ornatus*, y *Patagioenas subvinacea* también son especies atractivas para impartir el aviturismo en la región. Así mismo, cabe resaltar que cada localidad estudiada presenta una avifauna variada y típica.

## Prevención y mitigación de riesgos e impactos a la biodiversidad

Estas localidades estudiadas presentan alteraciones en su composición florística, por fuertes y constantes presiones antrópicas, por actividades de sobre pastoreo y quemadas descontroladas. Así mismo, estas actividades han influido en la composición de la población de aves de la región, provocando un desequilibrio, desplazando a especies. Actualmente existen medidas de mitigación para evitar la quema descontrolada de la vegetación y tiene lugar el uso de herramientas como SATRIFO con la finalidad de brindar información útil y oportuna para la prevención

y control de incendios forestales. Por otra parte, las comunidades presentes en el área de estudio ya valoran el bosque no solo por sus beneficios ecosistémicos sino por el beneficio económico que les proporciona como es el caso del ecoturismo y el aviturismo a explotar en la región.

## CONCLUSIÓN

Tres de las cuatro localidades presentaron pérdida de cobertura boscosa por quemas, Estos eventos sucedieron esporádicamente en dos de los sitios y, casi anualmente, en dos de las localidades. Sin embargo, se requiere llevar a cabo un análisis más minucioso de estas localidades.

Se logró identificar a 197 especies distribuida en 48 familias durante el periodo de muestreo. Según la curva de acumulación de especies, se notó una aproximación a la asíntota. Por otra parte, se observó una diversidad alta y dominancia en la composición de especies en las diferentes localidades, con la familia Tyrannidae como la más abundante. El gremio alimenticio con el número mayor de especies fue el insectívoro. Sólo se destacó dos tipos de migración parcial austral y austral.

Las especies claves para el aviturismo, identificadas en este estudio, fueron Thraupidos como las tangaras; Psittacidos como guacamayos y loros; Tyrannidos, por ser especies coloridas y difíciles de observar en otras regiones. Las especies con categoría de amenaza son *Amazona aestiva*, *Spizaetus ornatus*, y *Patagioenas subvinacea*.

Para la prevención y la minimización de riesgos, se recomienda realizar o socializar el plan de manejo de incendios y el uso de herramientas claves para la prevención y la mitigación de los mismos. Por otra parte, el impulsar el turismo ecológico y aviturismo en la región, contribuirá en un monitoreo más prolongado de las áreas, y en ser una fuente de recurso económico para las comunidades de la región.

## AGRADECIMIENTOS

A la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia – Dpto. Santa Cruz y la Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra por facilitar fondos de investigación; a la municipalidad de Concepción y a los dueños de las estancias La Adolorida, Renacer, San Josecito, Bonanza, por permitir el acceso para realizar el estudio; a Miguel Montenegro, Carlos Justiniano y J. Luis Martínez por el apoyo en el desarrollo del proyecto; a Aves Bolivianas, Campos Felicias

Ecological Refuge y Santa Cruz Ambiental, por el apoyo institucional.

## REFERENCIAS

- ANIVARO, R., AZURDUY, H., MALLARD, O., MARKOS, A. (2019). Diagnóstico por teledetección de áreas quemadas en la Chiquitania. Informe técnico del observatorio Bosque Seco Chiquitano, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano.
- BILLERMAN, S. M., KEENEY, B. K., RODEWALD, P. G. AND SCHULENBERG, T. S. (2021). Birds of the World. Cornell Laboratory of Ornithology, Ithaca, NY, USA. Recuperado de <https://birdsoftheworld.org/bow/home>
- EARTH DATA - OPEN ACCESS FOR OPEN SCIENCE - MODIS – VIIRS. Recuperado de <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/country/>
- GONZÁLEZ, M., L. SCHWENDENMANNJ. JIMÉNEZ & W. HIMMELSBACH. (2007). Reconstrucción del historial de incendios y estructura forestal en bosques mixtos de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. Madera y Bosques 13: 51-63.
- HERZOG, S.K., TERRILL, R.S., JAHN, A.E., REMSEN, J. V., MALLARD, O., GARCÍA SOLIZ, V.H., MACLEOD, P., MACCORMICK, A. Y VIDOZ, J.Q. (2016). Birds of Bolivia. Field Guide. Bolivia.
- IBISCH, P. I., S. G. BECK, B. GERKMANN & A. CARRETERO. (2003). Ecorregiones y ecosistemas.
- KOTLIAR, N., S. HEJL, R. HUTTO, V. SAAB, C. MELCHER & M. MCFADZEN. (2002). Effects of fire and post fire salvage logging on avian communities in conifer-dominated forests of western United States. Studies in Avian Biology 25: 49-64.
- LANTSCHNER, M. & V. RUSCH. (2007). Impacto de diferentes disturbios antrópicos sobre las comunidades de aves de bosques y matorrales de Nothofagus antartica en el NO Patagónico. Ecología Austral 17: 99-112.
- MOSTACEDO, BONIFACIO; FREDERICKSEN, TODD S. (2000). Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia
- PERFETTI-BOLAÑO, A., GONZALEZ-ACUÑA, D., BARRIENTOS, C. Y L. MOERENO. (2013). Efecto del fuego sobre la avifauna del cerro Cayumanque, Región del Bio-Bio, Chile.
- RALPH, C.J., G. GEOFFREY, P. PYLE, T. MARTIND.F. DE SANTE & B. MILA. (1996). Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres. Pacific Southwest Research Station: Forest Service, US. Department of Agriculture.

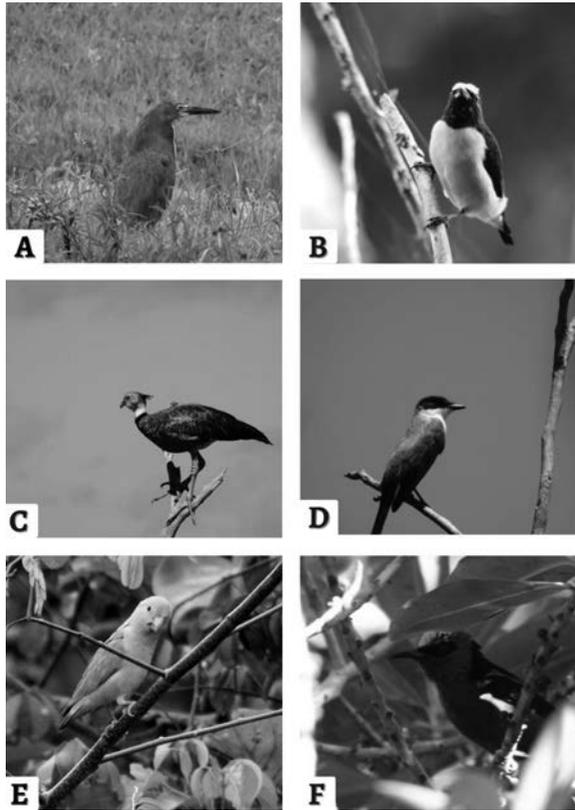
SATRIFO -SISTEMA DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA DE RIESGOS DE INCENDIOS FORESTALES. Fan <http://incendios.fan-bo.org/Satrifo/mapa-interactivo/>

VENEGAS, A., VARELA S C. ESTADES. (2009). Efectos del fuego en la comunidad de aves de bosque en la reserva nacional Malleca. Boletín Chileno de Ornitología 15:1-7

**ANEXOS**

**Anexo 1. Especies de Aves de Concepción**

Figura A1.1. Aves de Concepción



**Nota:** A) *Tigrisoma lineatum*, B) *Euphonia chlorotica*, C) *Chauna torquata*, D) *Tyrannus savana*, E) *Forpus xamthopterygius* y F) *Cyanerpes cyaneus*.

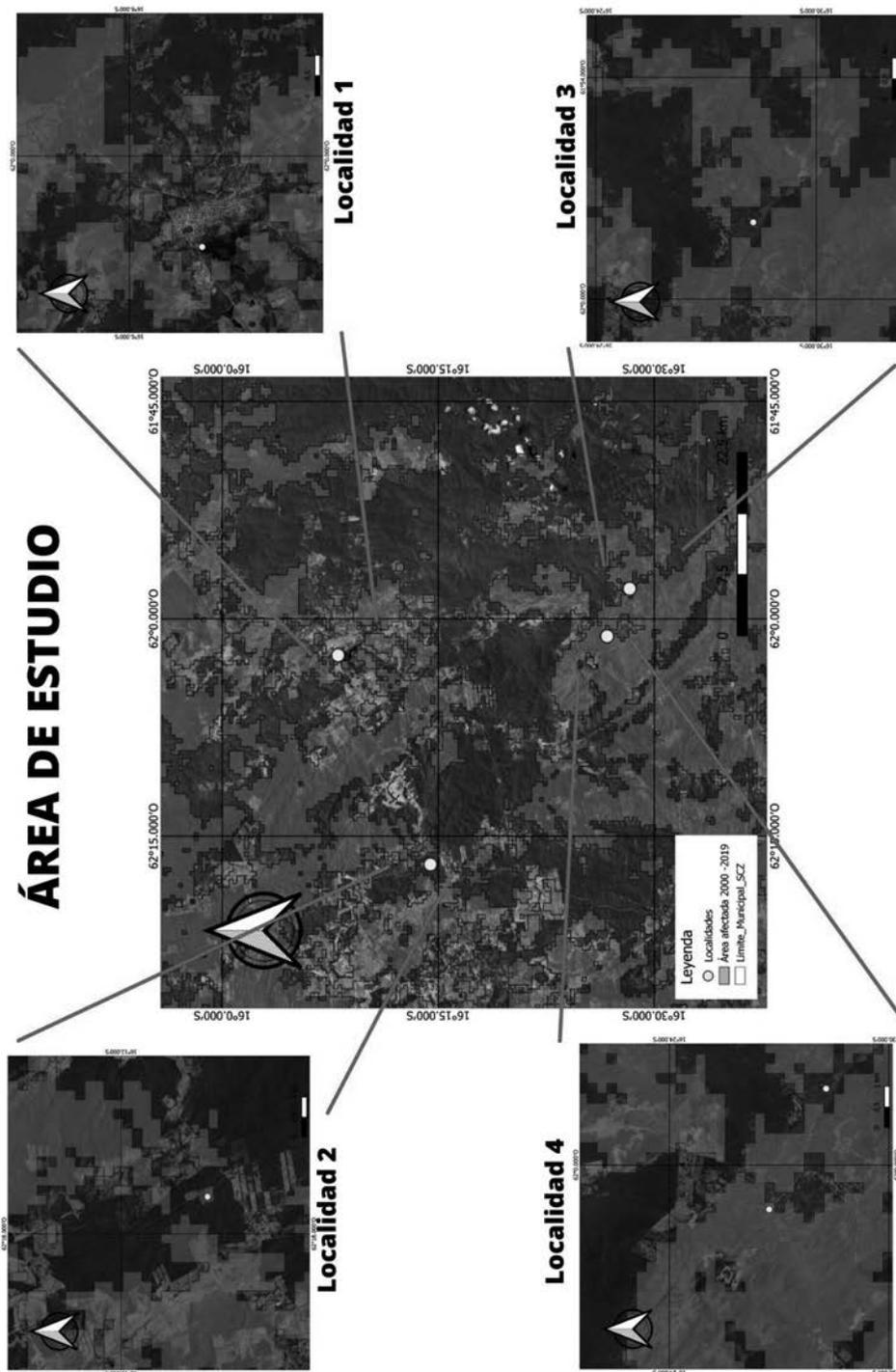
**Anexo 2. Lista de familias presentes en las localidades estudiadas en Concepción**

Tabla A2.1. Familias estudiadas

Familias	Localidad 1	Localidad 2	Localidad 3	Localidad 4
Accipitridae	X	X	X	X
Alcedinidae	X	X		
Anatidae	X	X		X
Anhimidae	X	X		
Aramidae		X		
Ardeidae	X	X		X
Bucconidae		X	X	X
Caprimulgidae			X	
Cardinalidae			X	X
Cariamidae	X	X	X	X
Cathartidae	X	X	X	X
Charadriidae	X	X		X
Ciconidae		X		
Columbidae	X	X	X	X
Corvidae	X	X	X	X
Cotingidae		X		
Cracidae	X	X	X	X
Cuculidae	X	X	X	X
Falconidae	X	X	X	X
Fringillidae	X	X	X	X
Furnariidae	X	X	X	X
Galbulidae	X	X		X
Hirundinidae	X	X		X
Icteridae	X	X	X	X
Jacaniidae	X	X		X
Melanopareiidae			X	X
Mimidae	X			
Momotidae		X	X	X
Parulidae	X	X	X	X
Passeridae	X			
Picidae	X	X	X	X
podicipedidae				X
Poliophtilidae				X
Psittacidae	X	X	X	X
Rallidae	X	X		X
Ramphastidae	X	X	X	X
Strigidae	X	X	X	
Thamnophilidae	X		X	X
Thraupidae	X	X	X	X
Threskiornithidae	X	X		
Tinamidae	X	X	X	X
Tityridae	X	X	X	X
Trochilidae	X		X	X
Troglodytidae	X	X	X	X
Trogonidae	X	X	X	X
Turdidae	X		X	X
Tyrannidae	X	X	X	X
Vireonidae			X	X

## Mapas de las localidades visitadas

Figura A2.1. Capa de áreas afectadas por el fuego del 2000-2019 (SATRIFO)





# PRODUCTION CAPACITY ESTIMATION OF THE DEVELOPMENT ZONE OF RÍO GRANDE FIELD THROUGH INTEGRATED PRODUCTION MODELLING

Brayan Jhamil Cuba Silva<sup>1</sup> y Ricardo Marcelo Michel Villazón<sup>2</sup>

## RESUMEN

El estudio considera aplicar un modelo de producción integrada en la zona de desarrollo de Río Grande, para estimar la capacidad de producción. El modelo es descrito utilizando técnicas de balance de masa, análisis nodal y predicción de la producción.

El Balance de masa es definido como una ecuación no dimensional que se usa para realizar una predicción del proceder del reservorio, el flujo acumulado de agua y la relación de la capa de gas con la zona de petróleo.

El análisis nodal segmenta los componentes del sistema de producción en puntos o nodos con un solo valor de presión. Este análisis también permite estimar, mediante correlaciones de flujo multifásico, la relación del proceder del flujo y de las curvas de proceder del levantamiento vertical que permiten

calcular la capacidad de producción de un pozo para un tiempo específico.

Los modelos de simulaciones computacionales son aplicados para estimar el modelo integrado de producción como lo son los softwares de balance de masa (MBAL), respuesta del sistema de producción (PROSPER) y apropiación general de producción (GAP) que son utilizados frecuentemente por la industria de hidrocarburos.

**Palabras Clave:** Balance de masa, análisis nodal, modelo integrado de producción.

## ABSTRACT

This work consists of production integrated model application in the development zone of Río Grande field to estimate the production capacity. The application of production integrated model is described using techniques as material balance, nodal analysis and production prediction.

Material balance is defined non-dimensional equation to estimate the reservoir behavior prediction which can calculate hydrocarbons reserves,

1 Estudiante de la carrera de Ingeniería de Petróleo y Gas Natural, UPSA

2 Docente UPSA, Miembro de Número de la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia.

accumulated water influx and the relationship of gas cap with the oil zone.

Nodal analysis is defined by the segmentation of the production systems components in points or nodes which can only exist one pressure value. Also this analysis can estimate, through multiphase flux correlations, the inflow performance relationship and

vertical lift performance curves which can calculate the production capacity of a well at a specific time.

Computational simulations models are applied to estimate a production integrated model, software programs as Material Balance (MBAL), Production system performance (PROSPER) and General allocation production (GAP) are often used for oil industries.

**Keywords:** Material Balance, Nodal Analysis, Production Integrated Model.

## INTRODUCTION

Computational simulations models had been developed for the oil and gas industry in addressing solutions related to represent fluid flows, petro physics properties, to predict the reservoir behavior and calculate hydrocarbons reserves.

A production integrated model has estimated by three computational models: MBAL to estimate original reserves in place through material balance model, PROSPER to calculate the operational pressure, rate and GAP to model a layout of a field and estimate rate productions.

Those computational models are linked each one to predict the reservoir behavior.

## SCOPE OF INVESTIGATION

This research is focused in the application of three computational simulation models to predict hydrocarbons productions through a production integrated model. The study case is an undersaturated condensate reservoir of Devonian Age which is called Iquiri. Total wells within the development zone of Rio Grande field produce hydrocarbons from the Iquiri Formation. The well RGD 22 Re has been the first producer since 2010.

## Material Balance Model

This model is described by a non-dimensional (tank) that can estimate original hydrocarbons in place, water influx, behavior of the reservoir and evaluate revenue factors and its equation is based on

the balance between initial conditions and remnants conditions which give the hydrocarbon mass production. (J. Lee & R. A. Wattenbarger, 1996).

Material balance model for gas and oil are different and both are in function of water influx ( $W_e$ ), volumetric factor ( $B$ ) and solubility relationship ( $R_s$ ).

$$N = \frac{N_p [B_o + B_g (R_p - R_s)] - (W_e - W_p) B_w}{B_o - B_{oi} + m B_{oi} \left( \frac{B_g}{B_{gi}} - 1 \right) + B_g (R_{si} - R_s) + B_{oi} (1+m) \left( \frac{c_w S_w - c_f}{1 - S_w} \right) \Delta P}$$

Ecuacion 1

$$\frac{P}{z} = - \frac{P_i}{z_i G} G_p + \frac{P_i}{z_i}$$

Ecuacion 2

Different models as P/Z, Havlena - Odeh, Carton - Cole and others are using to estimate the original gas in place.

## Nodal Analysis

This analysis has been applied to analyze the system hydrocarbon (Fig. 1) performance at the beginning of the components interaction (H. D. Beggs, 1991).

$$p_{node} = P_R - \Delta P(\text{upstream components})$$

Ecuacion 3

$$p_{node} = P_{sep} + \Delta P(\text{downstream components})$$

Ecuacion 4

The selected node is called node solution where can only exist one pressure value and the pressure losses are defined by the inlet and outlet components pressures.

## Multiphase Flux Correlations

A multiphase flux is described by the concurrent movement of gases and liquids which flowing as two phases into tubing (J. P. Brill & H. Mukherjee, 1999).

These correlations are based on the energy general equation to determine friction, gravity and acceleration losses.

$$\frac{dP}{dL} = \frac{f \rho_f v_f^2}{2d} + \rho_f \sin \theta + \rho_f v_f \frac{dv_f}{dL}$$

Ecuacion 5

Different correlations have been developed since 1932 where Poetmann and Carpenter developed their correlation which can determine pressure losses in function of hold up and slippage conditions.

**GENERAL DESCRIPTION OF RÍO GRANDE FIELD**

Río Grande field is located south of the city of Santa Cruz de la Sierra, Province of Cordillera (Santa Cruz, Bolivia). Producer reservoirs as Petaca, Yantata, Taiguati and Tupambi have been produced hydrocarbon since 1962 .

The Iquiri producer reservoir has been developed in 2010 which is part of both development and non-development zone of the field.

The wells that conform the development zone (Fig. 2) are: RGD 22 Re, RGD 37, RGD 39, RGD 56, RGD 78, RGD 81, RGD 82, RGD 83, RGD 84, RGD 85, RGD 86, RGD 87 and RGD 89 – 90 DST. (ANH, 2018)

**Iquiri formation**

The Iquiri formation belongs to Devonian Age and its sediments came up from shallow marine. (Fig. 3)

The reservoir Iquiri “A” is an undersaturated condensate reservoir of 50 °API. The main drive mechanism is gas expansion without active aquifer. The hydrocarbon produces by this reservoir begins as liquid phase when its above the dew point, condensate releases gas into a solution-phase. (CNIH, 2018)

**SIMULATION MODEL**

The application of simulators to represent an integrated production model consists in the good use of these and the logical interpretation of different scenarios resulting.

**Determination of original hydrocarbon in place**

The original gas in place of the development zone of Río Grande field is determined by MBAL. The simulation is started by the determination of the kind of fluid that the reservoir produces and the introduction of input data as: Fluid properties, pressure, temperature, surfaces equipment conditions, specific gravity of the fluids and the percentages of contaminants.

The results of MBAL are determined by a production history and the selection of a material balance method to generate a history matching and quantify the original hydrocarbon in place. (Fig 7) The production data are summarized in the following table:

Table 1

Date	Cumulative Gas Produced (MMcf)	Cumulative Oil Produced (bbl)	Cumulative Water Produced (bbl)
31/07/2010	0.519	0	191.934
31/03/2011	3076.469	94157.903	19004.857
31/12/2011	10864.701	328835.372	63240.405
31/08/2012	20893.145	589258.514	113524.815
30/04/2013	32135.282	836509.426	161208.183
31/12/2013	45020.011	1104257.16	210652.811
31/07/2014	57286.408	1337816.53	252715.815
31/03/2015	71510.882	1584833.03	301917.866
30/11/2015	85676.371	1815287.42	367692.452
31/08/2016	98192.817	2004892.57	433371.269
30/04/2017	109690.723	2164660.78	496570.463
31/12/2017	121310.638	2326760.78	557513.715
30/09/2018	132450.816	2467285.48	580490.877

**IPR and VLP curves**

The inflow and outflow curves are determined by PROSPER or using an algorithm procedure based in theoretical models (Fig.4, 5 and 6). The simulation started with the introduction of the same parameters described in point 4.1.

The plot of the inflow curve is in function of the reservoir model that selection depends of the data obtained. The plot Rate of Production vs Pressure (Fig. 8) gives the value of the absolute open flow.

The plot of the outflow curve is in function of a production test and the selection of a multiphase flux correlation. The intersection of the inflow and outflow curves in a plot Rate of Production vs Pressure (Fig. 9) represents the operational rate and pressure which a well can produce hydrocarbon, these values change in time with new results of a production test.

**Production integrated model**

The design of the production integrated model is defined by GAP. As show in Fig 10 the layout designed exhibits the development zone of the Río Grande field with the fourteen wells which conforms the fields and the surface equipment with three kind of separators: High, medium and low.

## ESTIMATION OF THE CAPACITY PRODUCTION

Once the design of the production integrated model is done, the results showed in MBAL and PROSPER enable to link with GAP.

The restrictions of flux as chokes have to determine for each well, also this are scheduled by the dates of changing chokes of many production tests for each well.

The numbers of joints are defined by criteria to avoid bottle necks.

The multiphase flux correlation used for each producer tubing is the correlation of Beggs and Brill which has been properly done for vertical tubing.

$$\frac{dP}{dL} = \frac{\frac{f \rho_n v_m^2}{2d} + \rho_s g \sin \theta}{1 - E_k} \quad \text{Ecuacion 6}$$

The simulation started by the definition of a period of time defined by the user. The final results show the futures rates of oil, gas and water produces for the entire field and for each well.

Other results calculated by the simulation are: Gas oil ratio, condensate gas ratio, water gas ratio, the change of the pressures in the different nodes of the system production in the time of production.

These results could determine and give a good forecast at the time of take decisions about the future of the field.

## CONCLUSIONS

The knowledge of the concepts of material balance model, inflow and outflow curves performance relationship and the interpretation and assumption of the correlations of multiphase flux were the principal basis for the computational simulation of an integrated production model.

The final results are based by the selection of the different models in the software simulators in function of the data obtained and the type of fluid that Rio Grande field produces.

These results were compared with theoretical models done by EXCEL in which every obtained result has a percentage mistake comparison of 5 %. It is clear that simulators give more facilities but all of them are based in these theoretical models which have been developed since the oil industry began.

## REFERENCES

- [1] **J. Lee and R. A. Wattenbarger.** *Gas Reservoir Simulation.* Texas, USA: Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers, 1996, pags. 234-240.
- [2] **H. D. Beggs.** *Production Optimization Using Nodal Analysis.* Oklahoma, USA: OGCI and Petroskills Publications, 1991, pags. 1-3.
- [3] **J. P. Brill and H. Mukherjee.** *Multiphase Flow in Wells.* Texas, USA: Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers, 1999, pags. 19-27.
- [4] **ANH.** *Río Grande Field.* Santa Cruz de la Sierra, 2018, pags, 1-5.
- [5] **CNIH.** *Iquiri Formation - Carachteristics.* Santa Cruz de la Sierra, 2018, pags, 2-5.

**APPENDIX**  
**Figures**

Fig.1 Hydrocarbon production system

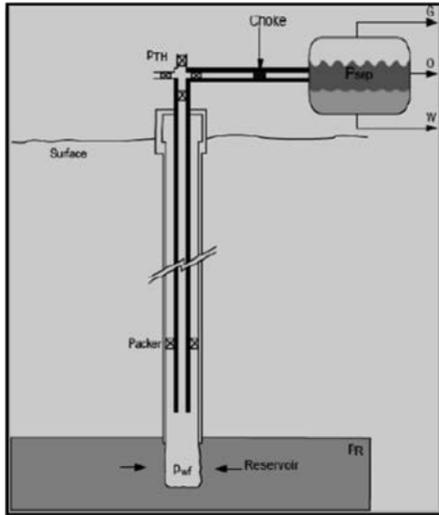
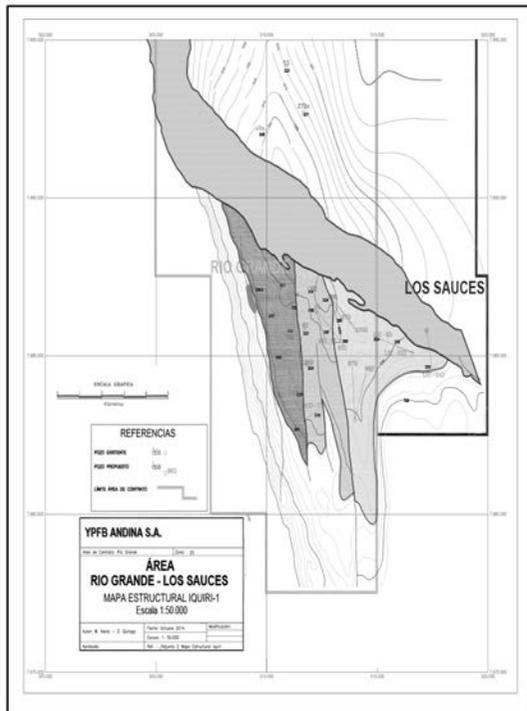


Fig.2 Study area of field



Source: CNIH

Fig.3 South Sub Andean Formations  
(Depth and rock characteristics of Iquiri Formation)

ERA	SIST.	SERIE	EDAD Ma.	FORMACIÓN	ESPESES (m)	LITOLOGÍA	ROCA		
							MACHO	RESERVO	SELLO
CENOZOICO	TERCIARIO	MIOCENO	6.5	GUANDACAY	>1000				
			16	TARIQUÍA	500 - 1000				
			23	YCUA	>200				
			28	PETACA	100				
PALEOZOICO	DEVONICO	INFERIOR	248	GR. TACURU	500				
			330	ESCARPMENT	<700				
			342	CHORRO - TARGUATI	350				
			342	ITACUAMI	50				
			355	MACHARETI	350				
			375	IQURI	<300				
			387	LOS MONOS	600				
			387	HUAMAMPAMPA	400				
			392	ICLA	450				
			400	SANTA ROSA	500				
			408	KIRUSILLAS	700				

Source: CNIH

Fig.4 Input data procedure to plot IPR and VLP curves

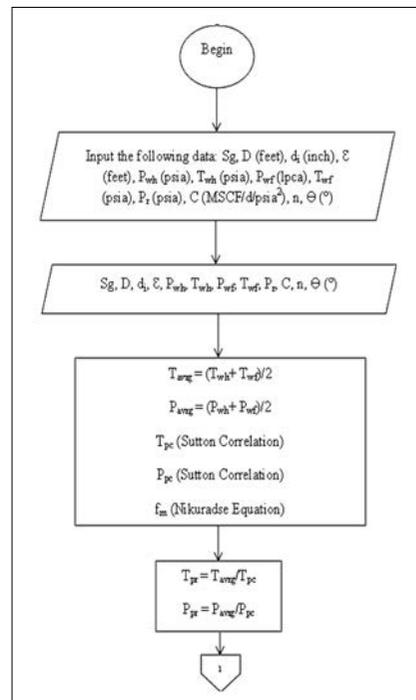


Fig.5 Iteration

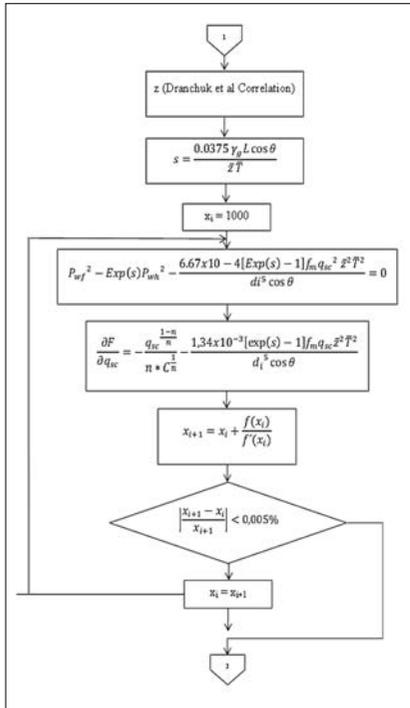


Fig.6 Rate, pressure operation results

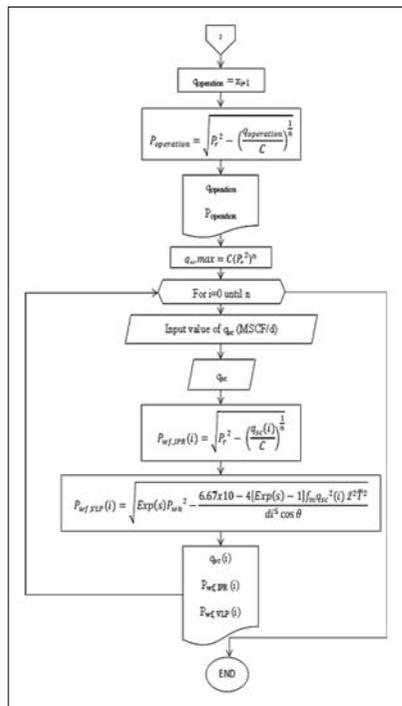
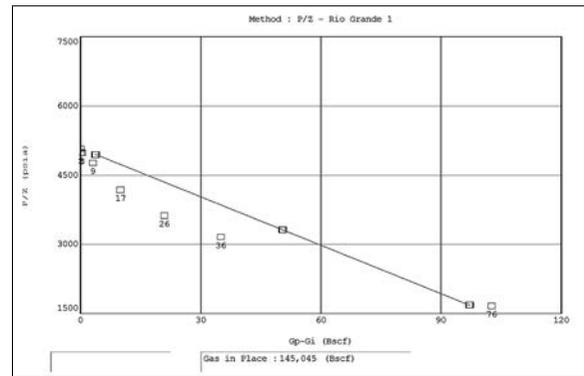
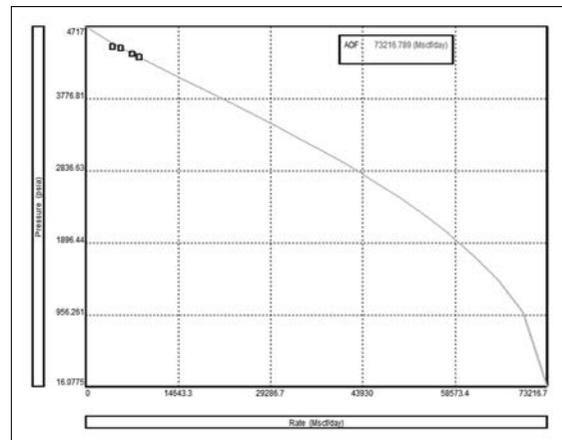


Fig.7 OGIP estimation using P/Z model by MBAL



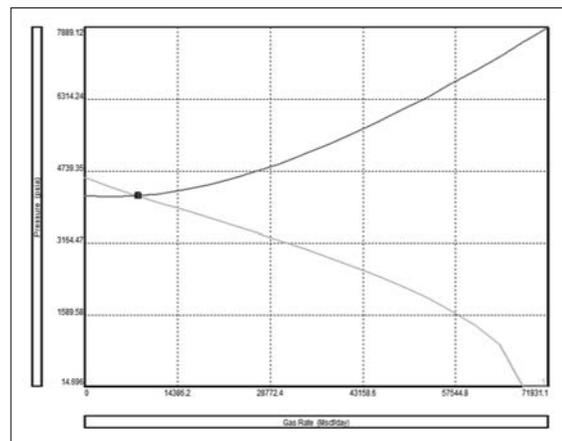
Source: CNIH

Fig.8 Inflow Performance Relationship curve by PROSPER



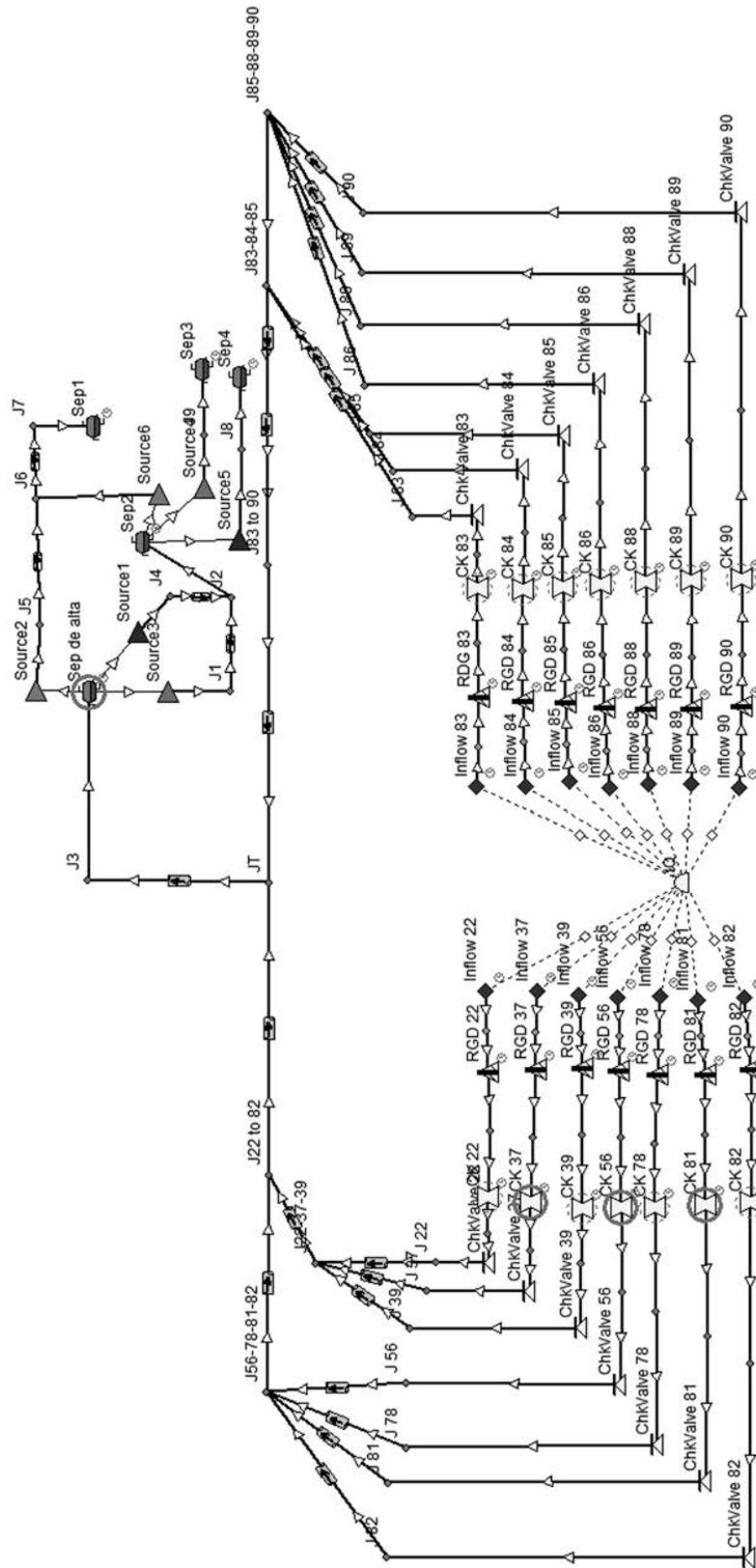
Source: CNIH

Fig.9 Vertical Lift Relationship curve by PROSPER



Source: CNIH

Fig.10 Integration Production Modelling of the development zone of Río Grande field by GAP



Source: CNIH



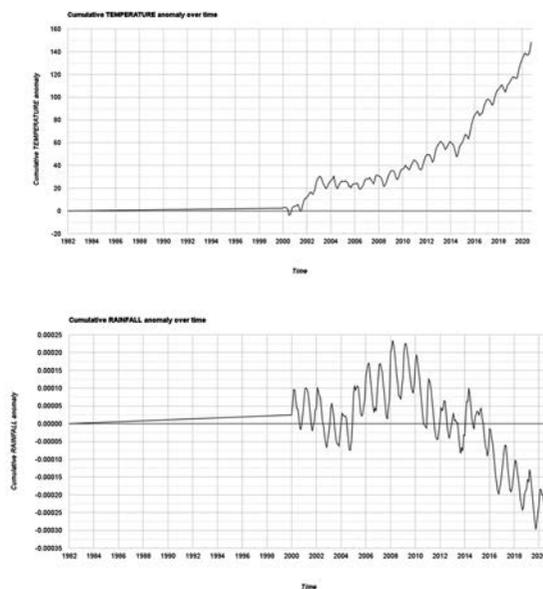
# ESCENARIOS DE CAMBIO DE USO DEL SUELO PARA GARANTIZAR LA PROVISIÓN DE AGUA SUPERFICIAL. CASO ESTUDIO: SAN RAFAEL (SANTA CRUZ)<sup>1</sup>

Andrea Markos<sup>2</sup>

## INTRODUCCIÓN

La evolución del volumen de agua de la laguna de San Rafael, en el tiempo, en este Municipio y en otros del territorio del Estado Plurinacional de Bolivia, es la principal preocupación que impulsa este estudio, con el propósito de brindar herramientas robustas para la toma de decisión en el ámbito de la planificación del territorio. En los últimos años, se ha registrado un incremento de temperaturas y una disminución de precipitaciones en el departamento de Santa Cruz, Bolivia (Markos et al., 2020). Estos cambios, asociados a una pérdida de cobertura vegetal, están determinando una creciente escasez de agua y vulnerabilidad a los incendios. Entre los municipios más afectados, se encuentran San Rafael, San Miguel y San Ignacio (Markos, 2019). Destaca el caso de San Rafael, cuyo territorio ha recibido precipitaciones menores durante los últimos diez años mientras ha perdido por evapotranspiración, cantidades crecientes durante los últimos 20 años de temperaturas en ascenso.

Figura 1. Anomalías acumuladas en las temperaturas (izq.) y precipitaciones (der.) en San Rafael



Fuente: Elaboración propia  
Datos: NOAA

1 Programa UPSA-ANCB-SC

2 Miembro del Consejo de Investigaciones de la ANCB-SC.

Las anomalías climáticas de los últimos años se han visto asociadas también a malas prácticas que se observan en el manejo de los recursos naturales, que incluyen:

- a. El irrespeto a la normativa de ordenamiento predial en lo que refiere a la preservación de las franjas ribereñas para todo cuerpo de agua (ABT, 2016).
- b. El represaje y el desvío ilegal de cursos de agua para uso agrícola y pecuario
- c. La sobrexplotación de los acuíferos y la perforación de pozos en zonas de escaso potencial
- d. La deforestación y el sobrepastoreo en cabeceras de áreas de recarga hídrica superficial, con un incremento del riesgo de erosión que acorta la vida útil de las obras de infraestructura y una alteración del balance hídrico desfavorable a la acumulación de agua tanto en reservorios superficiales como subterráneos (Markos, 2019).

## MÉTODOS Y FUENTES

### Agua: la Variable Dependiente

La estimación del volumen de una laguna requiere de un cálculo de la superficie del espejo de agua que se puede realizar con buena precisión utilizando satélites con sensores ópticos y radar, y de la profundidad (profundidad = batimetría – elevación) para cada píxel de agua. El volumen se obtiene multiplicando la superficie de cada píxel por la profundidad correspondiente a la columna de agua. El volumen total es agregado por medio de la suma de los volúmenes de las columnas de agua.

La determinación de cada parámetro (superficie y volumen) presenta dificultades propias, que han sido resueltas. La determinación de la batimetría corresponde a la intersección cambiante del espejo de agua con el modelo de elevación digital. Esto permite identificar el nivel del agua expresado en metros sobre el nivel del mar, posibilitando el cálculo de profundidad. Para la estimación del espejo de agua se ha utilizado la fórmula del índice de diferencia normalizada de agua (NDWI, por su sigla en inglés) y su versión mejorada (NDWI). Se muestran las respectivas fórmulas y un umbral del 0,15 para la clasificación binaria automática agua/no-agua utilizando las imágenes ópticas de las colecciones Landsat 5, 7, 8 y Sentinel 2. La reflectancia superficial ha sido corregida atmosféricamente y las imágenes orto-rectificadas para los sensores Landsat 5, 7 y 8:

**Fórmula 1.** (Gao, 1996; McFeeter, 1996)  
 $(0,56 \mu\text{m}-0,83 \mu\text{m})/(0,56 \mu\text{m}+0,83 \mu\text{m})$

**Fórmula 2.** (Xu, 2006)  
 $(0,56 \mu\text{m}-1,65 \mu\text{m})/(0,56 \mu\text{m}+1,65 \mu\text{m})$

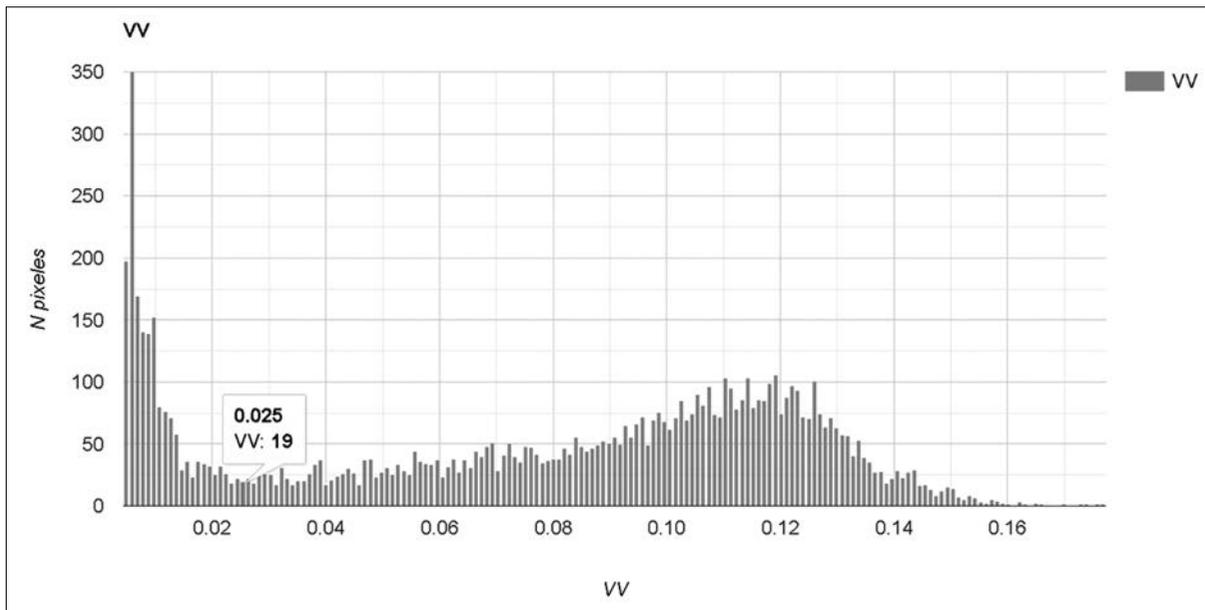
Asimismo, se integró la serie histórica con los datos de radar del satélite Sentinel 1, estableciendo el umbral para la retrodispersión del canal vertical-vertical (VV) en 0,02. La identificación del umbral se llevó a cabo tras un análisis del histograma y una inspección visual del resultado obtenido probando valores alternativos. Este método es una adaptación de Carreño et al. (2019). Los resultados se muestran en la figura 2, mientras que el punto de corte se identificó por medio del histograma presentado en la figura 3. Los datos SAR de Sentinel 1 han sido preprocesados realizándose: la eliminación de ruido térmico, la calibración radiométrica, y la corrección del terreno con SRTM 30.

Los valores finales corregidos por el terreno se convierten habitualmente a decibeles mediante una escala logarítmica ( $10 * \log_{10}(x)$ ) para la caracterización de la vegetación. Esta última operación no se ha llevado a cabo para la clasificación del espejo de agua, en cuanto, los datos lineales son más sensibles a la detección de vegetación de diminuta biomasa de la vegetación ribereña. Posibles contraindicaciones derivan de los falsos positivos ocasionados por las superficies arenosas y lisas de las orillas durante la época seca y los falsos negativos debidos a la retrodispersión provocada por el oleaje o la vegetación flotante. La principal ventaja es la mayor frecuencia de las estimaciones, hasta 5 imágenes/mes, que se integran a los datos de origen óptico para el cálculo de medianas mensuales, las cuales no se ven afectadas por la presencia de nubes. Las únicas imágenes SAR que no tienen utilidad son las que el sensor toma durante un evento de intensa precipitación. Por lo demás, contribuyen una imagen cada seis días en el área de interés que se integra a la serie histórica para el cálculo de medianas mensuales.

Figura 2. Espejo de agua de la laguna de San Rafael, mediana de la retrodispersión (2015-2021)



Figura 3. Histograma del canal vertical-vertical en ilustración 1



La serie histórica del volumen de agua, se ha calculado realizando un *resampling* bicúbico del modelo de elevación digital HydroSHEDS del año 2000 (Lehner et al. 2008). HydroSHEDS es un producto de mapeo que proporciona información hidrográfica para aplicaciones de escala regional y global en un formato consistente. HydroSHEDS se basa en datos

de elevación obtenidos en el 2000 por la Misión de topografía de radar de transbordador (SRTM) de la NASA. Este conjunto de datos de elevación hidrológicamente acondicionados es el resultado de un proceso iterativo de acondicionamiento y corrección. Las cuencas endorréicas (sumideros interiores, caso de la microcuenca de la laguna de San

Rafael) se 'sembraron' con una celda sin datos en su punto más bajo para terminar el flujo. Los detalles completos del modelo de elevación digital subyacente están disponibles en: <https://www.hydrosheds.org/page/overview>

En un primer momento, se intentó calcular una serie histórica de medianas mensuales a partir de enero 2000 hasta la actualidad. Debido a la baja frecuencia de imágenes anteriores a junio 2014, se obtuvo una serie discontinua. Por el contrario, después de dicha fecha, se evidencia tan solo un mes no utilizable debido a la presencia de nubes que han alterado la estimación de la superficie de agua en diciembre de 2016.

De un total de 1.387 de imágenes obtenidas entre el 1/1/2000 y 11/2/2021, el 75% correspondiente a 1.042, se concentra en la ventana temporal comprendida entre el 1/6/2014 y 11/2/2021, debido a la incorporación estable de las imágenes derivadas de

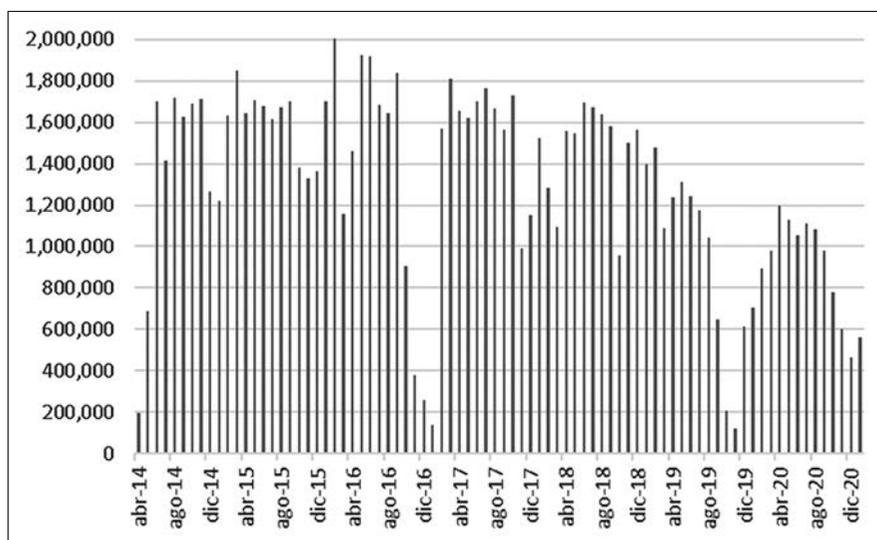
las misiones europeas Sentinel 1 y 2 con las misiones estadounidenses Landsat 5, 7 y 8. Se considera que los datos disponibles anteriormente a la fecha del 1/6/2014, al no poderse agregar temporalmente de manera continua, no constituyen fuente confiable para integrar la serie histórica del volumen de la laguna de San Rafael.

Mientras las colecciones de datos ópticos muestran continuidad a lo largo de la ventana temporal posterior al 1/04/2014 para la serie histórica del volumen de la masa de agua y la de caracterización de la vegetación, los datos de radar (Sentinel 1), presentan vacíos durante algún periodo, que empieza a contribuir desde mayo 2015, faltando junio 2015, marzo-agosto 2016 y noviembre 2016, con un total de 62 meses de datos validos hasta febrero 2021, contra los 83 meses de datos válidos para la serie de volumen de la masa de agua, habiéndose optado por sustituir diciembre 2016 con el promedio de noviembre 2016 y enero 2017.

Tabla 1. Fuentes para calcular el histórico del volumen de agua de la laguna de San Rafael

Código de la Colección	Freq.	N.	Res.	Bandas utilizadas - Longitud de onda		
LANDSAT/LT05/C01/T1_SR	16d	130	30m	0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$	0,76 - 0,90 $\mu\text{m}$	1.55 - 1.75 $\mu\text{m}$
LANDSAT/LE07/C01/T1_SR	16d	308	30m	0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$	0,77 - 0,90 $\mu\text{m}$	1.55 - 1.75 $\mu\text{m}$
LANDSAT/LC08/C01/T1_SR	16d	95	30m	0,53 - 0,59 $\mu\text{m}$	0,85 - 0,88 $\mu\text{m}$	1.57 - 1.65 $\mu\text{m}$
COPERNICUS/S2	5d	584	10m	0,56 $\mu\text{m}$ (S2A) / 0,559 $\mu\text{m}$ (S2B)	0,8351 $\mu\text{m}$ (S2A) / 0,833 $\mu\text{m}$ (S2B)	1.6137 $\mu\text{m}$ (S2A) / 1.6104 $\mu\text{m}$ (S2B)
COPERNICUS/S1_GRD_FLOAT	6d	270	10m	(VV) 5,405 GHz		

Figura 4. Volumen de agua estimado laguna de S. Rafael (m3, medianas mensuales 2014-2020)



## Clima y Vegetación: las Variables Independientes

Con base en una extensa exploración previa de relaciones significativas entre candidatos predictores y funciones hidrológicas, se han seleccionado las variables candidatas a predictor para construir un modelo del volumen de agua drenado y almacenado en la laguna en objeto, mes a mes, teniendo en

cuenta cierta latencia de la respuesta. Por ello, la serie histórica de variables climáticas y de caracterización de la vegetación empiezan en junio 2013, un año antes de la serie histórica de volumen de agua. Se ha evidenciado que la respuesta de la vegetación al insumo agua se detecta mejor con meses de latencia, y dicho insumo debería integrarse como valor acumulado durante cierto tiempo.

Tabla 2. Fuentes para calcular el histórico del volúmen del agua

Código de la Colección	Freq.	N.	Res.	Bandas utilizadas - Longitud de onda
NEX-GDDP: NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections	1m	79	0,1'	Precipitación y Evapotranspiración (convertido a mm/mes)
ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY	1m	81	0,1'	Precipitación y Evapotranspiración (convertido a mm/mes)
MODIS/006/MOD13Q1	16d	157	250m	EVI, NDVI, 0,459-0,48 $\mu\text{m}$ , 0,545-0,565 $\mu\text{m}$ , 0,62-0,67 $\mu\text{m}$ , 0,84-0,876 $\mu\text{m}$ , 1,23-1,25 $\mu\text{m}$
MODIS/006/MYD13Q1	16d	156	250m	EVI, NDVI, 0,459-0,48 $\mu\text{m}$ , 0,545-0,565 $\mu\text{m}$ , 0,62-0,67 $\mu\text{m}$ , 0,84-0,876 $\mu\text{m}$ , 1,23-1,25 $\mu\text{m}$
COPERNICUS/S1_GRD	6d	349	10m	Vertical-Vertical y Vertical-Horizontal, (VV-VH 5,405 GHz, convertido a dB)

## Uso del Suelo: la Variable Interviniente

Con el fin de proyectar la cobertura y el uso del suelo al 2030 dentro de la microcuenca que abastece de agua superficial a la ciudad de San Rafael, se han generado tres mapas de cobertura: para los años 2000, 2010 y 2020. Se han identificado tres clases principales de cobertura y uso del suelo dentro de la cuenca que suma aproximadamente 7.700 hectáreas: agua, uso antrópico (ganadería, agricultura, caminos y urbanizado) y bosque.

Se clasificó el espejo de agua de forma automática utilizando las fórmulas 1 y 2 detalladas más arriba. Se identificaron áreas de muestreo para el uso antrópico y el bosque que no han cambiado de uso y cobertura durante los últimos veinte años (figura 5 - año 2000).

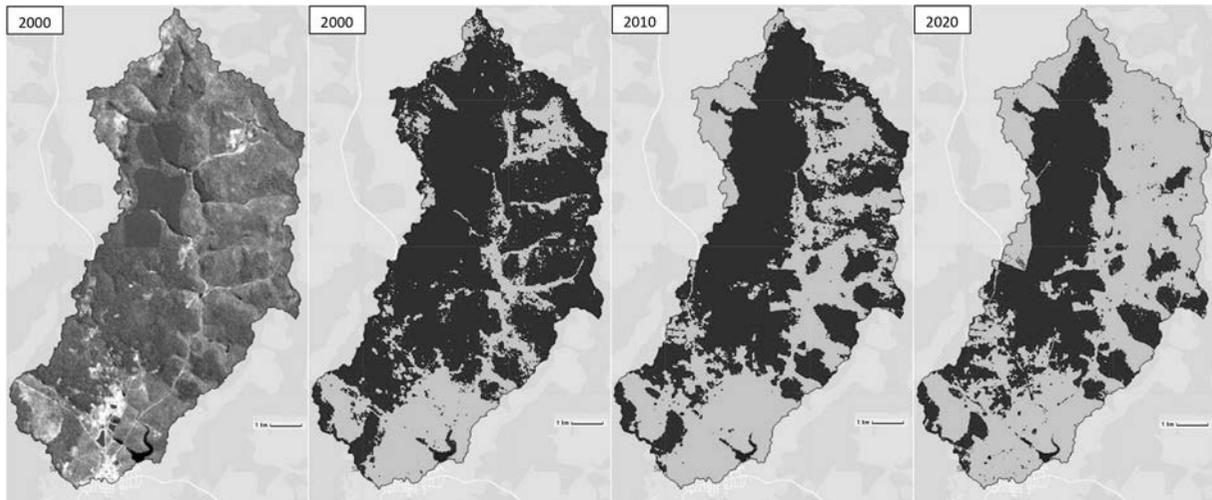
Las áreas de muestreo han resultado útiles para determinar un modelo basado en *random forest* (tabla 2) y exportar los insumos a ser utilizados en la modelación del proceso de cambio de uso de suelo en la cuenca, mapas de cobertura para el cálculo de las transiciones bosque-uso antrópico y viceversa, y las medianas de las mejores imágenes (privadas de nubes) obtenidas durante la segunda mitad del año de interés, época en la cual se efectúan consuetudinariamente las operaciones para cambiar el uso del suelo. Entre los años 2000 y 2020, la tasa de cambio de uso del suelo interanual ha promediado

1,2% que, de mantenerse para la década 2021-2030, llevaría a una conversión de uso de suelo del 71% del total de la microcuenca. Esta opción es la que se viene implementando en el software TerrSet (Eastman, 2020). Casi el mismo resultado se obtiene con un pronóstico lineal (69%), que mantiene una expectativa de tasa de cambio de uso del suelo constante para los próximos diez años.

Tabla 3. Cambio de uso del suelo en la microcuenca de San Rafael

2000		2010		2020	
Sample size by class:		Sample size by class:		Sample size by class:	
Bosque	15000	Bosque	15000	Bosque	15000
Uso Antropico	15000	Uso Antropico	15000	Uso Antropico	15000
Train Accuracy (70%):	99,98%	Train Accuracy (70%):	99,93%	Train Accuracy (70%):	100,00%
Test Accuracy (30%):	99,84%	Test Accuracy (30%):	99,79%	Test Accuracy (30%):	99,93%
Predictors´ importance:		Predictors´ importance:		Predictors´ importance:	
Landsat 7 y 5, Bandas:		Landsat 7, Bandas:		Sentinel 2, Bandas:	
B7:	1880	B5:	2278	B3:	1410
B2:	1838	B2:	2272	B2:	1040
B3:	1754	B4:	2019	B6:	801
B5:	1516	B3:	1930	B4:	796
B4:	1427	B1:	1542	B1:	790
B1:	1196	B7:	1496	B5:	769
B6:	971	B6:	1129	B7:	755
				B10:	467
				B11:	427
numberOfTrees:	1000	numberOfTrees:	1000	numberOfTrees:	1000
Human use:	34%	Human use:	40%	Human use:	59%

Figura 5. Evolución del uso del suelo en la microcuenca de San Rafael 2000-2020



El cálculo de la probabilidad de transición de bosque a uso antrópico y viceversa se ha efectuado a partir del ensamblaje de seis modelos predictivos. Gracias a la plataforma Google Earth Engine (GEE), se ha reproducido el flujo de trabajo básico descrito en Eastman (2020), calculando el mapa de probabilidad de transición de bosque a uso antrópico y, posteriormente, calculando el mapa de uso del suelo esperado para el porcentaje previsto al 2030, fijando el punto de corte en 30% de bosque residual.

Concretamente, se ha procedido a generar un “iniciador”, un primer mapa de probabilidad de conversión basado en las características del territorio como ser elevación, pendiente, aspecto y sombreado, distancia a caminos y, finalmente, distancia a la red hídrica, utilizando como fuentes los drenajes principales y secundarios de la cuenca. Con estos insumos, se han generado seis mapas en modo “probabilidad” aprovechando los seis algoritmos de clasificación/regresión, disponibles

en GEE que permiten este tipo de output: *Random Forest*, *Gradient Tree Boost*, *Naive Bayes*, *Cart*, *Gmo MaxEnt*, *Libsvm*. Los ajustes progresivos a los modelos se realizaron evaluando los parámetros de “importancia del predictor” y “precisión” de cada uno. Se eliminaron progresivamente *features* que mostraran brindar un aporte informacional al modelo “importancia del predictor” igual a 0. Finalmente, los outputs de los modelos predictivos utilizados sirvieron de inputs para un modelo no paramétrico que aprende de todos los demás para garantizar un mejor ajuste. Esta técnica es llamada *model ensemble o stacked generalization* y se utiliza ampliamente en modelación predictiva (Brownlee, 2016; Wolpert, 1992).

Las funciones de costo-distancia a la red de drenaje y a la red caminera se calcularon, en una primera instancia, con la pendiente, pero, al resultar más informativa la elevación se optó por recalcular los mapas de costo-distancia con esta otra variable y alimentar los modelos probabilísticos con los nuevos insumos. Finalmente, se procedió a ensamblar los outputs de los seis modelos probabilísticos con el algoritmo que mostrase el mejor ajuste a la hora de proyectar la probabilidad de cambio de uso del suelo hacia el futuro, comparando los resultados obtenidos con la realidad histórica observada.

Este primer ciclo llevó a calcular un mapa hipotético de clasificación binaria Bosque vs. Uso antrópico para el 2010, con una coincidencia de ambas clases, del 74%. Básicamente se extiende a lo que en el año 2000 se clasifica como bosque a las características de las áreas antropizadas, como pendiente, elevación, orientación (solana vs umbría) y proximidad a las redes caminera e hídrica. Esto básicamente corresponde a un diagnóstico de “aptitud” para usos antrópicos, basado en la observación del uso del suelo existente. Sin embargo, los drivers del cambio de uso de suelo cambian en el tiempo, intervienen más factores en la apropiación de los recursos naturales, muchos de ellos no observables por medio de la teledetección.

Una vez calculado el iniciador, el mismo sirvió de insumo inicial para calcular los insumos del siguiente ciclo. En el segundo ciclo, la variable dependiente ya no es el uso antrópico en un determinado momento, sino la transición observada entre  $t_0$  y  $t_1$ , es decir, los nuevos desmontes realizados entre los años 2000 y 2010, reflejando de tal forma las tendencias actualizadas del fenómeno. Pierden de importancia las variables morfológicas del territorio y ganan tracción otros factores como ser la función de costo-distancia

a áreas previamente desmontadas, la tenencia legal de la tierra, el tamaño del fragmento de bosque y su posición en el paisaje general. En la microcuenca en examen, resultó ser más probable que se desmontara una pequeña reliquia de bosque dentro de un potrero, modelada con técnicas de reconocimiento de objetos y clasificación automatizada de los mismos con base en su tamaño, antes que un área grande dentro de un parche continuo de bosque.

Asimismo, adquiere relevancia el antecedente de uso del suelo (las áreas antrópicas del año 2000 en su gran mayoría siguen teniendo el mismo uso en los años 2010 y 2020). Lo más destacable de este segundo ciclo de cálculo es que permite construir un modelo creíble de cambio de uso del suelo con base en la transición observada entre 2000 y 2010 y contrastarlo con la realidad observada en el año 2020. La precisión del modelo aumentó significativamente incorporando los *features* mencionados hasta el 86% de coincidencia con la cobertura observada para el año 2020 (mejorando un 12% respecto al 2010).

El tema de la tenencia legal de la tierra amerita una reflexión aparte: el uso del suelo de aquí a diez años, en un cierto lugar, depende en buena medida de factores no observables como la propiedad de la tierra (comunitaria, comprada, revertida, indivisa, micro/latifundio, en uscapión, en litigio, con trámites incompletos), factores que cambian en el tiempo y que no conocen (acceso al crédito, un camino nuevo). Realizar un desmonte (o dejar un potrero en barbecho) es una decisión que alguien toma, y todos estos factores humanos influyen y no se pueden observar.

En relación a factores como precios, normativas, incentivos y riesgos asociados a cada actividad, después de numerosos intentos de extraer un aporte informacional para el modelo predictivo, se llegó a la conclusión que el mejor uso de este insumo dentro de la microcuenca en examen es a nivel de predio individual, realizando un *target encoding* por medio del cálculo de la diferencia entre el promedio de probabilidad de cambio de uso del suelo para el polígono y la superficie desmontada dentro del mismo. El máximo valor teórico corresponde a un polígono con el 100% de probabilidad de transición, cuya cobertura está representada por 0% de uso antrópico ( $100-0=100\%$ ). Este predictor ve su importancia relativa incrementarse dramáticamente entre el modelo utilizado para predecir la transición 2000-2010 (proyectado al 2020) y el modelo utilizado para predecir la transición 2010-2020 (proyectado al

2030. La precisión de los límites de las áreas de uso agropecuario proyectadas al 2030 respetará, en mayor grado, los límites de las propiedades, mejorando

potencialmente la precisión de la predicción. Se muestran los gráficos de barra de la importancia relativa de cada predictor dentro de los dos modelos:

Figura 6. Importancia de los predictores dentro del modelo para 2020 (izquierda) y para 2030 (derecha)

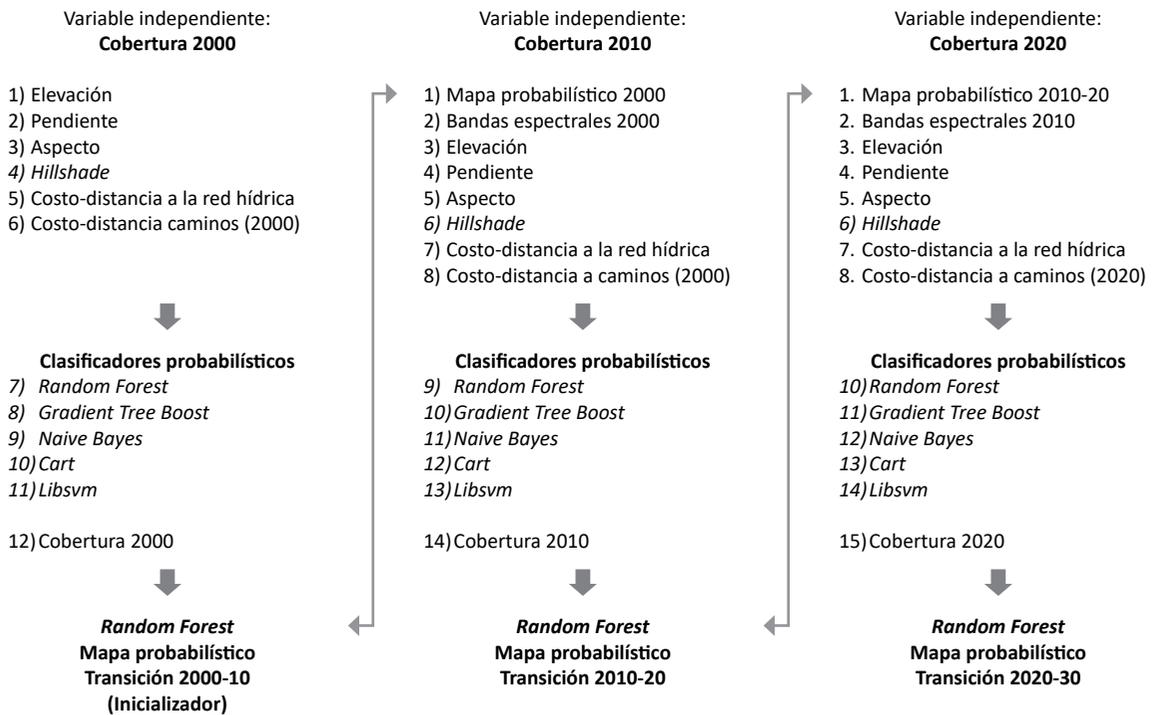
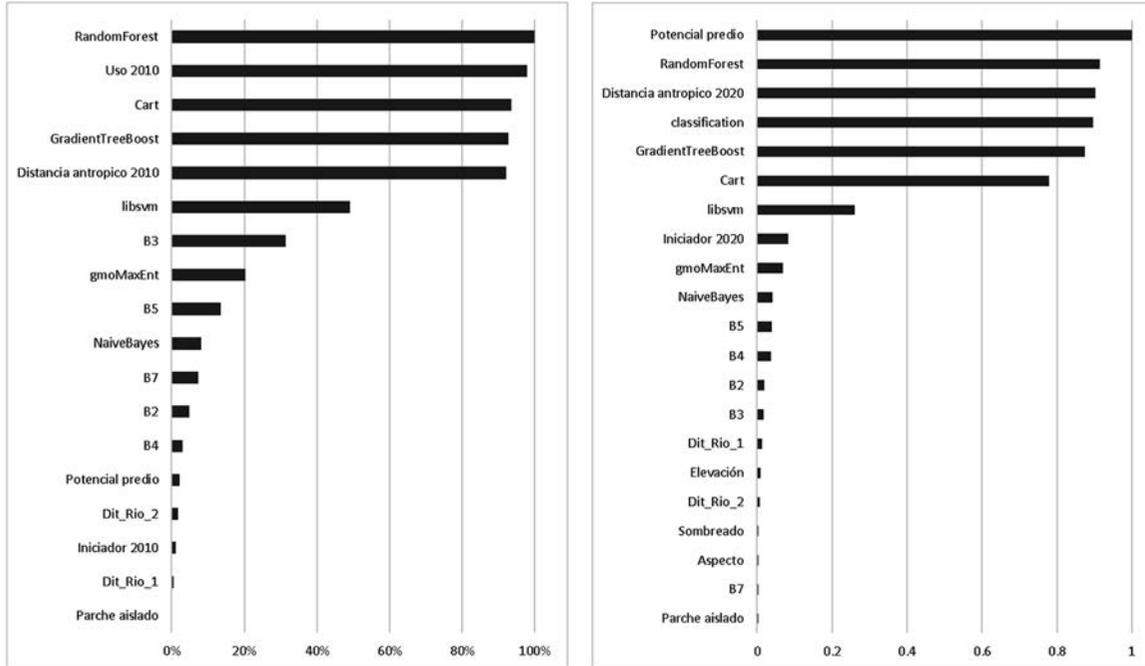
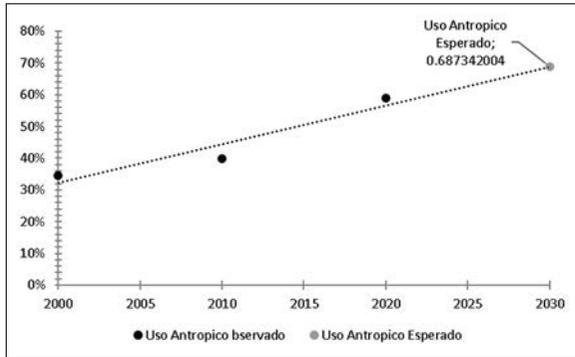


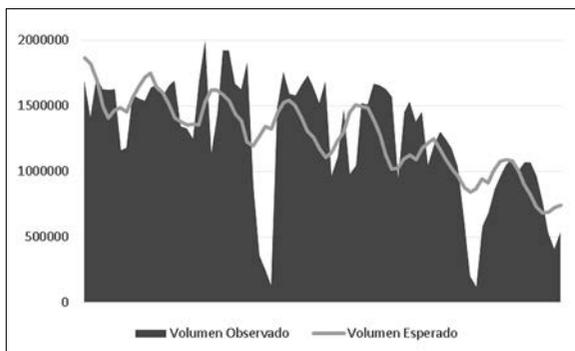
Figura 7. Cambio de uso del suelo observado hasta 2020 y esperado hasta 2030



## RESULTADOS

La modelación de la respuesta hidrológica de la microcuenca, mes a mes, mejora significativamente una vez se tome en cuenta el uso del suelo para fines agropecuarios, que varía anualmente de acuerdo con una tasa de cambio que se asume fija (1,59% anual), alcanzando un coeficiente de determinación de 92%. Aunque el modelo no logre capturar los mínimos históricos registrados, sí representa adecuadamente la estacionalidad y la tendencia a la disminución del volumen de agua de la laguna, razón primordial del estudio.

Figura 8. Volumen del agua promedios mensuales en m<sup>3</sup> (2014-2020)



Con la finalidad de monitorear en tiempo real la disponibilidad de agua en la laguna, con una frecuencia mensual, algunas variables han demostrado poseer mayor poder predictivo y han superado las pruebas de multicolinealidad, mismas que generan los resultados graficados (figura 8).

- La tasa de uso de suelo para fines agropecuarios.
- La dinámica de la vegetación en la cuenca modelada promediando los valores de reflectancia sin escalar de la banda b03 de los sensores MODIS Terra y Aqua.
- La disponibilidad hídrica superficial derivada de la evapotranspiración real (ETR) calculada con la fórmula de Coutagne

$$ETR = P - \Delta P \text{ (Caba, 2018).}$$

donde:

ETR = evapotranspiración real;

P = precipitación;

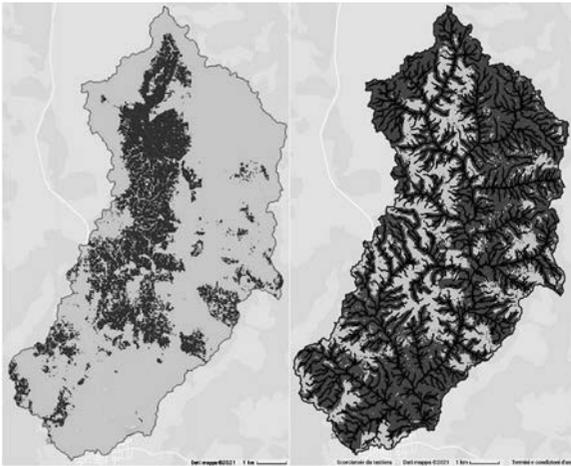
$$\Delta = 1 / (0.8 + 0.14 * T);$$

T = temperatura media en °C.

Por otro lado, se proyectó el volumen promedio del agua en la laguna, hasta el año 2030, a partir de la modelación con los datos de clima del conjunto de datos NASA/NEX-GDDP (Thrasher et al. 2012), alcanzando un coeficiente de determinación de 79%. Con este conjunto de datos, que permite proyectar el almacenamiento de agua promedio al 2030, la variable climática que demostró poseer el mayor poder predictivo fue la temperatura promedio anual, pero, el cambio de uso de suelo demostró afectar de manera contundente a la variable dependiente. Con un uso del suelo para usos antropicos proyectado en 70% para el 2030, el volumen de la laguna esperado es 118.182 m<sup>3</sup>.

En un escenario alternativo, donde se cumple la normativa vigente (ABT, 2016) de preservar la vegetación nativa en una franja de 100 metros alrededor de cualquier cuerpo de agua y hasta los drenajes menores, dejando que la sucesión y la regeneración ecológica cumplan su curso, se tendría una tasa de uso del suelo agropecuario del 28% y los volúmenes de agua podrían verse restaurado a niveles de casi 2,5M de m<sup>3</sup>. Este escenario es ideal y supondría una reversión radical de la tendencia, no solo en el cambio de uso del suelo sino en el patrón de uso del suelo que en la actualidad va en contra de la normativa vigente con una predilección por la proximidad de los potreros a los drenajes naturales. La simple aplicación de la normativa vigente permitiría restaurar la funcionalidad hidrológica de la microcuenca, suponiendo una transformación radical del paisaje antropizado, aunque las áreas urbanizadas no se verían afectadas.

Figura 9. Uso del suelo al 2030. Tendencia actual (izq.).  
Aplicando la normativa vigente (drx.)



Cabe señalar que un porcentaje de uso del suelo para fines agropecuarios del 73%, tal como se podría alcanzar en el año 2032, implicaría un balance hídrico negativo y la pérdida completa del cuerpo de agua de acuerdo con el modelo empírico aquí presentado. Un

balance hídrico negativo significa que el sumidero de agua representado por la cuenca endorreica pasaría a ser un emisor neto de agua a falta de cobertura vegetal ( $\alpha < 0,01$ ).

Cualquier escenario alternativo se puede calcular fácilmente con una regresión lineal que atribuye el mayor peso al porcentaje de uso del suelo agropecuario en la cuenca utilizando los parámetros en la ecuación que, con solo 7 observaciones (2014-2020), identifica dos predictores con un nivel de confianza > 99%. La temperatura promedió 27,73 C° entre 2014 y 2020, mientras la expectativa para 2030 es que alcance los 28,29 C° (NASA/NEX-GDDP). Un escenario con regeneración ecológica asistida o agroforestería, que permita mejorar las actividades productivas y a la vez restablecer la cubierta vegetal, podría dejar en 20% el uso de suelo agropecuario perjudicial, tal como se ha observado hasta la fecha actual. Esto significaría restaurar la función hidrológica con potencial de almacenamiento promedio anual de hasta 3,1M de m<sup>3</sup>.

**Estadísticas de la regresión**

R <sup>2</sup> ajustado	0,79
Error típico	139045
Observaciones	7

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	1,22E+13	6,09E+12	314,836863	3,98E-05
Residuos	5	9,6668E+10	1,9334E+10		
Total	7	1,23E+13			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Temperatura C°	187401,566	32706,3384	5,72982409	0,0022666
Uso Agropec.%	-7315912,9	1699596,12	-4,3045008	0,0076826

## DISCUSIÓN

Las metodologías aquí demostradas se pueden aplicar a cualquier microcuenca que abastezca de aguas superficiales un cuerpo de agua o un centro poblado. Estos resultados se pueden fácilmente proyectar a otras microcuencas, aunque unos modelos predictivos para el pronóstico en tiempo real requerirían calibración con datos locales. La realidad social y económica del territorio hace que la aplicación de la normativa vigente sea más complicada de lo deseable.

Aunque las proyecciones de cambio climático o de cambio de uso del suelo pueden fallar, y los pocos datos históricos disponibles podrían ocasionar que el modelo no generalice bien, se evidencian sin lugar a dudas dos macrotendencias que afectan la función hidrológica y se encuentran escalando a nivel de toda la región: el calentamiento del clima y la conversión de uso del suelo. De las dos tendencias la que definitivamente se encuentra al alcance de las administraciones locales, y dentro de sus funciones y atribuciones, es claramente la definición de políticas y estrategias para lograr el cumplimiento de la normativa vigente y la mejora de los sistemas agro productivos, garantizando el derecho al agua segura que la Constitución Política del Estado reconoce a la población.

El modelo de previsión del servicio de agua para el consumo humano en Bolivia ha sido definido "autárquico" (CAF, 2017) y otorga a los Gobiernos Autónomos Municipales la potestad sobre los recursos naturales en su territorio. El mismo informe de la CAF (2017) señala con fundamento que la falta de asistencia técnica a los GAM es un elemento determinante de la brecha existente entre el derecho humano al agua segura y su cumplimiento en Bolivia, garantizando la calidad y la cantidad de agua suficiente y oportuna.

El uso de suelo puede tornarse más productivo incorporando una mayor cobertura vegetal que provea sombra, microclima, protección de la erosión hídrica y eólica, mejorando el balance hídrico de cualquier unidad hidrológica. La vegetación facilita la infiltración de agua en el suelo y reduce la evaporación y escorrentía, representando una protección física de los impactos de las precipitaciones, responsables de arrastrar suelo fértil a los cuerpos de agua y lixiviar, además de sedimentos, nutrientes y contaminantes de los potreros y campos agrícolas. Es competencia de los Gobiernos Autónomos Municipales supervisar la provisión de agua potable a la población, tarea

delegada a las cooperativas de agua o asumida por unidades municipales mediante las EPSAs (Empresas Públicas Municipales de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario).

## REFERENCIAS

- ABT, (2016). Manual de Elaboración de Planes de Ordenamiento Predial. Recuperado de [http://www.abt.gob.bo/images/stories/formularios-reglamentos/2018/RA-ABT-242-2018\\_Manual%20de%20POP.pdf](http://www.abt.gob.bo/images/stories/formularios-reglamentos/2018/RA-ABT-242-2018_Manual%20de%20POP.pdf)
- Brownlee, (2016). Machine Learning Mastery with Python. Machine Learning Mastery.
- Caba, J., (2018). Mapeo temático de la oferta, uso actual y disponibilidad de los recursos hídricos del valle central de Tarija. Informe Final. GADT, SNV, SEDEGIA.
- CAF (2017). Agua y saneamiento en el Estado Plurinacional de Bolivia. Depósito legal: DC2017001518. ISBN: 978-980-422-078-4.
- Carreño C., F., De Mata Muñoz, M., (2019). Flood Monitoring Based on the Study of Sentinel-1 SAR Images: The Ebro River Case Study" Water 11, no. 12: 2454.
- Eastman, R. (2020). TerrSet 2020 Geospatial Monitoring and Modelling System. Clark University
- Healey et al., (2018). Mapping forest change using stacked generalization: An ensemble approach. Remote Sensing of Environment 204, pp. 717-728.
- Gao, B.C., (1996). NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58, pp. 257–266.
- Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A., (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. Eos, Transactions, AGU, 89(10): 93-94.
- Markos, A., (2019). CRISIS HÍDRICAS LOCALIZADAS EN 2019 Y OPORTUNIDADES PARA EL MEDIANO PLAZO Y LARGO PLAZO. Diagnóstico por teledetección en microcuencas de siete Municipios Chiquitanos y dos cuencas hidrográficas. FCBC. Recuperado de [https://obch.fcbc.org.bo/wp-content/uploads/2019/08/REPORTE\\_RECURSOS\\_HIDRICOS.pdf](https://obch.fcbc.org.bo/wp-content/uploads/2019/08/REPORTE_RECURSOS_HIDRICOS.pdf)
- Markos, A. et al. (2020). Plan estratégico para la implementación del plan de recuperación de las áreas afectadas por los incendios en el departamento de Santa Cruz. FCBC-GADSCZ. Recuperado de [https://www.fcbc.org.bo/wp-content/uploads/2020/09/PLANRESTAURACION-GAD.pdf?fbclid=IwAR3bHnYsagGSrYHJsm2q\\_ZrqPECDjPFyXEeWVLk0CteWVcrOFM3ahSQebc](https://www.fcbc.org.bo/wp-content/uploads/2020/09/PLANRESTAURACION-GAD.pdf?fbclid=IwAR3bHnYsagGSrYHJsm2q_ZrqPECDjPFyXEeWVLk0CteWVcrOFM3ahSQebc)

- McFeeters, S.K., (1996). The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, pp. 1425–1432.
- McNally NASA/GSFC/HSL (2018), FLDAS Noah Land Surface Model L4 Global Monthly 0.1 x 0.1 degree (MERRA-2 and CHIRPS), Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), doi:10.5067/5NHC22T9375G
- McNally, A., Arsenault, K., Kumar, S., Shukla, S., Peterson, P., Wang, S., Funk, C., Peters-Lidard, C.D., & Verdin, J. P. (2017). A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. *Scientific Data*, 4, 170012.
- NASA (2019). SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. DOI: 10.25966/1rgr-q551
- Thrasher, B., J. Xiong, W. Wang, F. Melton, A. Michaelis and R. Nemani (2013), Downscaled Climate Projections Suitable for Resource Management, *Eos Trans. AGU*, 94(37), 321. doi:10.1002/2013EO370002
- Wolpert (1992). Stacked generalization. *Neural Netw.* 5, pp. 241–259.
- Xu, H., (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27:14, pp. 3025-3033

# PRONÓSTICO INTEGRADO DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES EN TIEMPO REAL

Andrea Markos<sup>1</sup>

## RESUMEN

El comportamiento de los incendios forestales puede volverse extremo, sin previo aviso, provocando la pérdida de vidas, propiedades y recursos naturales. Los eventos extremos de incendios forestales son fenómenos piro-convectivos que sobrepasan la capacidad de control, y exhiben una propagación y comportamiento del fuego erráticos e impredecibles, caracterizados por una velocidad de propagación  $> 50$  m / min y una intensidad de la línea de fuego  $\geq 10$  Mw / m<sup>-1</sup>. La intensidad de la línea de fuego es la métrica principal que define el peligro de incendios forestales.

Siguiendo las definiciones operativas del USDA / USFS, el peligro integrado de incendios forestales (IWH) se modeló como un resultado ponderado por probabilidad:

- a) la tasa de liberación de energía de un incendio forestal en un perímetro de incendio, modelada como potencia radiativa del fuego,
- b) la probabilidad de que un incendio forestal arderá en un punto y día especificados. Los pronósticos del comportamiento del fuego deben predecir con precisión tales métricas. Los conjuntos de datos existentes proporcionan datos de potencia radiativa del fuego medidos de forma remota a partir de las manifestaciones visibles del calor

radiante, proxy de la intensidad de la línea de fuego. Clasificando los datos de energía radiativa de incendios más altos a diario, se construyó un conjunto de datos equilibrado, que cubre 20 años y más de 10 países en América del Sur, incluyendo índices meteorológicos, topografía y datos satelitales de combustibles, para predecir la probabilidad de quema y la potencia radiativa de incendios. El rendimiento del modelo se evaluó en el contexto de los servicios predictivos de gestión de incendios a corto plazo, para mejorar la seguridad de los equipos de extinción de incendios y la población en aplicaciones en tiempo real.

## INTRODUCCIÓN

El propósito de los modelos predictivos desarrollados para este estudio es pronosticar el comportamiento del fuego cercano al máximo posible en cada píxel de un paisaje, y la probabilidad asociada a tal resultado en un día determinado, de acuerdo con las condiciones ambientales. La intensidad de la línea de fuego es la métrica que define el peligro de incendios forestales que: “combina dos, métricas importantes de los incendios forestales — la probabilidad de quema y la intensidad condicional de incendios forestales — en una sola característica que se puede mapear”. El peligro integrado de incendios forestales es el producto de la probabilidad de quema y la intensidad condicional de los incendios forestales (Scott 2013, p. 81), es decir: una fracción de la

<sup>1</sup> Miembro del Consejo de Investigaciones de la ANCB-SC.

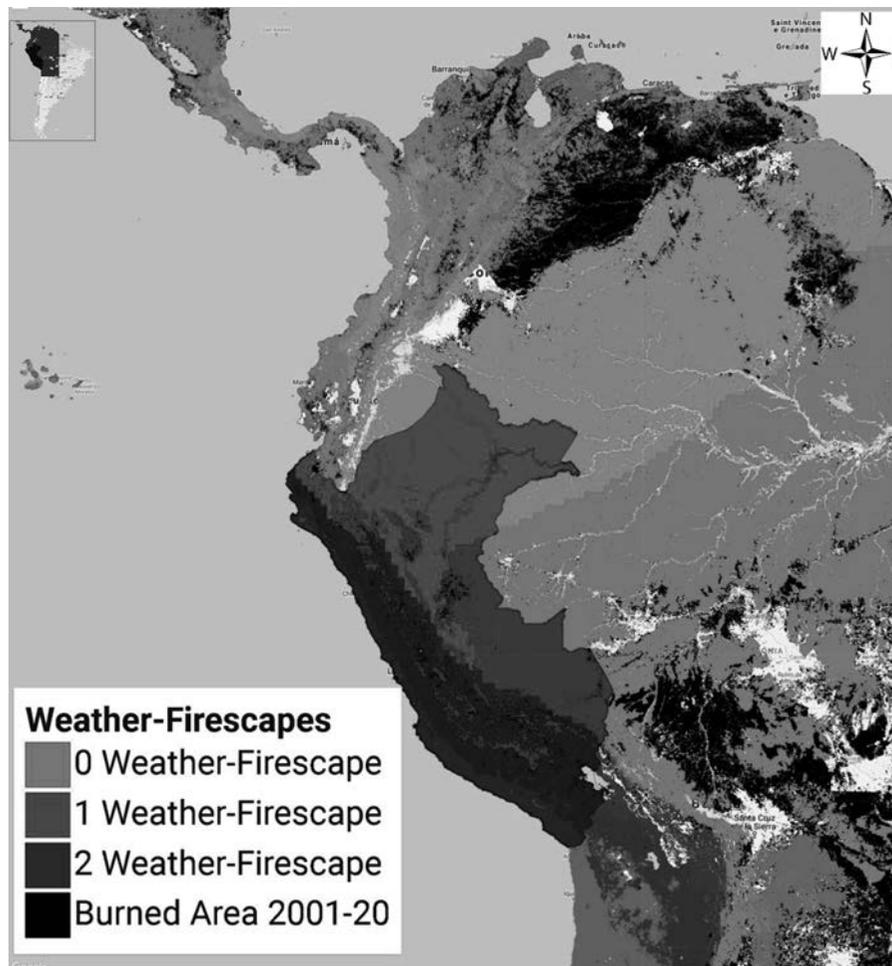
intensidad potencial de la línea de fuego que podría lograrse de acuerdo con los registros de valores extremos, dadas las condiciones del combustible, topografía y clima, si ocurre un incendio, que por definición, no es una quema con fines agrícolas o pecuarios.

Byram (1959) definió la intensidad de la línea de fuego como la cantidad de calor liberada por un segmento lineal sobre un perímetro de fuego. El principal inconveniente de la intensidad de la línea de fuego es que no puede medirse físicamente, solo estimarse (Alexander y Cruz 2019 en Manzanillo (ed.) 2019). La colección MODIS de anomalías térmicas proporciona alrededor de 20 años de observaciones diarias que incluyen megavatios emitidos. Desafortunadamente, los intentos de derivar el área fraccional de subpíxeles de los incendios forestales a partir de los datos de MODIS arrojaron resultados deficientes (Cheng et al. 2004; Peterson et al. 2010). Por lo tanto, la derivación de una intensidad de línea

de fuego a partir de focos de calor de MODIS, es un esfuerzo incierto. Por consiguiente, solo el poder de radiación de fuego (PRF) obtenido de MODIS (Giglio et al. 2020) y expresado en megavatios, se modela como un proxy de la intensidad de la línea de fuego.

Las primeras ejecuciones de este experimento a escala de paisaje mostraron la estacionalidad y la latitud como los predictores más importantes del comportamiento del fuego casi-máximo, lo que llevó a la codificación del día del año y la agrupación espacial, para estratificar dos “paisajes del fuego” principales. Las tierras altas y costeras andinas desérticas encajan adecuadamente en un tercer grupo de k-medias que presentó largos períodos sin datos de incendios, lo cual no es adecuado para este estudio. Se utilizaron veinte años (2001-2020) de índices meteorológicos-incendios y de vegetación diarios para agrupar: Índice de quema; Índice meteorológico de incendios; Componente de liberación de energía; Índice de sequía de Keetch-Byram; NDVI, Lat & Lon y Elevación.

Figura 1. Mapa de Incendios



## METODOLOGÍA

El ensayo controlado aleatorio (ECA) es un tipo de estudio en el que los participantes se asignan al azar a una de dos o más intervenciones clínicas. En la jerarquía de la evidencia, los ECA representan el estándar de oro para evaluar la efectividad (Evans 2001; McGovern 2001), también fuera de las ciencias médicas (Glennister Takavarasha 2013; Gertler et al. 2016). Los ECA minimizan el riesgo de factores de confusión que influyen en los resultados y es más probable que estimen el verdadero efecto de las intervenciones que otros métodos (Akobeng, 2005). De manera similar a cualquier estudio diseñado para una inferencia poderosa (Bruhn McKenzie 2008; Glennister Takavarasha 2013; Gertler et al. 2016), el muestreo de un conjunto de datos equilibrado fue una prioridad desde el inicio de este estudio.

Wilson (1977) identificó denominadores comunes del comportamiento del fuego que vinculan muertes y atrapamientos de los bomberos, temas de gran preocupación en la actualidad (Werth et al. 2016; Tedim et al. 2018; 2020; Jolly et al. 2019; Page et al. 2019a ; 2019b), adoptado aquí como criterio de diseño del estudio:

A menudo, ocurren atrapamientos e incidentes fatales:

- En incendios relativamente pequeños o en sectores engañosamente silenciosos de grandes incendios.
- En combustibles relativamente livianos, como pasto, hierbas y arbustos ligeros.
- Cuando el fuego responde a las condiciones topográficas y corre cuesta arriba.
- Cuando hay un cambio inesperado en la dirección o la velocidad del viento.

Criterios de estudio correspondientes:

- Teniendo en cuenta cada píxel en llamas de forma individual (927 m), no necesariamente pertenece al perímetro de un incendio forestal grande.
- Estratificación por tipo de combustible (reclasificado como "forestal" frente a "no forestal").
- Muestreo del terreno de forma sistemática para establecer una relación con las recuperaciones extremas de PRF.

- Los cambios en la dirección o velocidad del viento se pueden codificar como eventos utilizando los conjuntos de datos ERA5 terrestres o GFS. Desafortunadamente, relacionar los puntos calientes de MODIS con un máximo de dos observaciones al día con un evento repentino y potencialmente de corta duración es una tarea incierta. Los puntos de acceso recuperados de GOES 16, con actualizaciones cada diez minutos, podrían ser adecuados para tal fin.

La variable dependiente es la Potencia Radiativa del Fuego (PRF), obtenida por los sensores MODIS (colecciones MOD14A1 y MYD14A1, escala 0.1), que se modelará con un algoritmo de regresión. Derivada del PRF, es la variable binaria "quemado / No quemado", que se modelará para la probabilidad de quema con un algoritmo de clasificación. Solo las anomalías térmicas MODIS con el nivel de confianza más alto (FireMask = 9, a la escala nominal de MODIS de 927 m) están admitidas en la rutina de muestreo, una función que clasifica y muestrea los tres puntos calientes de combustión más intensa, cada uno de los 7,305 días entre 2001 y 2020, en cada paisaje del fuego (Norte y Sur) y tipo de combustible (forestal y no forestal), por lo que se han identificado cuatro estratos. De manera contrafactual, se muestrean tres puntos aleatorios dentro de cada estrato y de todos los píxeles disponibles para la combustión que alguna vez se quemaron dentro del AOI, según el conjunto de datos GlobFire (Artés et al. 2019). Solo se admiten los píxeles que se quemaron en algún momento entre 2001 y 2020, para garantizar que el tipo de vegetación, el terreno, el clima y otros predictores de la probabilidad de quema en los grupos de "tratamiento" y "control" estén lo más cerca posible entre sí, en cuanto el área quemada está notoriamente auto correlacionada en el espacio y el tiempo.

La capa de "quemado / No quemado" se actualizó diariamente con nuevos datos de incendios y combustibles (NDVI > 0.05), y la cobertura terrestre del tipo de combustible se actualizó anualmente. Todos los días se repite el procedimiento de aleatorización obteniendo una semilla aleatoria única a partir de la fecha, más un término aleatorio. Cada ejecución del procedimiento de muestreo es virtualmente única, por lo que la mayoría de las coordenadas aparecen solo una vez en el conjunto de datos, a menos que el mismo píxel pertenezca a los tres puntos calientes de mayor intensidad durante varios días. Esta estrategia de muestreo está diseñada para evaluar el efecto de las características relevantes para el

pronóstico del comportamiento del fuego cercano al máximo y su probabilidad, conociendo los resultados: comportamiento del fuego casi máximo frente a ningún incendio.

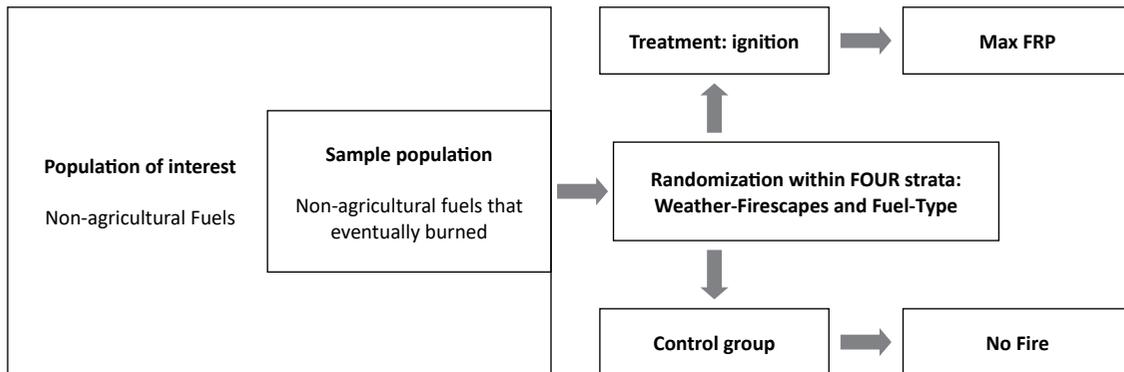
### Estratificación y emparejamiento de la muestra

La estratificación es el proceso de aumento de poder inferencial mediante la clasificación previa de los candidatos al control y al tratamiento (Spybrook 2011) en función de diferentes combinaciones de factores de pronóstico (sexo, edad). Los objetivos del emparejamiento son: mejorar las inferencias causales en los estudios observacionales y construir el mejor grupo de comparación posible basado en las características observadas (Gertler et al.2016);

reducir el desequilibrio en la distribución de los factores de confusión previos al tratamiento entre los pacientes tratados y grupos de control (Stuart, 2010); y reducir la dependencia del modelo en la estimación estadística de los efectos causales (Iacus, King y Porro, 2011).

Hacer coincidir los grupos de "tratamiento" y "control" derivados de datos de observación, equivale a "una búsqueda de un conjunto de datos que podría haber resultado de un experimento aleatorio, pero, que está oculto en un conjunto de datos de observación". Cuando el emparejamiento revela estos "experimentos ocultos", muchos de los problemas del análisis de datos de observación desaparecen ". (Stuart 2010; King y Nielsen, 2019).

Figura 2. Emparejamiento de la muestra

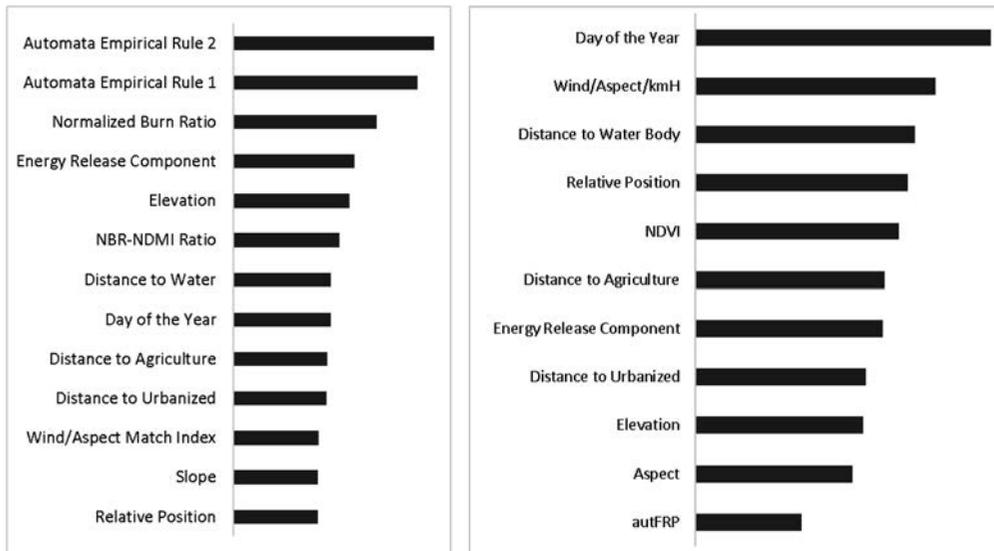


La selección de características y modelos se llevó a cabo para la Probabilidad de ocurrencia y la Potencia radiativa del fuego. En ambos casos, el primer paso consistió en clasificar las características en términos de importancia utilizando el conjunto de datos de entrenamiento y descartar la multicolinealidad mediante la exclusión recursiva de la característica menos importante en cualquier par que se correlacionara por encima de 0,67. En segundo lugar, se han probado varios algoritmos realizando una validación cruzada de cinco veces para identificar el conjunto de características más parsimonioso y el algoritmo de mejor rendimiento.

La comparación del rendimiento de la muestra llevó a identificar trece características para la estimación de probabilidad y doce para la regresión (figura 3). Los gráficos de barras de la derecha muestran las características clasificadas por importancia para ambos modelos. La característica más importante para la regresión es la suma de

PRF del día anterior en los pixeles contiguos del píxel en llamas, que no se muestra en la figura 3 porque visualmente supera por mucho a las otras características. Las reglas de autómatas celulares derivadas empíricamente encabezan la lista de predictores de probabilidad de ocurrencia.

Figura 3. Estimaciones de Probabilidad y de Regresión



**RESULTADOS**

El algoritmo de mejor rendimiento para la estimación de probabilidad fue random forest, utilizando veinte árboles por cada variable independiente para reducir el riesgo de sobreajuste. Las pruebas de precisión finales se ejecutaron como una “validación cruzada de series de tiempo” (Suradhaniwar et al. 2021) para determinar el rendimiento del modelo como si se hubiera implementado en tiempo real, evitando el sobreajuste. Una ventana móvil funcionó ligeramente mejor, con una precisión media del 81,65% (abajo). La curva de calibración de probabilidad muestra la forma

de S típica de RF, pero la escala de Platt devuelve una pérdida logarítmica peor que el modelo original. De manera similar, las técnicas de escalado de datos no mejoraron el rendimiento, por lo que el modelo es adecuado para la implementación en tiempo real sin un procesamiento previo o posterior complejo. Las probabilidades de quemarse frente a no quemarse promediaron 0,52 contra 0,48. Con un tamaño de muestra de 134,711 puntos de datos de incendios y una desviación estándar de muestra de 0,44. Para  $\alpha$  establecido en 0,01  $\beta = \sim 0$ . Las probabilidades de error de tipo I y II son cercanas a 0 para una prueba de dos caras.

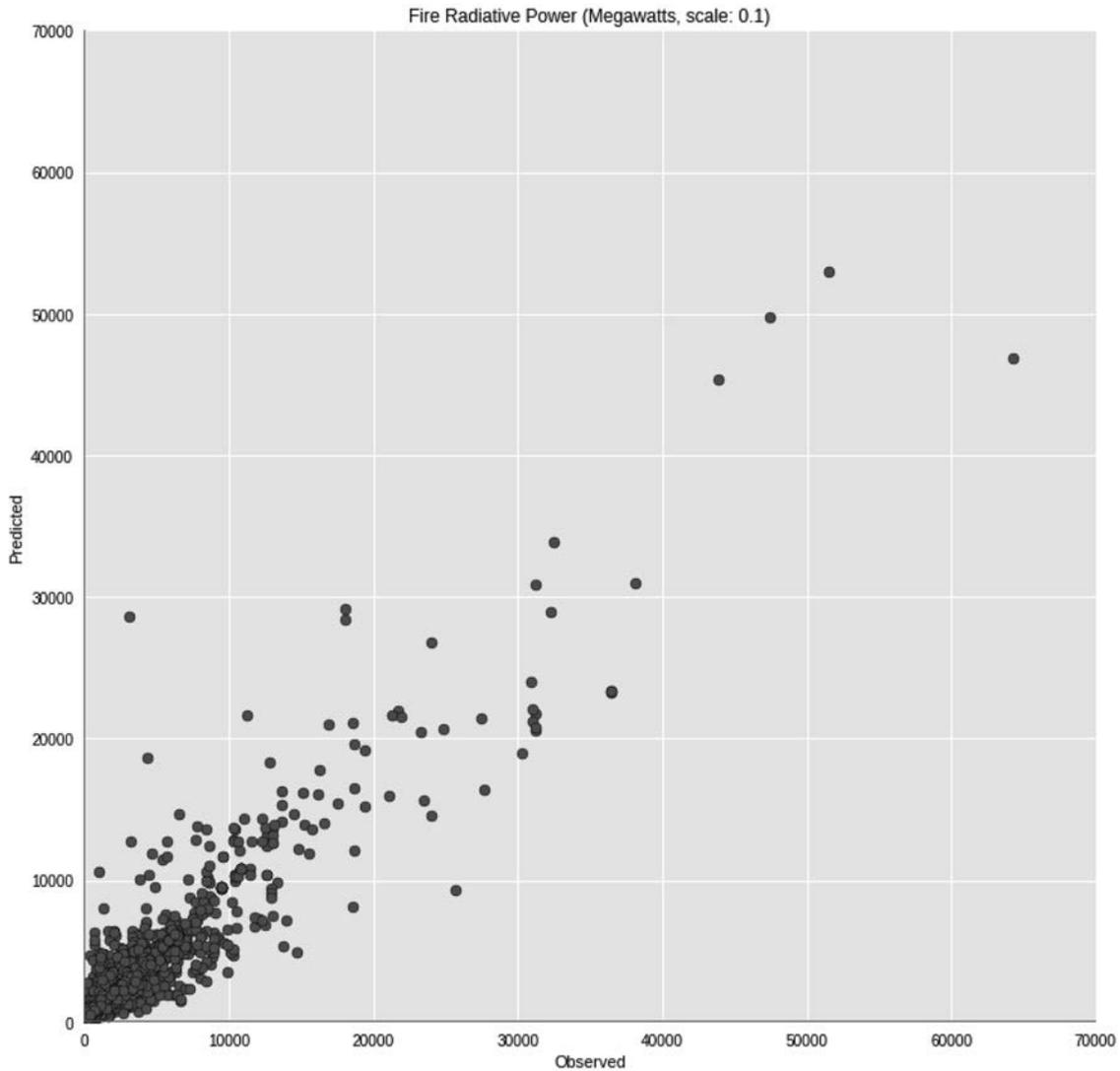
Figura 4. Pruebas de Precisión

2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
										80%									
											82%								
												81%							
													81%						
														83%					
															79%				
																80%			
																	82%		
																		85%	
																			84%

RF se desempeñó mejor que otros algoritmos disponibles también como regresor para predecir la potencia radiativa del fuego en el subconjunto del percentil 90, que representan los años más intensos registrados: 2019 y 2002. Los valores de PRF

observados frente a predichos fuera de la muestra de los 50 El subconjunto de validación dividido porcentual se muestra a la derecha. El R2 fue 0,87 en este conjunto de validación.

Figura 4. Potencia Radiativa del Fuego

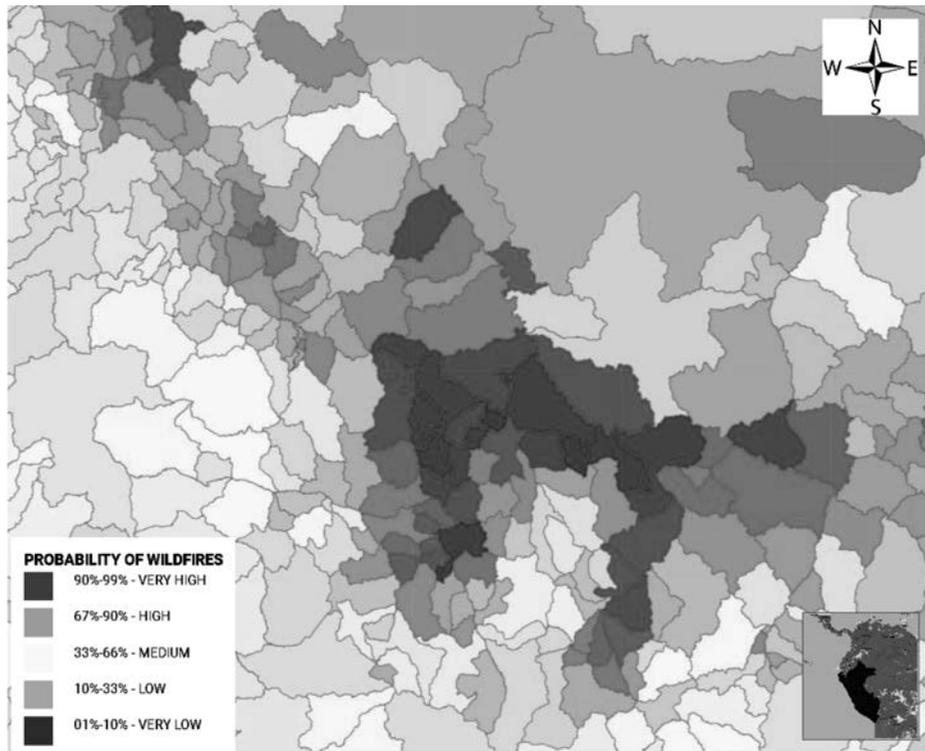


## CONCLUSIONES

Ambos modelos son fáciles de interpretar y comparten convenientemente la mayoría de las funciones. El componente de liberación de energía (Schlobohm et al. 2002), las características derivadas del viento / aspecto (Jolly et al. 2009), los índices de vegetación y las características de actividad de fuego observadas se pueden calcular en tiempo real en cualquier entorno de programación adecuado. Las distancias a los cuerpos de agua, a la agricultura y a

las áreas urbanas se calculan cada año y el modelo de elevación digital está disponible gratuitamente. La probabilidad de quemado y las salidas de intensidad condicional de incendios forestales se multiplican entre sí para obtener el pronóstico en tiempo real de IWH para, por ejemplo, las próximas 384 horas si se utiliza el Sistema de pronóstico global. Las estimaciones de IWH a nivel de píxel se pueden mapear como se calcula para un día determinado, o agregar oportunamente por unidades territoriales.

Figura 5. Probabilidad de Incendios



## AGRADECIMIENTOS

El Dr. Matt Jolly (USFS) supervisó este trabajo, brindó orientación científica en todo momento, y generó los índices meteorológicos de incendios utilizados para este estudio: FWI, BI, ERC y KBDI. El Dr. Noel Gorelick (Google) proporcionó sugerencias útiles sobre la codificación eficaz de JavaScript en GEE. El Dr. Guido Lemoine (JRC) brindó un ejemplo de código funcionando para convertir una colección de imágenes multibanda ordenadas en objetos `imageCollections ee`, con una marca de tiempo. El muestreo se realizó mediante un código JavaScript que creé para su implementación en Google Earth Engine (Gorelick et al. 2017) y el modelado se realizó utilizando Python, basándome en gran medida, en la biblioteca `scikit-learn` (Pedregosa et al. 2011).

## BIBLIOGRAFÍA

Akobeng, AK. (2005). Evidence-based child health. 1. Principles of evidence-based medicine. *Arch Dis Child* 2005;90:837–40. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1136/adc.2004.058222>

Alexander M. E. and Cruz, M. G. (2019). Fireline Intensity. In: Manzello S. L. (ed.). 2019. *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*. Springer Nature

Switzerland AG 2019. Recuperado de [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_52-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_52-1)

Artés, T., Oom, D., De Rigo, D., Durrant, T. H., Maianti, P., Libertà, G., & San-Miguel-Ayanz, J. (2019). A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behaviour. *Scientific data*, 6(1), 1-11. Recuperado de <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0312-2>

Byram, G. M. (1959). *Combustion of Forest Fuels*. In K. P. Davis (Ed.), *Forest Fire: Control and Use*. New York: McGraw Hill.

Bruhn, M., McKenzie, D. (2008). In Pursuit of Balance: Randomization in Practice in Development Field Experiments. Policy Research Working Paper; No. 4752. World Bank, Washington, DC. © World Bank. Recuperado de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/6910> License: CC BY 3.0 IGO

Cruz, M.G., Alexander, M.E. 2019. The 10% wind speed rule of thumb for estimating a wildfire's forward rate of spread in forests and shrublands. *Annals of Forest Science* 76, 44 (2019). Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0829-8>

Cheng, L., Li Yajun, Zhao Chang Hai, et al. (2004). The method of evaluating sub-pixel size and

- temperature of fire spot in AVHRR data. *J Appl Meteor Sci*, 2004, 15(3): 273-280.
- Evans, D. (2001). Hierarchy of evidence: a framework for ranking evidence evaluating healthcare interventions. *J Clin Nurs* 2003;12:77-84. 5 Last JM. A dictionary of epidemiology. New York: Oxford University Press, 2001.
- Gertler, Paul J., Sebastian Martinez, Patrick Premand, Laura B. Rawlings, and Christel M. J. Vermeersch. (2016). *Impact Evaluation in Practice*, second edition. Washington, DC: Inter-American Development Bank and World Bank. Recuperado de <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0779-4>
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D., Hoffmann, A. A., Humber, M., Hall, J.V. (2020). Collection 6 MODIS Burned Area Product User's Guide. NASA.
- Glennerster, R., and Takavarasha, K. (2013). *Running Randomized Evaluations: A Practical Guide*. Princeton University Press. Recuperado de <https://doi.org/10.2307/j.ctt4cgd52>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D, Moore, R., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, Volume 202, (2017), Pages 18-27, ISSN 0034-4257, Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Jolly, W. M., Butler, B. W., and Forthofer, J. (2009). Assessing topography and wind alignment for firefighter safety. USDA Forest Service, RMRS, Fire Sciences Laboratory, Missoula, MT. Paper presented at the Eighth Symposium on Fire and Forest Meteorology.
- Jolly, W.M.; Freeborn, P.H.; Page, W.G.; Butler, B.W. Severe Fire Danger Index: A Forecastable Metric to Inform Firefighter and Community Wildfire Risk Management. *Fire* (2019), 2, 47. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/fire2030047>
- Iacus, S. M., King, G. and Porro, G. (2011). "Multivariate Matching Methods that are Monotonic Imbalance Bounding." *Journal of the American Statistical Association* 106:345-361.
- King, Nielsen, (2019). Why Propensity Scores Should Not Be Used for Matching. *Political Analysis* (2019) DOI: 10.1017/pan.2019.11
- McGovern, DPB. (2001). Randomized controlled trials. In: McGovern DPB, Valori RM, Summerskill WSM, eds. *Key topics in evidence-based medicine*. Oxford: BIOS Scientific Publishers, 2001:26-9.
- Page, Wesley G.; Freeborn, Patrick H.; Butler, Bret W.; Jolly, W. Matt. (2019a). A review of US wildland firefighter entrapments: Trends, important environmental factors and research needs. *International Journal of Wildland Fire*. 28(8): 551-569.
- Page, Wesley G.; Freeborn, Patrick H.; Butler, Bret W.; Jolly, W. Matt. (2019b). A classification of US wildland firefighter entrapments based on coincident fuels, weather, and topography. *Fire*. 2: 52.
- Pedregosa, F., G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, É. Duchesnay. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. 12(85):2825-2830, 2011.
- Peterson, David & Wang, Junming & Ichoku, Charles & Hyer, Edward. (2010). Sub-Pixel Fractional Area of Wildfires from MODIS Observations: Retrieval, Validation, and Potential Applications. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Schlobohm, P.; Brain, J. Gaining an Understanding of the National Fire Danger Rating System; PMS 932; National Wildfire Coordinating Group, Fire Danger Working Team: Boise, ID, USA, (2002); p. 72.
- Scott, Joe H.; Thompson, Matthew P.; Calkin, David E. (2013). A wildfire risk assessment framework for land and resource management. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-315. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 83 p.
- Spybrook et al. (2011). Optimal Design Plus Empirical Evidence: Documentation for the "Optimal Design" Software.
- Stuart, E. A. (2010). "Matching Methods for Causal Inference: A Review and a Look Forward." *Statistical Science* 25(1):1-21.
- Suradhaniwar, S., Kar, S., Durbha, S.S., Jagarlapudi, A. (2021). Time Series Forecasting of Univariate Agrometeorological Data: A Comparative Performance Evaluation via One-Step and Multi-Step Ahead Forecasting Strategies. *Sensors* 2021, 21, 2430. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/s21072430>
- Tedim, F., Leone, V., Amraoui, M., Bouillon, C., Coughlan, M.R., Delogu, G.M., Fernandes, P.M., Ferreira, C., McCaffrey, S., McGee, T.K., Parente, J., Paton, D., Pereira, M.G., Ribeiro, L.M., Viegas, D.X., Xanthopoulos, G., (2018). Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts. *Fire* 2018, 1, 9. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/fire1010009>
- Tedim, F., Leone, V., McGee, T.K. (editors) (2020). *Extreme Wildfire Events and Disasters Root Causes and New Management Strategies*. Elsevier.

- Werth, Paul A.; Potter, Brian E.; Alexander, Martin E.; Clements, Craig B.; Cruz, Miguel G.; Finney, Mark A.; Forthofer, Jason M.; Goodrick, Scott L.; Hoffman, Chad; Jolly, W. Matt; McAllister, Sara S.; Ottmar, Roger D.; Parsons, Russell A. (2016). Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: volume 2 for fire behavior specialists, researchers, and meteorologists. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-891. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research slope Station. 258 p.
- Wilson, CC. (1977). Fatal and near-fatal forest fires: the common denominators. *The International Fire Chief* 43(9), 9–10, 12–15.



# EVALUACIÓN GENERAL DE LA DEMANDA SÍSMICA EN LA CIUDAD DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA Y ZONAS ADYACENTES

Oswaldo Aquiles Rosales Sadud<sup>1</sup>

## RESUMEN

Se realiza un análisis general de las estructuras geológicas de la faja Subandina Central, próxima a la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, identificando la misma como fuente principal de los movimientos telúricos que afectan en forma directa a la ciudad de Santa Cruz de la Sierra y sus alrededores. La caracterización de estas estructuras geológicas permitirá tener un mejor entendimiento de la magnitud de la demanda sísmica que generan las mismas y su efecto sobre los sedimentos Fanerozóicos depositados en la amplia cuenca geológica ubicada entre la faja del Subandino Boliviano al Oeste y el Cratón de Guaporé hacia el este (Escudo Brasileiro). Asimismo, se presenta un resumen de los registros de movimientos sísmicos generados en la mencionada faja del Subandino, con magnitud entre 2 y 7 en la escala de Richter y Mw, su ubicación tanto en superficie como en profundidad y el porcentaje de eventos sísmicos con foco superficial próximo a la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. (tabla 2). De igual forma, se busca estimar espectros de aceleraciones en superficie, mediante leyes de atenuación propuestas por el Pacific Earthquake Engineering Research

(PEER); utilizando las características geológicas y sísmicas de las fuentes antes mencionadas y las condiciones geotécnicas de la Ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Este tipo de análisis permite la selección de una serie de registros sísmicos obtenidos de la base mundial de datos que maneja el PEER. Estos registros están relacionados con los espectros antes mencionados y generados en base a la característica de la fuente y los suelos de la Ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Finalmente se presenta una propuesta de adquisición de información cualitativa-cuantitativa de los movimientos sísmicos mediante la relación que existe entre la escala de intensidades de Mercalli y la intensidad de aceleración del movimiento. Esto permitirá la conformación de mapas de isosistas que, en conjunto con las mediciones realizadas con las estaciones de medición de movimiento, permitirán un mejor entendimiento de la demanda sísmica en el Departamento de Santa Cruz.

**Keywords:** Subandino, Mandeyapecua, Sismos, Demanda Sísmica, fuente sismogénica, efecto de sitio, sismicidad, peligrosidad sísmica.

## INTRODUCCIÓN

Los movimientos sísmicos son eventos naturales causados principalmente por el desplazamiento en forma instantánea de una sección de la corteza capaz

<sup>1</sup> Jefe de la carrera de Ingeniería Civil, UPSA y Miembro del Consejo de Investigaciones de la ANCB-SC.

de acumular energía mecánica por fricción, debido a fuerzas compresivas, extensivas o de corte conocidas dentro de la Geología como procesos Orogénicos. La sección de la corteza donde se presenta el evento sísmico ocurre a lo largo de una falla geológica, las cuales son estructuras tectónicas que han sufrido una deformación, fracturación y desplazamiento de los materiales circundantes a la misma. Por lo tanto, la energía liberada por los movimientos sísmicos depende de la longitud de la falla y de sus características geométricas.

Estas estructuras tectónicas se deben a una serie de eventos geodinámicos internos que dieron la forma actual de la superficie terrestre y la estructura de las distintas rocas que forman la corteza. Estos eventos geológicos, de millones de años de duración, se presentaron en distintos Ciclos Geológicos que abarcaron fases de deposición sedimentaria y de orogénesis. La caracterización mecánica de estas estructuras tectónicas, permitirá estimar su potencial sísmico (demanda sísmica) mediante la aplicación de relaciones empíricas y analíticas que consideran parámetros físicos, mecánicos y geométricos para la estimación de los parámetros sísmicos de un movimiento fuerte en un punto de estudio, en este caso, la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

## ANTECEDENTES

El historial de registros sísmico en el Departamento de Santa Cruz, ha demostrado que los movimientos sísmicos de gran magnitud ( $\geq 5$  Mw), no se presentan con mucha frecuencia, registrando normalmente valores de magnitud entre 3 y 4. Es por tal motivo, que la sismicidad en esta región de Bolivia es calificada como baja a media, de acuerdo con las estimaciones realizadas por el Observatorio Sismológico de San Calixto, ubicado en la ciudad de La Paz - Bolivia. Sin embargo, existen reportes históricos, registrados por esta institución, de eventos sísmicos de magnitudes entre 5 y 6, percibidos en zonas aledañas a la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, en la faja del SubAndino y el sector de pie de monte de la planicie Chaco - Beniana, donde se encuentra ubicada la Ciudad de Santa Cruz de la Sierra. En ciertos casos, estos movimientos sísmicos no tuvieron consecuencias serias en las comunidades cercanas al evento. Sin embargo, alguno de ellos, causaron considerables destrozos en áreas pobladas próximas al epicentro del movimiento sísmico, como en el sismo de Postervalle en 1957 con una magnitud de 6,0 Mb y una intensidad de 8 MM y el sismo de Cabezas del 15 de octubre del 2013 con una magnitud de 5,0 Mb e intensidad de 7 MM, dejando viviendas dañadas. En base a los registros del

Observatorio de San Calixto, la región de los Valles, en el Departamento de Santa Cruz, ha registrado una serie de eventos sísmicos con daños materiales desde 1929. (BOLETÍN ESPECIAL N° 7-2018, "Sismo Provincia Vallegrande, Departamento de Santa Cruz, población de Postervalle", 2018).

En el año 2006, se presenta el borrador de la Norma Boliviana de Diseño Sismorresistente (NBDS2006), la misma que se encontraba en revisión hasta el año 2019. Posterior a esta normativa, un grupo de profesionales del medio y representantes de las sociedades de ingenieros de cada departamento de Bolivia, se reúnen para trabajar en el proyecto de adecuación de la NBDS2006. Producto de dichos encuentros, se presenta el proyecto denominado guía Boliviana de diseño sísmico (GBDS-2020); que, es presentado al Ministerio de Obras Públicas que aprueba el mismo en el año 2020. En este documento, se presenta un nuevo mapa de amenaza sísmica que divide a Bolivia en cuatro zonas, a diferencia de la división en seis zonas de la guía del año 2006, dando a la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, una mayor importancia referente al peligro sísmico que representa esa región del país.

Debido a la poca información de registro sísmicos con estaciones localizadas en el área que corresponde a la zona de peligro del Departamento de Santa Cruz, se considera que esta información es general y es necesario realizar un análisis específico de las fuentes sísmicas que se encuentran dentro del departamento de Santa Cruz y su efecto directo sobre las áreas de mayor interés, como son las de mayor población y mayor densidad de estructuras de gran altura. Por otro lado, la escasa presencia de estaciones de registro sísmico en el departamento de Santa Cruz, dificulta el seguimiento y evaluación de estos procesos naturales.

Se considera de importancia lograr dar una descripción general sobre la situación local de la sismicidad en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, en base a un análisis de propiedades de las estructuras geológicas, información geotécnica, registros de sismicidad y propiedades dinámicas de rocas y suelos; llegando a estimar una respuesta sísmica en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

## CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SITIO DE ESTUDIO – SUBANDINO SUR Y LLANURA CHACO – BENIANA

**Provincia geológica, Cadena Montañosa SubAndino Sur.** Ubicada hacia el oeste de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, está formada por una serie de serranías que siguen un rumbo hacia el norte y se encuentran separadas por elevaciones angostas y valles amplios que, en la mayoría de los casos, forman núcleos de sinclinales donde se hallan asentadas las provincias Caballero, Vallegrande, Florida, Ichilo y Cordillera, en su extremo occidental. La cadena montañosa está formada por rocas de origen sedimentario que se encuentran plegadas y dislocadas, con una estructura geológica interestratificada, compuesta por formaciones arenosas de espesor variable y de textura fina a gruesa, intercaladas con rocas de grano muy fino, como limonitas, arcillolitas y lutitas con diferentes grados de compactación.

La zona motivo del presente estudio (figura 1), está comprendida entre las coordenadas definidas (tabla 1). Dicha área pertenece a la unidad estructural del Subandino (SSA) y la Llanura Chaco - Beniana (ChB). Los sedimentos consolidados a poco consolidados que forman la unidad del Subandino y parte de la Llanura Chaco - Beniana, presentan una estructura geológica interestratificada, compuesta por formaciones arenosas de espesor variable y de textura fina a gruesa, intercaladas con rocas de grano muy fino, como limonitas, arcillolitas y lutitas con diferentes grados de compactación. Estas capas sedimentarias se encuentran fuertemente plegados formando amplios sinclinales y estrechos anticlinales cuya estructura coincide con la forma de las serranías del lugar. Este plegamiento fue producto de distintas fases de compresión (orogénesis), en todas las secuencias estratigráficas depositas previamente y que forman parte de la corteza continental en este sector (Zona esquizosfera), causando grandes fracturas y deformaciones en los sedimentos originales de estas unidades estructurales. La fractura de mayor extensión en nuestra región se presenta en el contacto entre la Faja Subandina y la Llanura Chaco - Beniana, que representa una falla inversa cuyo bloque Oeste yace por encima del bloque Este de estos rellenos sedimentarios. Esta fractura recibe el nombre de Mandeyapeuca que recorre el Subandino Sur, desde el sur del departamento de Tarija (Ciudad de Yacuiba), hasta el norte del Departamento de Santa Cruz (Ciudad de Yapacani, punto de inflexión del Subandino (Boomerang)). Presenta una dirección norte - sur paralela a la dirección de las estructuras

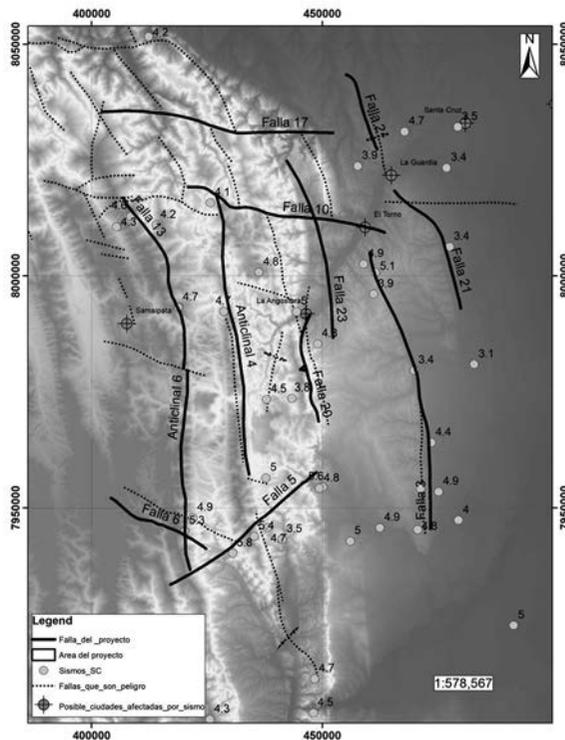
plegadas del Sub-Andino Boliviano y una longitud aproximada de 500 kilómetros, segmentada por fallas transversales. Sin embargo, existe un sistema de fracturas menores, longitudinales y transversales, que se concentran en la zona central del Subandino Sur, entre las poblaciones, es de Samaipata y La Guardia. Este sistema de fallas ha registrado una serie de movimientos sísmicos en el tiempo, ocasionando algunos daños en las poblaciones aledañas a su epicentro. Está compuesto por fallas de tipo inversa y de rumbo. Los planos de falla inversa presentan valores de ángulos de buzamiento que oscilan entre 20 grados y 55 grados y planos verticales para aquellas de tipo traslacional o de rumbo.

Tabla 1. Coordenadas del área de estudio

Punto	Coordenada X	Coordenada Y
P1	387239.96	8053311.23
P2	497347.18	8051623.60
P3	497769.05	7904603.10
P4	387661.83	7905024.98

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Mapa del área de estudio y sistemas de fallas consideradas en el presente estudio



Fuente: Elaboración propia.

Las principales características morfoestructurales que presenta el Subandino Sur, son las siguientes (*Compendio de Geología de Bolivia*, Suarez, 2000, Ref.2):

- Sistema de Fajas Plegadas con corrimiento más estrecho que el Subandino Norte.
- Acortamiento cortical sufrido durante las distintas fases compresivas, variable desde el sur (Ciudad de Yacuiba) hasta el norte (Zona de Yapacani) y oscila entre los 70 kilómetros y 150 kilómetros, cuyo valor menor se presenta en el sur con un valor aproximado de 70 kilómetros (30% de acortamiento en relación a su extensión original), el mismo que se va incrementando en forma paulatina hacia el norte con un valor aproximado de 140 kilómetros (50% de acortamiento en relación a su extensión original).
- Presenta un importante vulcanismo distensivo durante el Jurásico. Los bloques Este y Oeste se separan durante ese periodo.
- Los sedimentos continentales neógenos, depositados desde el inicio del Ciclo Andino II hasta finales del Terciario con espesores entre los 3.000 metros a 4.000 metros.
- Importante corrimiento que divide el Subandino Sur en dos fajas corridas y plegadas cuya parte occidental se caracteriza por pliegues de propagación de falla y por pliegues por flexión de falla y cuya parte oriental se caracteriza por pliegues de propagación de fallas y dúplex.
- Despegues principales localizados en las lutitas del Silúrico y del Devónico, formadas aproximadamente dentro del Ciclo Cordillerano, cuyo despegue basal tiene un ángulo aproximado de dos grados.
- Faja corrida del Subandino que representa un sistema de sobre corrimiento superficial con dos despegues principales, ubicados en las formaciones Kirusillas y los Monos. Es importante considerar que, en la cuenca de Antepaís y las Sierras adyacentes, las fallas cortan a través de la sección entera por encima de los despegues basales.

**Provincia geológica, Llanura Chaco – Beniana.** Esta región denominada Cuenca Aluvional (**Llanura Chaco - Beniana**), está asentada sobre una fosa tectónica amplia (Geosinclinal), rellena en su parte superior, por sedimentos aluviales no consolidados de edad Cuaternaria compuesto de arcilla, limo, arena, grava y

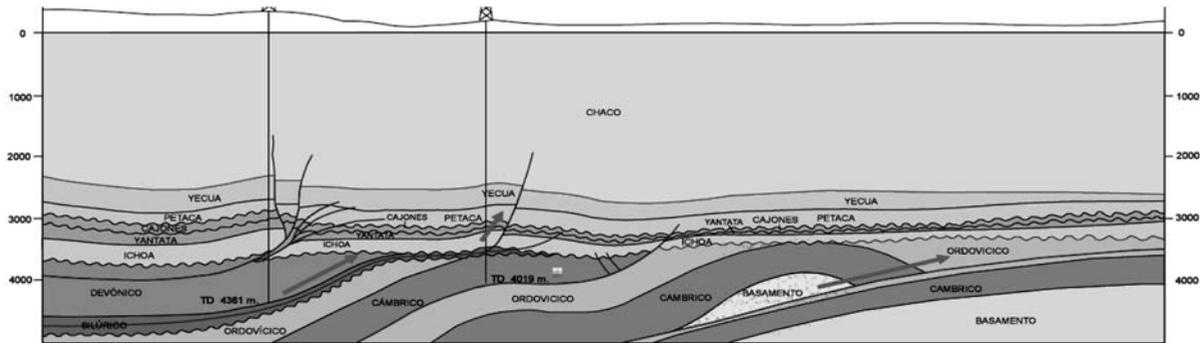
cantos rodados, producto de la erosión de las laderas montañosas. Los sedimentos Cuaternarios tienen una estratificación lenticular y yacen sobre sedimentos aluviales semi-pétreos del Chaco Superior e Inferior del sistema Terciario de edad Cenozoica y, estos, a su vez, descansan sobre sedimentos pétreos de edad Mesozoica y Paleozoica.

Los sedimentos aluviales del Grupo Chaco Superior son similares a los sedimentos del Cuaternario en cuanto a su composición granulométrica y a su estructura deposicional. El espesor de estos sedimentos no está totalmente definido ya que su variación espacial es poco explorada. Los sedimentos del Grupo Chaco inferior son de predominancia granulométrica más fina – arenas, limos y arcillas.

En este sector, se presentan grandes espesores de capas sedimentarias poco consolidadas a consolidadas, de aproximadamente 4.000 metros. En la base de estos depósitos sedimentarios, existe un cabalgamiento de capas del Cámbrico con nivel de despegue en el basamento y un bajo plegamiento de capas sedimentarias. Es este tipo de estructura deformada que, debido al esfuerzo compresivo que sufrieron, contienen en ciertos casos grandes cantidades de energía elástica almacenada la misma que puede ser liberada en forma paulatina mediante movimientos de magnitud reducida o en forma instantánea, bajo un único movimiento fuerte. Se muestra un esquema (figura2). Las características de estos tipos de estructuras definen, en cierta forma, el potencial sísmico de ese sector y su incidencia sobre la ciudad de Santa Cruz.

Se presenta un corte geológico tipo, de las estructuras geológicas y rellenos sedimentarios del sector de la Provincia geológica, Llanura Chaco – Beniana (figura 2).

Figura 2. Corte geológico de la sección de la llanura Chaco - Beniana en el sector del Boomerang del Subandino



Fuente: Revista técnica YPFB.

En base a las características que presenta la **Provincia geológica, Llanura Chaco – Beniana**, los estratos sedimentarios pocos consolidados (sedimentos de edad Cuaternaria y de la formación Chaco Superior), son categorizados como una posible **fente de amplificación sísmica** cuyo término técnico es conocido como el **Efecto de Sitio**.

### PARÁMETROS ESTRUCTURALES DE LAS FALLAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO Y ESTIMACIÓN DETERMINÍSTICA DE SUS PARÁMETROS DE MOVIMIENTO

En este estudio del sistema de fallas presente en el sector del Subandino Central y Sur, se seleccionó un grupo de fallas en función de la ocurrencia histórica de eventos de movimiento sísmico en su cercanía, su longitud y su distancia hacia la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, manteniendo una separación máxima entre la estructura geológica seleccionada y la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, de 150 kilómetros, considerada como distancia límite de incidencia hacia la ciudad mencionada.

Se identifican las fallas seleccionadas y sus características de longitud, distancia y magnitud asociada (figura 1 y tabla 2). Asimismo, se realiza la estimación de parámetros estructurales y de movimiento de estas estructuras geológicas mediante la aplicación de ecuaciones empíricas que se relacionan con los valores de magnitud sísmica y de distancia, con los valores de aceleración media horizontal en el terreno. Con el propósito de conocer el potencial sísmico de la zona de estudio, se realiza un cálculo de estos parámetros con los valores de magnitud de los datos de movimiento sísmico registrados en el área de estudio. Esta evaluación solo se realiza con el propósito de contar con información

básica inicial que permita tener una idea de los efectos de dichos movimientos del terreno y los parámetros geométricos y mecánicos que, posiblemente, se desarrollaron durante el movimiento de la falla.

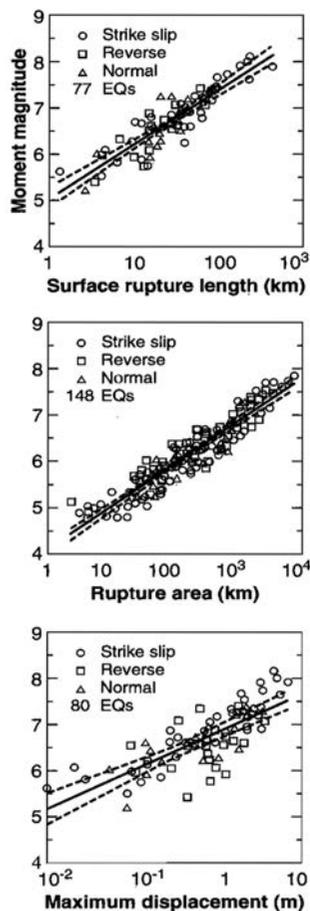
Estos parámetros fueron estimados utilizando relaciones empíricas propuestas en la bibliografía especializada: área de ruptura ( $A$ ), desplazamiento de la falla en el evento ( $D$ ), resistencia de material a lo largo de la falla ( $\mu$ ) y cálculo empírico de la magnitud de momento ( $M_w$ ). El valor calculado fue comparado con el valor medido por las estaciones sísmicas y publicado en la página del USGS con un propósito de ajuste o validación (figura 3). Se observa las correlaciones empleadas para determinar los valores geométricos antes mencionados de la falla en ruptura. De igual forma, se presentan las ecuaciones de atenuación utilizadas para estimar de la aceleración promedio horizontal del terreno (PHA). Se presentan los resultados obtenidos mediante el uso de las relaciones (tabla 3).

Tabla 2. Sistemas de fallas seleccionadas para el estudio

Nombre de Falla	Longitud Falla (m)	Mag. Mb (USGS)	Distancia a SCZ (km)
Falla 13	40.670	4,2-4,7	74,76
Falla 17	50.871	4,2	73,52
Falla 3	62.103	3,4-5,1	36,39
Falla 10	44.856	4,1-4,9	57,43
Falla 5	40.221	5,6	103,04
Falla 6	23.755	5,3	107,55
Falla 2	17.905	3,9	19,99
Falla 20	26.716	4,8	57,87
Falla 21	30.645	4	36,74
Falla 23	40.165	3,0-5,0	38,26
Anticlinal 4	61.374	4,7	58
Anticlinal 6	43.345	4,9-5,3	98

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Estimación de parámetros geométricos de la falla relacionado a la magnitud del evento sísmico



Fuente: Wells and Coppersmith, 1994.

## Relaciones de atenuación para la estimación de la aceleración horizontal promedio de superficie (PHA)

Estas son:

**Campbell (1981).** Utilizó datos mundiales para desarrollar una relación de atenuación para el PHA medio para sitios dentro de los 50 kilómetros de la ruptura de la falla, en terremotos de magnitud 5,0 a 7,7 (Kramer, 1996).

$$\ln \text{PHA}(g) = -4.141 + 0,868M - 1,09 \ln [R + 0,0606 \exp(0,7M)]$$

Ecuación 1

$$\sigma_{\ln \text{PHA}} = 0,37$$

donde:

M = magnitud local o magnitud de onda superficial para magnitudes menores o mayores que 6, respectivamente.

R = distancia más cercana a la ruptura de la falla en kilómetros.

La aceleración máxima se tomó en función de M y R solamente y  $\sigma_{\ln \text{PHA}}$  constante.

**Campbell and Bozorgnia (1994)** utilizan registros de aceleraciones mundiales para terremotos con magnitudes (Mw), entre 4,7 y 8,1. En base a esta información, presentan una ecuación más específica y compleja que la relación de 1981, con la incorporación de términos adicionales que reflejan las características de la fuente y del sitio (Kramer, 1996).

$$\ln \text{PHA}(\text{gals}) = -3,512 + 0,904M_w - 1,328 \ln^2(R^2 + [0,14 \exp(0,647M_w)]^2) + (1,125 - 0,1121 \ln R - 0,0957 M_w) F + (0,440 - 0,1711 \ln R) S_{SR} + (0,405 - 0,222 \ln R) S_{HR}$$

Ecuación 2

$$\sigma_{\ln \text{PHA}} = 0,889 - 0,0691M \leq 7,4$$

$$\sigma_{\ln \text{PHA}} = 0,38 M > 7,4$$

donde:

R = distancia más cercana (~60 kilómetros) a la ruptura sísmica en kilómetros (con valores mínimos de 7,3, 5,8, 3,5 y 3,0 kilómetros para magnitudes de 5,0; 5,5; 6,0 y 6,5, respectivamente); el término fuente, F,

toma valores de 0 para fallas de rumbo o trasversales y normal, y 1 para la falla inversa, inversa-oblicua y de rotura de corteza;  $S_{SR} = 1$  para sitios de roca blanda (depósitos sedimentarios de edad terciaria).  $S_{HR} = 1$  para sitios de roca dura (principalmente depósitos sedimentarios antiguos, roca metamórfica y roca cristalina) y  $SSR = SHR = 0$  para sitios de aluvién.

## SADIGH, CHANG, EGAN, MAKDISI Y YOUNGS (1997)

### (sismos de corteza superficial)

Caso 3: Depósitos Suelos Profundos

$$\ln(y) = C_1 + C_2 M - C_3 \ln(r_{rup} + C_4 e^{C_5 M}) + C_6 + C_7 (8,5 - M)^{2,5}$$

Ecuación 3

donde:

y = aceleración espectral (g)

$C_1 = -2,17$  para strike-slip,  $-1,92$  para reverse

$C_2 = 1,0$

$C_3 = 1,70$

$C_4 = 2,1863$

$C_5 = 0,32$

para  $M \leq 6,5$   $C_4 = 0,3825$ ,  $C_5 = 0,5882$

para  $M > 6,5$   $r_{rup}$  = distancia más cercana a la superficie de rotura

$C_6, C_7 = 0$ .

Del análisis de los resultados obtenidos (tabla 3), se observa que se requiere valores mayores de resistencia del material ( $\mu$ ), en las fallas de rumbo o trasversales en comparación a las fallas de tipo inversa para lograr el ajuste de la magnitud de momento ( $M_w$ ), estimada mediante ecuación, en correspondencia con el valor de magnitud medido y presentado en la base de datos de la USGS. Es lógico pensar que las fallas de rumbo o trasversales tengan un mayor valor de resistencia del material ( $\mu$ ) debido a que su plano de falla involucra una serie de capas de distinto valor de rigidez en relación con los planos de las fallas inversas. Sin embargo, es necesario contar con sensores de medición de desplazamiento y densidad en la red local de registro sísmico para afinar las estimaciones realizadas.

Pese a que la información sísmica y de medición de desplazamiento superficial de corteza, en nuestra región, es escasa, se considera que los valores de

área de ruptura (A), desplazamiento de la falla en el evento (D), resistencia de material a lo largo de la falla ( $\mu$ ), obtenidos en forma empírica, son aceptables en relación al movimiento sísmico que se generó; ya que no se observa o reporta, desplazamientos significativos en la corteza con modificación relevante de la topografía superficial de los sectores donde se produjo el evento.

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EVENTOS SÍSMICOS EN EL SUBANDINO CENTRAL PRÓXIMOS A LA CIUDAD DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA

Los movimientos sísmicos en el Subandino Central Boliviano están caracterizados por ser eventos telúricos que se generan en el interior de la corteza, denominados como sismos corticales, cuyo mecanismo principal de rotura está influenciado por el tipo de falla que se presenta, tipo inversa o de rumbo.

En base a los registros sísmicos, presentados por el observatorio de San Calixto, los sismos corticales, en este sector de estudio del Subandino Sur, oscilan entre los cero kilómetros y 70 kilómetros de profundidad hasta el sector del río Grande en Abapó. Sin embargo, se conoce que el espesor comprendido entre los primeros 30 kilómetros a 40 kilómetros de profundidad, dentro de la corteza, es capaz de generar terremotos debido a la suficiente rigidez que presentan los materiales que la conforman provocando una fractura frágil ante la aplicación incesante de esfuerzos horizontales debido al corrimiento de la corteza. Esta capa superficial es denominada como esquizósfera (Scholz, 1989. Ref 4) y representa una capa sismogénica.

En base al análisis realizado a los eventos sísmicos registrados por la USGS entre los años 1957 y 2021 y datos publicados por el Observatorio de San Calixto en el área objetivo de presente estudio, se observa que el 94% de los movimientos telúricos se encuentran dentro de los primeros 100 kilómetros de profundidad y solo 6% superior a esta valor, con una distribución de 71% para sismos generados en la esquizósfera (entre los cero kilómetros y 40 kilómetros de profundidad), un 23% entre los 40 kilómetros y 100 kilómetros de profundidad y, el 6% restante, son sismos con hipocentros mayores a los 100 kilómetros de profundidad los cuales son considerados como profundos. Se presentan los datos referentes a coordenadas, profundidad,

Tabla 3. Estimación de parámetros geométricos y mecánicos de las fuentes sísmicas seleccionadas en el momento de falla para la magnitud de movimiento registrado por el USGS

Nombre de falla	Tipo de falla	R (Dist. a la falla) (km)	Magnitud medida USGS	Magnitud momento (Mw)	Cálculo promedio teórico (l)		Estimado para ajuste de Mw	Cálculo promedio teórico (Arup)		Cálculo promedio teórico (D)		Cálculo de Mw		Aceleración horizontal promedio pico (PHA)		
					Longitud de la falla desplazada en el sismo (km) <i>Strike Slip</i>	Longitud de la falla desplazada en el sismo (km) <i>Reverse</i>		Área de ruptura (A) (km <sup>2</sup> ) <i>Strike Slip</i>	Área de ruptura (A) (km <sup>2</sup> ) <i>Reverse</i>	Desplazamiento max. De la superficie de falla (D) (m) <i>Strike Slip</i>	Desplazamiento max. De la superficie de falla (D) (m) <i>Reverse</i>	Momento Sísmico (Mo) dinas*cm	Magnitud momento (Mw)	PHA Campell 1981 (g)	PHA Campell and Bozorgnia 1994 (gals) (cm/seg <sup>2</sup> )	SADIGH, CHANG, EGAN, MAKDISI Y YOUNGS (1997)
Falla 2	Inversa	19.99	3.90 mb	3.90 Mw	--	0.40	700	--	0.679	--	0.19543	9.11211E+21	3.94	0.017	0.018	0.026
Falla 3	Inversa	36.69	3.40 mb	3.40 Mw	--	0.19	650	--	0.220	--	0.13996	1.9608E+21	3.49	0.006	0.005	0.007
			5.10 mb	5.14 Mw	--	2.40	1200	--	11.229	--	0.44826	5.92326E+23	5.15	0.026	0.022	0.035
			4.90 mb	4.90 Mw	--	1.69	1100	--	6.486	--	0.38107	2.66633E+23	4.92	0.021	0.017	0.028
			5.00 mb	5.00 Mw	--	1.95	1500	--	8.128	--	0.40738	4.87093E+23	5.09	0.023	0.019	0.031
Falla 5	Transversal o Rumbo	103.04	5.60 Mw	5.60 Mw	3.93	--	10500	41.687	--	0.05470	--	2.34806E+24	5.55	0.013	0.007	0.012
Falla 6	Transversal o Rumbo	107.55	5.30 mb	5.51 Mw	3.36	--	10500	34.453	--	0.04398	--	1.56027E+24	5.43	0.011	0.006	0.011
Falla 10	Transversal o Rumbo	57.43	4.10 mb	4.10 Mw	0.30	--	25000	1.862	--	0.00156	--	7.11968E+21	3.87	0.007	0.004	0.007
Falla 13	Inversa	74.76	4.90 mb	4.90 Mw	1.19	--	20000	9.772	--	0.01040	--	1.9932E+23	4.83	0.013	0.009	0.015
			4.20 mb	4.20 Mw	--	0.61	710	--	1.337	--	0.23878	2.22218E+22	4.20	0.005	0.003	0.005
			4.70 mb	4.70 Mw	--	1.26	900	--	4.130	--	0.33343	1.21552E+23	4.69	0.008	0.005	0.009
Falla 17	Transversal o Rumbo	73.52	4.20 mb	4.20 Mw	0.36	--	25000	2.291	--	0.00198	--	1.11035E+22	4.00	0.006	0.003	0.005
Falla 20	Inversa	57.87	4.80 mb	4.80 Mw	--	1.46	1000	--	5.176	--	0.35645	1.80934E+23	4.81	0.012	0.008	0.014
Falla 21	Inversa	36.74	3.40 mb	3.40 Mw	--	0.19	550	--	0.220	--	0.13996	1.65914E+21	3.45	0.006	0.005	0.007
Falla 23	Inversa	38.26	4.80 mb	4.80 Mw	--	1.46	980	--	5.176	--	0.35645	1.77316E+23	4.80	0.018	0.015	0.024
Antidinal 4	Inversa	58.00	4.70 mb	4.70 Mw	--	1.26	900	--	4.130	--	0.33343	1.21552E+23	4.69	0.011	0.007	0.012
Antidinal 6	Inversa	98.00	4.70 mb	4.70 Mw	--	1.26	900	--	4.130	--	0.33343	1.21552E+23	4.69	0.006	0.003	0.006

Tabla 4. Características de los eventos sísmicos en el área de estudio definido en la figura 1

Fecha y hora de registro	Lugar del evento sísmico	Profundidad (km)	Magnitud del evento sísmico	Tipo de Magnitud	Coordenada de los eventos sísmicos registrados		Distancia entre Santa Cruz Capital y el epicentro de cada sísmo. (km)
					Coordenada X	Coordenada Y	
2017-06-11T13:18:26.370Z	18km SW of Villa Yapacani, Bolivia	10	5,1	mb	400791	8060849.24	84,37
2010-01-23T09:40:30.790Z	Santa Cruz, Bolivia	10	5,1	mb	404167	8058597.33	80,46
2010-01-23T09:23:03.950Z	Santa Cruz, Bolivia	10	5,3	mb	405857	8060375.60	79,43
1957-12-28T14:36:43.000Z	Santa Cruz, Bolivia	15	6,1	mw	336254	8029938.39	144,50
1957-08-26T11:28:56.000Z	Santa Cruz, Bolivia	15	6,3	mw	415076	7918896.25	132,30
2004-07-19T02:57:29.780Z	Santa Cruz, Bolivia	17	4,7	mb	467889	8031141.05	13,08
1969-07-18T23:17:11.000Z	Santa Cruz, Bolivia	19	5,6	mw	450175	7954540.49	84,91
1988-04-27T19:12:31.900Z	Santa Cruz, Bolivia	20,4	4,8	mb	449437	7954206.61	85,49
2006-07-11T20:16:18.010Z	Santa Cruz, Bolivia	21,6	4,6	mb	472748	7894062.64	139,94
2013-10-21T19:53:59.320Z	34km NE of Abapo, Bolivia	32,11	4,8	mb	470710	7945322.23	89,02
2009-12-15T16:39:52.920Z	Santa Cruz, Bolivia	32,2	4,5	mb	453614	8062754.60	39,67
2002-04-25T10:34:14.090Z	Santa Cruz, Bolivia	33	4,1	mb	425766	8015759.51	57,81
2002-02-23T22:06:10.050Z	Santa Cruz, Bolivia	33	5,1	mb	461589	8000704.49	38,20
2001-09-30T13:09:49.190Z	Santa Cruz, Bolivia	33	3,4	mb	469982	7979587.04	55,24
2000-01-10T07:49:25.220Z	Santa Cruz, Bolivia	33	4,7	mb	438169	7945764.12	97,75
1985-03-22T14:02:46.980Z	Santa Cruz, Bolivia	33	5,4	mw	435326	7943873.61	100,70
1985-03-19T10:37:14.320Z	Santa Cruz, Bolivia	33	5	mb	437817	7956495.84	88,38
1985-03-19T10:28:36.460Z	Santa Cruz, Bolivia	33	5,8	mw	430592	7940205.40	106,14
1981-08-23T08:22:51.900Z	Santa Cruz, Bolivia	33	4,2	mb	386254	8111504.54	122,32
2010-01-23T18:49:06.760Z	Santa Cruz, Bolivia	33,2	4,2	mb	412370	8051664.15	70,63
2012-04-17T16:08:51.500Z	Santa Cruz, Bolivia	33,6	4,5	mb	407572	8056621.64	76,61
2009-10-17T00:06:49.280Z	Santa Cruz, Bolivia	33,9	4,9	mwc	462543	7945717.25	89,91
2014-06-28T10:58:23.670Z	18km NNE of Samaipata, Bolivia	34,53	4,2	mb	413999	8010998.08	70,48
2006-05-29T03:22:47.020Z	Santa Cruz, Bolivia	35	4,4	mb	473702	7964102.71	70,02
2017-10-06T04:59:34.460Z	41km WSW of Villa Yapacani, Bolivia	35,47	4,6	mb	374926	8056644.48	108,22
2015-12-21T16:21:05.190Z	5km ESE of Jorochito, Bolivia	35,49	4,9	mb	459035	8002546.98	38,01
2016-06-26T17:11:59.910Z	27km NNW of Comarapa, Bolivia	35,65	4,4	mb	330942	8044945.84	150,18
2014-06-28T13:24:03.130Z	14km NNE of Mairana, Bolivia	35,75	4,3	mb	405457	8010538.35	78,75
2014-06-28T10:49:52.530Z	17km NNE of Mairana, Bolivia	35,82	4,6	mb	408527	8012887.57	75,14
2014-07-18T08:33:36.590Z	14km SSW of Portachuelo, Bolivia	36,18	4,5	mb	451892	8068448.22	45,08
1979-02-12T02:03:25.600Z	Santa Cruz, Bolivia	38	5	mb	433392	8079293.53	65,65
2013-10-15T20:13:20.590Z	42km NNE of Abapo, Bolivia	38,2	5	mb	471372	7954185.79	80,13
2013-04-13T17:21:12.440Z	8km NNE of Warnes, Bolivia	39,5	4,6	mb	484920	8072980.24	39,43
2014-04-19T04:22:00.930Z	5km SSW of Abapo, Bolivia	39,68	4,7	mb	448409	7913098.07	124,92
2014-04-19T03:47:56.340Z	12km SSW of Abapo, Bolivia	40,32	4,5	mb	448135	7905716.90	132,13
2015-02-02T23:58:14.140Z	41km NE of Abapo, Bolivia	41,39	4	mb	479582	7947358.62	86,42
2013-10-15T20:15:50.730Z	43km NE of Abapo, Bolivia	43,18	4,9	mb	475300	7953505.30	80,45
2009-10-16T23:31:04.560Z	Santa Cruz, Bolivia	43,2	5	mb	456113	7942826.67	94,21
2004-01-07T11:01:39.370Z	Santa Cruz, Bolivia	45	4,5	mb	451774	8077685.81	52,58
2013-11-30T02:34:23.810Z	34km SSE of Abapo, Bolivia	46,24	4,1	mb	458796	7884210.94	151,16
2013-06-17T02:11:56.940Z	30km SSE of Abapo, Bolivia	49	4,2	mb	464967	7891172.61	143,47
1996-08-12T00:17:46.940Z	Santa Cruz, Bolivia	53,1	4,7	mb	418870	7993160.39	73,98
1973-09-27T12:36:20.500Z	Santa Cruz, Bolivia	57	5	mb	444471	7992254.52	55,10
1979-02-15T06:27:36.200Z	Santa Cruz, Bolivia	59	4,8	mb	449038	7985296.57	57,90
1993-12-05T06:47:13.330Z	Santa Cruz, Bolivia	66,1	3,9	mb	457731	8023709.34	25,08
1988-09-20T14:13:35.630Z	Santa Cruz, Bolivia	66,1	4,8	mb	436299	8000749.03	55,34
2002-01-27T18:24:57.180Z	Santa Cruz, Bolivia	66,5	4,7	mb	428711	7992313.78	66,50
2002-02-23T22:47:11.710Z	Santa Cruz, Bolivia	73,1	4,5	mb	437974	7973425.28	73,94
2004-04-25T18:01:48.190Z	Santa Cruz, Bolivia	595,9	3,8	mb	370868	8087292.38	122,18
2004-04-25T17:14:06.460Z	Santa Cruz, Bolivia	595,9	4,2	mb	374293	8083551.52	117,48
1990-02-27T09:28:54.160Z	Santa Cruz, Bolivia	601,4	5,9	mw	378644	8102498.93	123,04
2009-11-13T07:27:13.360Z	Santa Cruz, Bolivia	608	5,8	mwc	384021	8018656.24	97,86
11/6/2017	Postervalle, Santa Cruz - Bolivia	18,4	4,9	mi	422008	7947871.80	104,04
28/08/2018	Postervalle, Santa Cruz - Bolivia	15	5,3	mi	420233	7945033.00	107,38
10/5/2021	Prov. Florida, Santa Cruz	18	3,8	ml	443468	7973663.49	70,71
12/5/2020	La Guardia	5	3,1	ml	482981	7980857.82	52,97
26/03/2020	Prov Cordillera	21,3	3,5	ml	441342	7943229.29	98,73
10/5/2020	Prov. Vallegrande	26	4,3	ml	425671	7904334.89	140,65
29/06/2020	Prov. Vallegrande	35,2	4,8	ml	405486	7918960.93	137,26
30/06/2020	Santa Cruz, Bolivia	33,4	3,4	ml	477667	8006261.37	27,68
28/07/2020	Santa Cruz, Bolivia	28,3	3,4	ml	477012	8023298.62	11,11
12/10/2020	Ichilo	23,5	3,9	ml	408781	8071010.76	80,99
12/8/2019	Santa Cruz, Bolivia	45,3	3,5	ml	479439	8032152.08	2,06
17/08/2019	Ichilo	4,9	3,6	ml	422219	8084011.39	77,10
10/10/2018	Santa Cruz, Bolivia	31,8	3,9	ml	461175	7996056.81	42,47
11/6/2017	Ichilo	18,4	4,9	ml	412221	8061510.72	73,88

magnitud y ubicación de estos movimientos sísmicos analizados (tabla 4). Asimismo, se muestra el valor de la distancia en línea recta, desde el foco sísmico hasta el centro de la Ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Se presenta una relación entre la profundidad de cada evento telúrico y su distancia hasta la ciudad de Santa Cruz de la Sierra (figura 4). Los valores utilizados para este gráfico son presentados en forma porcentual (tablas 5 y 6) donde se muestra el porcentaje de los eventos sísmicos ocurridos en el sector de estudio, en función a una distancia de referencia. En esta tabla, se observa que el 17 % de los eventos ocurrieron a una distancia menor a los 50 kilómetros; el 55 % entre los 50 kilómetros y 100 kilómetros de distancia y, sólo el 29% es mayor a los 100 kilómetros. Los valores han sido obtenidos considerando la distancia de referencia desde el centro de la Ciudad de Santa Cruz de la Sierra hasta el epicentro del evento sísmico.

Del análisis realizado (tablas 4, 5 y 6 y figura 5), se considera que existe una probabilidad alta de que un movimiento sísmico de poca profundidad (sismo cortical), se presente dentro de la Esquizósfera con una distancia menor a los 100 kilómetros, desde su epicentro hasta el centro de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Este evento sísmico estaría en el rango de magnitud entre 3 y 5. Sin embargo, el problema no solo radica en la magnitud del sismo sino, en su distancia, profundidad y medio por el cual se propaga la onda sísmica.

Figura 4. Relación del foco sísmico en función a la distancia en línea recta que presenta hacia la Ciudad de Santa Cruz de la Sierra

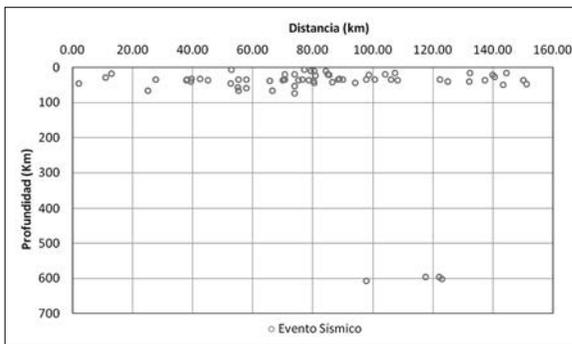


Tabla 5. Porcentajes de eventos sísmicos en función a la profundidad foco

Profundidad del sismo (Km)	%
Entre 0 - 40	71
entre 40 - 100	23
> 100	6

Tabla 6. Porcentajes de eventos sísmicos en relación a la distancia entre el epicentro y la ciudad de Santa Cruz de la Sierra

Distancia entre el epicentro y SCZ (Km)	%
Entre 0 - 50	17
entre 50 - 100	55
> 100	29

## EVALUACIÓN DE LAS ACELERACIONES EN SUPERFICIE EN BASE A MODELOS DE PREDICCIÓN DE MOVIMIENTO DEL SUELO (GMPE`s)

Se presenta una estimación de las aceleraciones mediante el uso de ecuaciones modelos de predicción de movimiento del suelo y la obtención de espectros de pseudo aceleración. Para la determinación de dicha información, se utilizan los métodos de predicción propuestos por Pacific Earthquake Research Center (PEER) que son: Abrahamson & Silva & Kamai 2014 (ASK14), Boore & Stewart & Seyhan & Atkinson 2014 (BSSA14), Campbell & Bozorgnia 2014 (CB14) y Chiou & Youngs 2014 (CY14). Se presentan los valores de aplicación de estos modelos de predicción (tabla 7).

Tabla 7. Resumen de los valores límites de aplicación de los modelos de predicción utilizados en el presente estudio

Límites de aplicación de los GMPEs		
GMPE	Parámetro	Rangos de aplicación del modelo
ASK14	$M_w$ (All FM)	$\geq 3,0 - \leq 8,5$
	R	$\geq 0 - \leq 300$
	$V_{530}$	$\geq 180 - \leq 1.000$
BSSA14	$M_w$ (SS)	$\geq 3,0 - \leq 8,5$
	$M_w$ (RS)	$\geq 3,0 - \leq 8,5$
	$M_w$ (NM)	$\geq 3,0 - \leq 7,0$
	$R_b$	$\geq 0 - \leq 400$
	$V_{530}$	$\geq 150 - \leq 1.500$
	$Z_{1,0}$	$\geq 0 - \leq 3$

CB14	$M_w$ (SS)	$\geq 3,3 - \leq 8,5$
	$M_w$ (RS)	$\geq 3,3 - \leq 8,0$
	$M_w$ (NM)	$\geq 3,3 - \leq 7,5$
	$R_{rup}$	$\geq 0 - \leq 300$
	$V_{s30}$	$\geq 150 - \leq 1.500$
	$Z_{2,5}$	$\geq 0 - \leq 10$
	$Z_{hyp}$	$\leq 0 - \leq 20$
	$Z_{tor}$	$\leq 0 - \leq 20$
CY14	dip	$\geq 15 - \leq 90$
	$M_w$ (SS)	$\geq 3,5 - \leq 8,5$
	$M_w$ (RS)	$\geq 3,5 - \leq 8,0$
	$M_w$ (NM)	$\geq 3,5 - \leq 8,0$
	$R_{rup}$	$\geq 0 - \leq 300$
	$V_{s30}$	$\geq 180 - \leq 1.500$
	$Z_{1,0}$	$\leq 20$
	$Z_{tor}$	$\geq 0 - \leq 10$

Mediante estos modelos de predicción, se obtuvo un espectro de pseudo-aceleraciones promedio que es utilizado como base para la estimación de un espectro de respuesta aplicando como principio, la metodología propuesta por el Dr. Jack Baker que propone que el espectro de pseudo-aceleraciones promedio se acerca al espectro de respuesta cuando se añade al mismo una cantidad igual al doble de la desviación estándar media calculada de los modelos de predicción antes mencionados. Se puede observar los espectros de respuestas obtenidos para cada estructura geológica considerada en el análisis, al aplicar la metodología propuesta por Baker (figura 6). Asimismo, se presentan los valores de aceleración versus el periodo para cada una de las gráficas antes mencionadas, en relación con las fallas estudiadas en el presente trabajo de investigación (tabla 9).

Para la confección de dichos espectros, mediante distintas leyes de atenuación, fue necesario obtener parámetros de las estructuras geológicas estudiadas como fuente sísmica y propiedades geotécnicas de los suelos del sitio de interés, en el análisis de las aceleraciones espectrales, la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Se presenta un resumen de los parámetros antes mencionados en relación con su estructura geológica (tabla 8). Es importante mencionar que la información geológica del área de estudio de libre acceso es escasa. Es por tal motivo que, algunos valores fueron estimados y colocados como constantes en función al tipo de falla estudiada. Se presenta una explicación

de los criterios adoptados para la determinación de los parámetros de entrada de los modelos de predicción del espectro de pseudoaceleraciones.

### Magnitud de Momento ( $M_w$ )

Este valor fue definido como un parámetro constante para las fallas bajo estudio, tomando un valor de 6,5  $M_w$ . Este valor fue seleccionado considerando como base, los valores típicos a nivel mundial de magnitud sísmica presentes en eventos sísmicos de corteza en puntos alejados de la zona de subducción y de intraplaca. Cabe mencionar que el objetivo de este estudio es conocer el comportamiento de las fuentes sísmicas en relación con parámetros típicos y no muy extremos que se necesitarían de fundamentación técnica específica para su validación como caso puntual. Se considera que este tipo de magnitud sísmica es probable en esta región del Subandino bajo la particularidad tectónica que presenta esta región del codo del Subandino. Asimismo, se tiene precedente de un evento sísmico de dicha magnitud ocurrido en la población de Aiquile, en el año de 1993.

### Distancia más corta entre la falla y el sitio de estudio $R_{rup}$

Se determinan a lo largo de la falla y se estima la distancia entre el centro de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra y cada uno de los puntos. Se selecciona la distancia menor hacia la fuente.

### Ángulo de buzamiento del plano de falla, (Dip (deg))

Para el dato de ángulo de buzamiento del plano de falla (Dip (deg)), se determinan las fallas de tipo inversa. Se estima un valor entre 30 grados y 55 grados de buzamiento de su plano, 30 grados para aquellas fallas inversas que están en de intersección entre el Subandino y la llanura Chaco – Beniana y 55 grados para aquellas fallas inversas que se encuentran en la zona de los valles del Subandino. Para fallas de rumbo se asigna un valor de 90 grados.

### Velocidad de onda de corte en los 30 metros de profundidad ( $V_{s30}$ )

Se define en base a la evaluación de estudios de SPT y CPT en distintos puntos de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Se considera un valor típico ya que sólo se requiere de un único valor, en el sitio de predicción, para ser utilizado en los modelos. Se muestra la tabla de clasificación de la geología superficial según el código de National Hazard Earthquake Reduction

Program (NEHRP, 2003) (figura 6), en función de características o condiciones generales del medio de transmisión y valores promedios de velocidades de ondas de corte Vs30. En un recuadro, se define el tipo de Clase de suelo que mejor describe los rellenos cuaternarios en la Ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

Figura 5. Clasificación de la geología superficial según el código NEHRP, 2003

NEHRP			
Clase de suelo	Características del suelo	RAnGo Vs30 (m/s)	Clase de suelo
A	Roca dura	Vs30>1.500	
B	Roca	760<Vs30≤1.500	S1
C	Suelo muy denso y roca suave	360<Vs30≤760	S2
D	Suelo firme a medio	180≤Vs30≤360	S3
E	Suelo blando	Vs30<180	S4

### Tipo de Falla Inversa o Norma FRV y FRN

Este parámetro define el tipo de falla a evaluar en la fuente. Se coloca 1 para el tipo de falla que corresponde. En caso de ser una falla de rumbo, ambos parámetros son 0.

### Ángulo de buzamiento del plano de falla (Dip)

Este ángulo, para toda estructura geológica, es variable y es complejo definir un valor único. Para fines estimativos y de caracterización general de las fuentes, se decide asignar un valor de 30 grados a las fuentes ubicadas en el sector de contacto entre el Subandino y la llanura y valores entre 50 grados - 55 grados a las fuentes ubicadas en la región de los valles del Subandino. Esta decisión se basa en reportes de proyectos publicados en revistas técnicas de YPF e investigadores independientes (referencias [1] y [7]).

### Espesor de relleno sedimentario (ZTOR)

Este parámetro es complejo de definir ya que la variación de espesor en los rellenos cuaternarios son variables. Sin embargo, los valores adoptados para las fuentes ubicadas en la región del pie de monte o la llanura Chaco - Beniana es de 500 metros. Este parámetro es estimado en base a las perforaciones para la extracción de agua subterránea en la Ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Para las fuentes en la región Subandina y fallas de rumbo, este valor es

nulo considerando el afloramiento de la estructura geológica.

### Profundidad al Hipocentro (Zhyp)

Se utiliza como parámetro de entrada, los valores de profundidad obtenidos donde se genera el evento sísmico, a partir de la base de datos de la USGS.

### Profundidad para la velocidad de la onda de corte de un kilómetro /segundo (Z1.0)

Fue definido en base al corte geológico (figura 3) seleccionando un valor de 1.000 metros de profundidad. Se parte del principio de que el denominado grupo Chaco (Terciario) está dividido en dos condiciones naturales de consolidación, el Chaco Superior, conformado por sedimentos poco consolidados y el Chaco Inferior, conformado por sedimentos más consolidados y finos. En base a lo antes indicado, se establece que el valor propuesto es aceptable.

### Profundidad para la velocidad de la onda de corte de 2,5 kilómetro /segundo (Z2.5)

Para este parámetro, se considera al grupo Chaco Inferior como capas que presentan una velocidad de 2.500 metros/segundos, ya que los mismos tienen su contacto con estratos de la formación Yecua (figura 3). Se selecciona una profundidad de 2.500 metros.

### Ancho de la ruptura (W)

Está relacionada con la porción de ancho del plano de falla que se desliza durante el evento sísmico. En el estudio se considera un valor de cuatro kilómetros para las fallas inversas y un valor correspondiente a toda la dimensión vertical del plano de falla para las fallas de rumbo o transversales, desde el punto de hipocentro hasta la superficie del terreno.

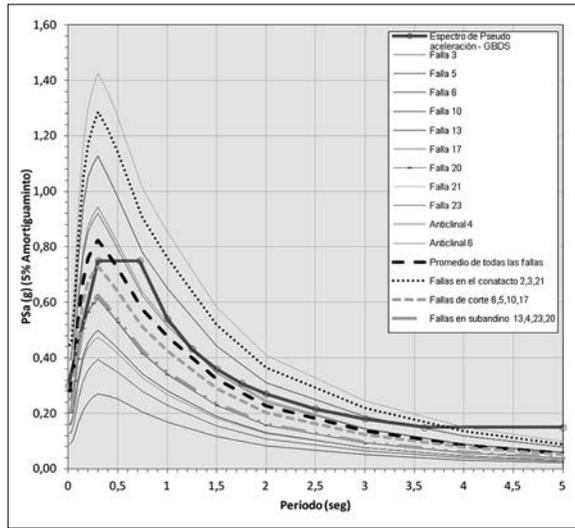
Tabla 8. Parámetros de las estructuras geológicas estudiadas como fuente sísmica y propiedades geotécnicas de los suelos del sitio de interés en el análisis

Nombre falla	Falla 2	Falla 3	Falla 5	Falla 6	Falla 10	Falla 13	Falla 17	Falla 20	Falla 21	Falla 23	Anticlinal 4	Anticlinal 6
Tipo de Falla	Inversa	Inversa	Rumbo	Rumbo	Rumbo	Inversa	Rumbo	Inversa	Inversa	Inversa	Inversa	Inversa
Mw	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
RRUP (km)	20	37	85	108	29	71	29	58	22	38	58	70
RJB (km)	20	37	85	108	29	71	29	58	22	38	58	70
RX (km)	-20	-37	-85	-108	-29	-71	-29	-58	-22	-38	-58	-70
Ry0 (km)	0	14	50	3	5	0	25	25	0	0	0	40
VS30 (m/sec)	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260
FRV	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0
FNM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dip (deg)	30	30	90	90	90	50	90	30	30	30	55	55
ZTOR (km)	0,5	0,5	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0	0
ZHYP (km)	17	35	20	15	35	35	30	57	33,4	31	66	15
Z1.0 (km)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Z2.5 (km)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
W (km)	4	4	20	15	35	4	30	4	4	4	4	4

Tabla 9. Valores de aceleración vs el periodo para cada una de las gráficas de espectro de pseudoaceleración estimado

	Falla 2	Falla 3	Falla 5	Falla 6	Falla 10	Falla 13	Falla 17	Falla 20	Falla 21	Falla 23	Anticlinal 4	Anticlinal 6
T (s)	Psa Median + 2.σ for 5% damping											
0,01	0,52564	0,31780	0,12793	0,08747	0,39076	0,16198	0,39076	0,20259	0,49652	0,30996	0,20079	0,15719
0,02	0,52749	0,31891	0,12834	0,09128	0,39209	0,16217	0,39243	0,20291	0,49815	0,31103	0,20140	0,15767
0,03	0,54250	0,33015	0,13302	0,09382	0,40715	0,16807	0,40715	0,21058	0,51256	0,32206	0,20875	0,16334
0,05	0,61805	0,38090	0,15355	0,10578	0,46979	0,19401	0,46979	0,24378	0,58225	0,37176	0,24174	0,19044
0,075	0,78830	0,49542	0,19821	0,13258	0,60477	0,25289	0,60477	0,31842	0,74552	0,48378	0,31585	0,24803
0,1	0,96493	0,61612	0,24645	0,16388	0,74336	0,31638	0,74336	0,39805	0,91692	0,60191	0,39491	0,30899
0,15	1,21281	0,78344	0,31538	0,21009	0,94169	0,40447	0,94169	0,50782	1,15961	0,76552	0,50382	0,39170
0,2	1,35300	0,87236	0,35547	0,23920	1,05017	0,45336	1,05017	0,56668	1,29794	0,85232	0,56210	0,43571
0,25	1,42890	0,91484	0,37806	0,25751	1,09637	0,48067	1,09637	0,59701	1,37172	0,89376	0,59187	0,45959
0,3	1,48437	0,94307	0,39326	0,26971	1,12652	0,49904	1,12652	0,61682	1,42756	0,92118	0,61144	0,47389
0,4	1,42404	0,87986	0,37184	0,26333	1,05496	0,46801	1,05496	0,57511	1,35788	0,85900	0,57016	0,44792
0,5	1,33247	0,81138	0,34791	0,25139	0,97927	0,43345	0,97927	0,53056	1,26610	0,79193	0,52614	0,41585
0,75	1,06576	0,63767	0,27935	0,20534	0,77861	0,34263	0,77861	0,41720	1,01130	0,62216	0,41404	0,32782
1	0,90138	0,52741	0,22866	0,16912	0,64994	0,27991	0,64994	0,34156	0,85305	0,51416	0,33916	0,26762
1,5	0,61838	0,35575	0,15603	0,11749	0,44223	0,18913	0,44223	0,23013	0,58232	0,34670	0,22871	0,18183
2	0,43917	0,24638	0,10798	0,08271	0,31069	0,12983	0,31069	0,15820	0,40891	0,23997	0,15732	0,12684
3	0,26353	0,14658	0,06551	0,05046	0,18878	0,07717	0,18878	0,09396	0,24482	0,14274	0,09374	0,07576
4	0,16355	0,09012	0,04109	0,03224	0,11827	0,04746	0,11827	0,05777	0,15047	0,08775	0,05774	0,04747
5	0,10883	0,05960	0,02738	0,02165	0,07920	0,03130	0,07920	0,03813	0,09963	0,05803	0,03815	0,03160
7,5	0,04737	0,02663	0,01267	0,01008	0,03521	0,01432	0,03521	0,01732	0,04359	0,02596	0,01735	0,01444
10	0,02411	0,01372	0,00670	0,00533	0,01822	0,00748	0,01822	0,00901	0,02229	0,01338	0,00903	0,00750

Figura 6. Espectros de respuestas de pseudoaceleraciones estimados en base a los parámetros de las estructuras geológicas definidas como fuente sísmica



Se observa que el promedio de los resultados de espectros de respuesta obtenidos es compatible con el espectro de respuesta obtenido de la Guía Boliviana de Diseño Sismorresistente (GBDS) (figura 6).

Al realizar un análisis de promedios por grupo de fallas en relación a su ubicación (Subandino y Contacto con la Llanura) y tipo de falla (Falla de corte), se observa que las fallas ubicadas en el Subandino presentan un espectro de respuesta por debajo del estipulado en la GBDS; aquellas fallas en la zona de contacto presenta un espectro de respuesta mayor en relación al definido en la GBDS y, por último, el grupo de fallas de corte tiene un espectro de respuesta compatible con el propuesto por la GBDS para la zona de Santa Cruz. Cabe mencionar que las fallas incluidas en el grupo de fallas en el contacto, se encuentran a una distancia menor a 40 kilómetros.

### REGISTROS SÍSMICOS RELACIONADOS A LOS ESPECTROS OBTENIDOS

Con el propósito de obtener información relacionada con la selección de señales sísmicas a ser utilizadas en un análisis estructural, se presenta una base de datos de estaciones con registros de aceleraciones correspondientes a tres de los espectros de respuesta antes obtenidos y seleccionados en base a su ubicación (contacto entre el Subandino y la llanura o Subandino zona de los valles y tipo de falla (inversa o rumbo).

Tabla 10. Registro de estaciones con aceleraciones ajustadas (espectro de respuesta de la falla 2 - en el contacto)

Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb(km)	Rrup(km)	Vs30(m/s)	H1 Acc. File Name	H2 Acc. File Name
0,5	Northern Calif-03	1954	Ferndale City Hall	6,5	strike slip	26,72	27,02	219,31	NCALIF_FH_H-FRN044.AT2	NCALIF_FH_H-FRN314.AT2
0,4	Parkfield	1966	Cholame - Shandon Array #8	6,19	strike slip	12,9	12,9	256,82	PARKF_C08050.AT2	PARKF_C08320.AT2
0,6	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #4	5,74	strike slip	4,79	5,7	221,78	COYOTELK_G04270.AT2	COYOTELK_G04360.AT2
0,4	Victoria, Mexico	1980	Chihuahua	6,33	strike slip	18,53	18,96	242,05	VICT_CHI102.AT2	VICT_CHI192.AT2
0,3	Westmorland	1981	Brawley Airport	5,9	strike slip	15,28	15,41	208,71	WESMORL_BRA225.AT2	WESMORL_BRA315.AT2
0,5	Westmorland	1981	Salton Sea Wildlife Refuge	5,9	strike slip	7,57	7,83	191,14	WESMORL_WLF225.AT2	WESMORL_WLF315.AT2
0,7	Coalinga-01	1983	Parkfield - Fault Zone 1	6,36	Reverse	41,04	41,99	178,27	COALINGA_H_H-COW000.AT2	COALINGA_H_H-COW090.AT2
1,5	Coalinga-01	1983	Parkfield - Fault Zone 14	6,36	Reverse	28,11	29,48	246,07	COALINGA_H_H-Z14000.AT2	COALINGA_H_H-Z14090.AT2
0,7	Coalinga-01	1983	Parkfield - Fault Zone 3	6,36	Reverse	36,14	37,22	211,74	COALINGA_H_H-COH000.AT2	COALINGA_H_H-COH090.AT2
0,3	Coalinga-01	1983	Parkfield - Gold Hill 1W	6,36	Reverse	35,04	36,15	214,43	COALINGA_H_H-PG1000.AT2	COALINGA_H_H-PG1090.AT2
0,8	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #4	6,19	strike slip	11,53	11,54	221,78	MORGAN_G04270.AT2	MORGAN_G04360.AT2
0,3	Superstition Hills-01	1987	Imperial Valley Wildlife Liquefaction Array	6,22	strike slip	17,59	17,59	179	SUPER_A_A-IVW090.AT2	SUPER_A_A-IVW360.AT2
0,4	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY101	6,2	Reverse	24,4	25,3	258,89	CHICHI_03_CHY101N.AT2	CHICHI_03_CHY101E.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	CHY015	6,2	strike slip	50,02	50,04	228,66	CHICHI_04_CHY015N.AT2	CHICHI_04_CHY015W.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	CHY047	6,2	strike slip	38,59	38,62	169,52	CHICHI_04_CHY047N.AT2	CHICHI_04_CHY047W.AT2
0,4	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	CHY101	6,2	strike slip	21,62	21,67	258,89	CHICHI_04_CHY101N.AT2	CHICHI_04_CHY101E.AT2
0,4	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY015	6,3	Reverse	66,13	66,88	228,66	CHICHI_06_CHY015N.AT2	CHICHI_06_CHY015W.AT2
0,3	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY032	6,3	Reverse	64,25	65,02	192,71	CHICHI_06_CHY032N.AT2	CHICHI_06_CHY032E.AT2
0,5	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY036	6,3	Reverse	45,1	46,19	233,14	CHICHI_06_CHY036N.AT2	CHICHI_06_CHY036E.AT2
0,3	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY037	6,3	Reverse	52,75	53,69	212,14	CHICHI_06_CHY037N.AT2	CHICHI_06_CHY037E.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY039	6,3	Reverse	61,46	62,26	201,21	CHICHI_06_CHY039N.AT2	CHICHI_06_CHY039E.AT2
0,4	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY047	6,3	Reverse	53,54	54,47	169,52	CHICHI_06_CHY047N.AT2	CHICHI_06_CHY047W.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY076	6,3	Reverse	69,66	70,37	169,84	CHICHI_06_CHY076N.AT2	CHICHI_06_CHY076E.AT2
0,3	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY082	6,3	Reverse	60,95	61,76	193,69	CHICHI_06_CHY082N.AT2	CHICHI_06_CHY082E.AT2
0,5	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY101	6,3	Reverse	34,55	35,97	258,89	CHICHI_06_CHY101N.AT2	CHICHI_06_CHY101E.AT2
0,3	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY002	6,3	Reverse	49,27	50,27	235,13	CHICHI_06_CHY002N.AT2	CHICHI_06_CHY002W.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY008	6,3	Reverse	70,03	70,74	210,73	CHICHI_06_CHY008N.AT2	CHICHI_06_CHY008W.AT2
0,7	Christchurch, New Zealand	2011	Kaiapoi North School	6,2	Reverse Oblique	17,86	17,87	255	CCHURCH_KP0CN15E.AT2	CCHURCH_KP0CS75E.AT2
0,4	Christchurch, New Zealand	2011	Styx Mill Transfer Station	6,2	Reverse Oblique	11,24	11,25	247,5	CCHURCH_SMTCN88W.AT2	CCHURCH_SMTCS02W.AT2
0,2	Christchurch, New Zealand	2011	TPLC	6,2	Reverse Oblique	16,6	16,61	249,28	CCHURCH_TPLCN27W.AT2	CCHURCH_TPLCS63W.AT2

Figura 7. Espectros de respuesta

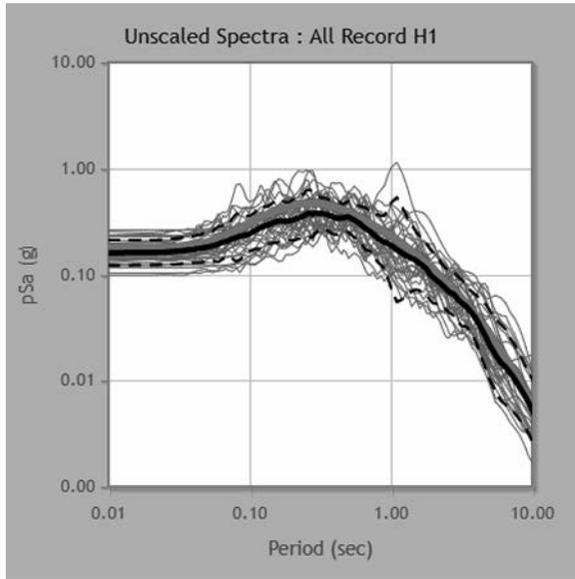


Tabla 11. Registro de estaciones con aceleraciones ajustadas (espectro de respuesta de la falla 10 - Falla de corte)

Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb(km)	Rrup(km)	Vs30(m/s)	H1 Acc. File Name	H2 Acc. File Name
0,4	Victoria, Mexico	1980	Chihuahua	6,33	strike slip	18,53	18,96	242,05	VICT_CHI102.AT2	VICT_CHI192.AT2
0,3	Westmorland	1981	Brawley Airport	5,9	strike slip	15,28	15,41	208,71	WESMORL_BRA225.AT2	WESMORL_BRA315.AT2
0,5	Westmorland	1981	Salton Sea Wildlife Refuge	5,9	strike slip	7,57	7,83	191,14	WESMORL_WLF225.AT2	WESMORL_WLF315.AT2
0,2	Coalinga-01	1983	Parkfield - Cholame 2WA	6,36	Reverse	43,83	44,72	173,02	COALINGA_H_H-CO2000.AT2	COALINGA_H_H-CO2090.AT2
0,7	Coalinga-01	1983	Parkfield - Fault Zone 1	6,36	Reverse	41,04	41,99	178,27	COALINGA_H_H-COW000.AT2	COALINGA_H_H-COW090.AT2
0,7	Coalinga-01	1983	Parkfield - Fault Zone 3	6,36	Reverse	36,14	37,22	211,74	COALINGA_H_H-COH000.AT2	COALINGA_H_H-COH090.AT2
0,3	Coalinga-01	1983	Parkfield - Gold Hill 1W	6,36	Reverse	35,04	36,15	214,43	COALINGA_H_H-PG1000.AT2	COALINGA_H_H-PG1090.AT2
0,8	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #4	6,19	strike slip	11,53	11,54	221,78	MORGAN_G04270.AT2	MORGAN_G04360.AT2
0,3	Superstition Hills-01	1987	Imperial Valley Wildlife Liquefaction Array	6,22	strike slip	17,59	17,59	179	SUPER.A_A-IVW090.AT2	SUPER.A_A-IVW360.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	CHY047	6,2	strike slip	38,59	38,62	169,52	CHICHI.04_CHY047N.AT2	CHICHI.04_CHY047W.AT2
0,4	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	CHY101	6,2	strike slip	21,62	21,67	258,89	CHICHI.04_CHY101N.AT2	CHICHI.04_CHY101E.AT2
0,4	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY015	6,3	Reverse	66,13	66,88	228,66	CHICHI.06_CHY015N.AT2	CHICHI.06_CHY015W.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY026	6,3	Reverse	49,64	50,64	226,01	CHICHI.06_CHY026N.AT2	CHICHI.06_CHY026E.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY027	6,3	Reverse	66,07	66,82	210,01	CHICHI.06_CHY027N.AT2	CHICHI.06_CHY027E.AT2
0,3	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY030	6,3	Reverse	44,17	45,29	204,71	CHICHI.06_CHY030N.AT2	CHICHI.06_CHY030E.AT2
0,3	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY032	6,3	Reverse	64,25	65,02	192,71	CHICHI.06_CHY032N.AT2	CHICHI.06_CHY032E.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY033	6,3	Reverse	72,92	73,61	197,63	CHICHI.06_CHY033N.AT2	CHICHI.06_CHY033E.AT2
0,5	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY036	6,3	Reverse	45,1	46,19	233,14	CHICHI.06_CHY036N.AT2	CHICHI.06_CHY036E.AT2
0,3	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY037	6,3	Reverse	52,75	53,69	212,14	CHICHI.06_CHY037N.AT2	CHICHI.06_CHY037E.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY039	6,3	Reverse	61,46	62,26	201,21	CHICHI.06_CHY039N.AT2	CHICHI.06_CHY039E.AT2
0,4	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY047	6,3	Reverse	53,54	54,47	169,52	CHICHI.06_CHY047N.AT2	CHICHI.06_CHY047W.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY076	6,3	Reverse	69,66	70,37	169,84	CHICHI.06_CHY076N.AT2	CHICHI.06_CHY076E.AT2
0,3	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY082	6,3	Reverse	60,95	61,76	193,69	CHICHI.06_CHY082N.AT2	CHICHI.06_CHY082E.AT2
0,5	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY101	6,3	Reverse	34,55	35,97	258,89	CHICHI.06_CHY101N.AT2	CHICHI.06_CHY101E.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	TCU141	6,3	Reverse	44,62	45,72	223,04	CHICHI.06_TCU141N.AT2	CHICHI.06_TCU141W.AT2
0,3	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY002	6,3	Reverse	49,27	50,27	235,13	CHICHI.06_CHY002N.AT2	CHICHI.06_CHY002W.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY008	6,3	Reverse	70,03	70,74	210,73	CHICHI.06_CHY008N.AT2	CHICHI.06_CHY008W.AT2
0,7	Christchurch, New Zealand	2011	Kaiapoi North School	6,2	Reverse Oblique	17,86	17,87	255	CCHURCH_KPOCN15E.AT2	CCHURCH_KPOCS75E.AT2
0,2	Christchurch, New Zealand	2011	SLRC	6,2	Reverse Oblique	31,81	31,81	249,28	CCHURCH_SLRCS28E.AT2	CCHURCH_SLRCS62W.AT2
0,2	Christchurch, New Zealand	2011	TPLC	6,2	Reverse Oblique	16,6	16,61	249,28	CCHURCH_TPLCN27W.AT2	CCHURCH_TPLCS63W.AT2

Figura 8. Espectros de respuesta

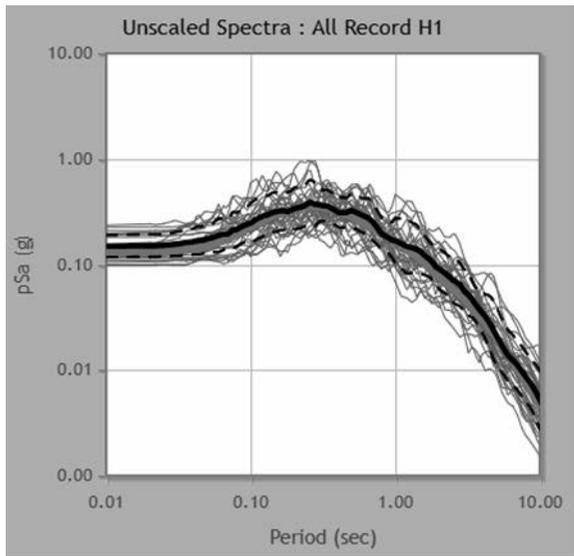
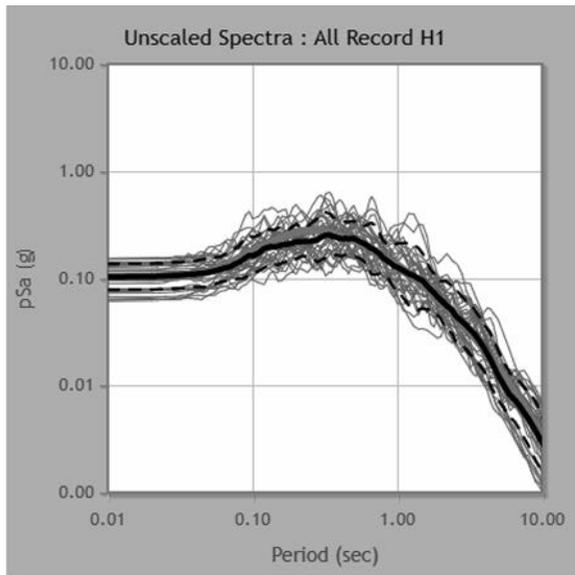


Tabla 12. Registro de estaciones con aceleraciones ajustadas (espectro de respuesta de la falla 23 - falla en el Subandino)

Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb(km)	Rrup(km)	Vs30(m/s)	H1 Acc. File Name	H2 Acc. File Name
0,1	Point Mugu	1973	Port Hueneeme	5,65	Reverse	15,48	17,71	248,98	PTMUGU_PHN180.AT2	PTMUGU_PHN270.AT2
0,1	Friuli, Italy-01	1976	Codroipo	6,5	Reverse	33,32	33,4	249,28	FRIULI.A_A-COD000.AT2	FRIULI.A_A-COD270.AT2
0,2	Coalinga-01	1983	Parkfield - Cholame 2WA	6,36	Reverse	43,83	44,72	173,02	COALINGA.H_H-C02000.AT2	COALINGA.H_H-C02090.AT2
0,2	Coalinga-01	1983	Parkfield - Cholame 3W	6,36	Reverse	44,82	45,7	230,57	COALINGA.H_H-C03000.AT2	COALINGA.H_H-C03090.AT2
0,7	Coalinga-01	1983	Parkfield - Fault Zone 3	6,36	Reverse	36,14	37,22	211,74	COALINGA.H_H-COH000.AT2	COALINGA.H_H-COH090.AT2
0,3	Coalinga-01	1983	Parkfield - Gold Hill 1W	6,36	Reverse	35,04	36,15	214,43	COALINGA.H_H-PG1000.AT2	COALINGA.H_H-PG1090.AT2
0,1	Morgan Hill	1984	Hollister Differential Array #3	6,19	strike slip	26,42	26,43	215,54	MORGAN_HD3255.AT2	MORGAN_HD3345.AT2
0,2	Hollister-04	1986	Hollister Differential Array #3	5,45	strike slip	13,11	14,11	215,54	HOLLISTR_D-HD3255.AT2	HOLLISTR_D-HD3345.AT2
0,3	Superstition Hills-01	1987	Imperial Valley Wildlife Liquefaction Array	6,22	strike slip	17,59	17,59	179	SUPER.A_A-IVW090.AT2	SUPER.A_A-IVW360.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-05	1999	CHY015	6,2	Reverse	77,6	81,71	228,66	CHICHI.05_CHY015N.AT2	CHICHI.05_CHY015W.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-05	1999	CHY090	6,2	Reverse	99,14	102,39	180,33	CHICHI.05_CHY090N.AT2	CHICHI.05_CHY090E.AT2
0,4	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY015	6,3	Reverse	66,13	66,88	228,66	CHICHI.06_CHY015N.AT2	CHICHI.06_CHY015W.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY026	6,3	Reverse	49,64	50,64	226,01	CHICHI.06_CHY026N.AT2	CHICHI.06_CHY026E.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY027	6,3	Reverse	66,07	66,82	210,01	CHICHI.06_CHY027N.AT2	CHICHI.06_CHY027E.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY033	6,3	Reverse	72,92	73,61	197,63	CHICHI.06_CHY033N.AT2	CHICHI.06_CHY033E.AT2
0,5	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY036	6,3	Reverse	45,1	46,19	233,14	CHICHI.06_CHY036N.AT2	CHICHI.06_CHY036E.AT2
0,3	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY037	6,3	Reverse	52,75	53,69	212,14	CHICHI.06_CHY037N.AT2	CHICHI.06_CHY037E.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY039	6,3	Reverse	61,46	62,26	201,21	CHICHI.06_CHY039N.AT2	CHICHI.06_CHY039E.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY054	6,3	Reverse	76,99	77,63	172,1	CHICHI.06_CHY054N.AT2	CHICHI.06_CHY054E.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY055	6,3	Reverse	82,76	83,36	225,77	CHICHI.06_CHY055N.AT2	CHICHI.06_CHY055W.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY076	6,3	Reverse	69,66	70,37	169,84	CHICHI.06_CHY076N.AT2	CHICHI.06_CHY076E.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY090	6,3	Reverse	87,26	87,84	180,33	CHICHI.06_CHY090N.AT2	CHICHI.06_CHY090E.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY092	6,3	Reverse	42,77	43,93	253,72	CHICHI.06_CHY092N.AT2	CHICHI.06_CHY092W.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY093	6,3	Reverse	76,89	77,54	190,49	CHICHI.06_CHY093N.AT2	CHICHI.06_CHY093W.AT2
0,1	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY094	6,3	Reverse	58,8	59,65	221,92	CHICHI.06_CHY094N.AT2	CHICHI.06_CHY094W.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY107	6,3	Reverse	79,2	79,83	175,68	CHICHI.06_CHY107N.AT2	CHICHI.06_CHY107W.AT2
0,2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	CHY008	6,3	Reverse	70,03	70,74	210,73	CHICHI.06_CHY008N.AT2	CHICHI.06_CHY008W.AT2
0,3	Parkfield-02, CA	2004	Parkfield - Fault Zone 4	6	strike slip	0,73	2,65	220,75	PARK2004_Z04090.AT2	PARK2004_Z04360.AT2
0,2	Christchurch, New Zealand	2011	SLRC	6,2	Reverse Oblique	31,81	31,81	249,28	CCHURCH_SLRCS28E.AT2	CCHURCH_SLRCS62W.AT2
0,2	Christchurch, New Zealand	2011	TPLC	6,2	Reverse Oblique	16,6	16,61	249,28	CCHURCH_TPLCN27W.AT2	CCHURCH_TPLCS63W.AT2

Figura 9. Espectros de respuesta



## PROPUESTA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DE INTENSIDADES

Con el propósito de tener un conocimiento del efecto sísmico que generan estas zonas de fractura en la región Subandina y parte de llanura Chaco – Beniana, se propone la implantación de un formulario de recopilación de información cualitativa que se denomina **“Centro de recopilación de datos de Movimientos Sísmicos”**. Esta información, permitirá tener información cualitativa sobre el efecto del movimiento fuerte en distintos puntos de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra y alrededores y su efecto sobre las estructuras, debido a que el formulario presenta una serie de preguntas relacionadas con la escala de intensidad de Mercalli que fácilmente puede ser correlacionado empíricamente con el parámetro de intensidad de aceleración.

El formulario está compuesto en dos secciones donde, en forma general, se solicita al habitante llenar sus datos de ubicación, tipo de estructura y descripción de su experiencia durante el evento sísmico. Se presenta una vista del formulario y las preguntas que contiene (figura 10).

La información adquirida es utilizada para la confección de planos de isosistas (curvas de igual intensidad), que permita lograr una distribución espacial del efecto del movimiento, considerando el tipo de edificación, altura de la edificación, zona de la ciudad y característica geotécnica, apoyado por información adicional referente a cada una de las

situaciones antes expuestas. Se presenta un gráfico de información de intensidades mediante un mapa de isosistas para el sismo de Peloponeso, Grecia, en 1965 (figura 11).

Figura 10. Formulario de adquisición de información cualitativa del efecto de movimiento fuerte en el Departamento de Santa Cruz

**Correo electrónico**  
Este dato permitirá al Instituto enviar información referente procedimientos a seguir durante un evento sísmico y lugares donde acudir en situación de emergencia en su zona.

Tu respuesta \_\_\_\_\_

**Municipio al que pertenece \***

Tu respuesta \_\_\_\_\_

**Dirección de su domicilio (Barrio, calle y número de casa). En caso de vivir fuera del municipio de Santa Cruz, colocar los datos correspondiente a su municipio. "Es muy importante que sea preciso en esta respuesta." \***  
Puede ingresar la información que se encuentra en el aviso de cobranza de Luz, Agua o teléfono o acceder a la siguiente dirección web para conseguir la información:  
<http://gub.ubana.gub.uy/santacruz.qob.bo/gub.ubana/>

Tu respuesta \_\_\_\_\_

**¿A qué distrito pertenece?. En caso de vivir fuera del municipio de Santa Cruz, colocar el número de distrito correspondiente a su municipio. "Es muy importante que sea preciso en esta respuesta."**  
Puede ingresar la información que se encuentra en el aviso de cobranza de Luz, Agua o teléfono o ingresar a la siguiente dirección web para ubicar el distrito al que pertenece:  
<http://gub.ubana.gub.uy/santacruz.qob.bo/indicacion-territorial/distrito-municipal.nba?mostrar=distrito-municipal-1>

Tu respuesta \_\_\_\_\_

Sección 2 de 2

**Por favor responda las siguientes preguntas con la mayor sinceridad posible**

Descripción (opcional)

**Especifique la fecha de ocurrencia del evento sísmico \***

Mes, día, año

Hora

**¿En que nivel del edificio se encontraba cuando sintió el movimiento sísmico? \***  
En caso de ser planta baja, por favor escribir PB

Texto de respuesta corta \_\_\_\_\_

**Podría explicar brevemente, qué observó o sintió en el lugar que se encontraba durante el evento sísmico?**  
Ejemplo: Rajaduras en la pared, movimiento de muebles, mareo, etc.

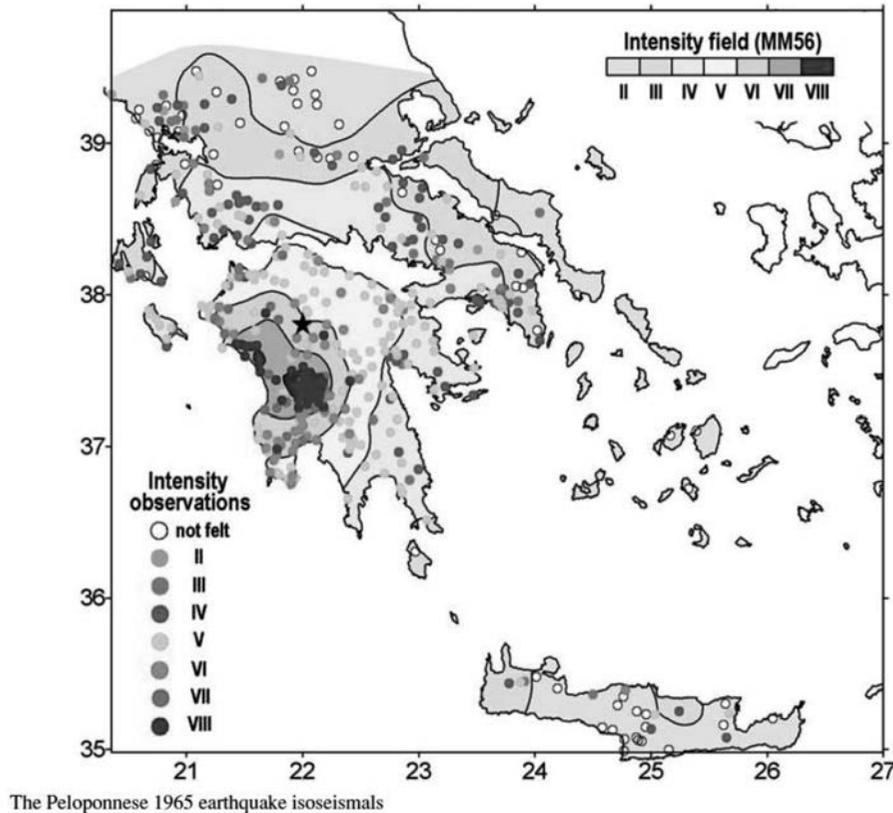
Texto de respuesta larga \_\_\_\_\_

**¿Cuál de estas situaciones describe mejor su percepción del evento sísmico? \***

- I.- Imperceptible para la mayoría excepto en condiciones favorables
- II.- Perceptible solo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicada...
- III.- Perceptible por algunas personas dentro de los edificios, especialmente en pisos altos. Muchos no lo ...
- IV.- Perceptible por la mayoría de personas dentro de los edificios, por pocas personas en el exterior duran...
- V.- Sacudida sentida casi por todo el país o zona y algunas piezas de vajilla o cristales de ventanas se rom...
- VI.- Sacudida sentida por todo el país o zona. Algunos muebles pesados cambian de sitio y provoca daños...
- VII.- Ponerse de pie es difícil. Muebles dañados. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y co...
- VIII.- Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien const...
- IX.- Pánico generalizado. Daños considerables en estructuras especializadas, paredes fuera de plomo. Gra...
- X.- Algunas estructuras de madera bien construidas quedan destruidas. La mayoría de las estructuras de ...
- XI.- Pocas estructuras de mampostería, si las hubiera, permanecen en pie. Puentes destruidos. Vías ferrov...
- XII.- Destrucción total con pocos supervivientes. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas que...

ESCALA DE MERCALLI		
NIVEL	ACELERACIÓN (ga)	DESCRIPCIÓN
I	<5	No percibido o percibido por algunas personas en pisos superiores de edificios y en condición de reposo en forma de ruido o pequeña vibración, casi imperceptible.
II	5-10	Percibido débilmente por personas al interior de viviendas y en situación de reposo. Personas que realizan actividades o se encuentran al exterior no lo perciben. Las lámparas colgantes no llegan a oscilar. Por la noche, pocas personas despiertan.
III	10-20	Percibido ligeramente por muchas personas al interior de viviendas. Traqueteo de puertas y ventanas y leve oscilación de lámparas colgantes. Por la noche, muchas personas despiertan.
IV	20-40	Percibido levemente por todas las personas al interior de viviendas y por algunas en el exterior, incluyendo por las que se encuentran al interior de vehículos detenidos. Las lámparas colgantes suelen oscilar moderadamente, sin embargo, ningún objeto cae.
V	40-80	Percibido moderadamente por casi todas las personas, incluyendo por las que transitan al exterior. Personas al interior de vehículos en movimiento podrían no percibirlo. La gente se asusta y siente una leve sensación de mareo, las lámparas colgantes oscilan fuertemente y algunos objetos livianos caen. Viviendas vulnerables o de material rústico pueden sufrir pequeñas rajaduras en sus paredes.
VI	80-160	Percibido fuertemente por todas las personas. Muchos objetos livianos caen, los muebles y electrodomésticos se desplazan unos centímetros; sin embargo, aun es posible mantenerse de pie. También es percibido por personas al interior de vehículos en movimiento.
VII	160-320	Percibido muy fuerte por todos, dificultando a las personas mantenerse de pie. Muchos objetos caen, algunos muebles y electrodomésticos pueden voltearse y se producen daños moderados en viviendas de buen diseño. Las viviendas vulnerables o de material rústico colapsan.
VIII	320-640	Percibido severamente. Mantenerse en pie es muy difícil al igual que conducir un vehículo. Todos los objetos caen, los muebles y electrodomésticos se voltean y se producen importantes daños en viviendas de buen diseño mientras que las vulnerables o de material rústico colapsan en su totalidad.
IX	640-1280	Percibido violentamente. Mantenerse en pie es imposible. Casi todas las viviendas colapsan y la mayor parte de la ciudad queda en ruinas.
X	1280-2560	Percibido de forma extrema. Personas tiradas al suelo o empujadas de un lugar a otro por el sismo. Las estructuras de madera quedan destruidas y se producen curvaturas en las rieles ferroviarias. La ciudad queda en ruinas.
XI	2560-5120	Percibido de forma extrema. Casi nada queda en pie. Las rieles ferroviarias presentan grandes curvaturas.
XII	>5120	Percibido de forma extrema. Destrucción total, nada queda en pie. Los objetos saltan al aire y se producen grandes cambios en el paisaje.

Figura 11. Mapa de isosistas obtenido mediante la información cualitativa proporcionada por los pobladores después del evento



Fuente: Isosiesmal maps drawing by the kriging method, Z. Schenkova *et al.*

## CONCLUSIONES

La estructura geológica en el área de estudio se encuentra plegada y fracturada por una serie de fallas de tipo longitudinales (Corte) e inversas de considerable extensión, con rumbo norte - sur y se encuentran segmentadas por fallas con dirección casi Este - Oeste. El mecanismo de rotura de estas fallas inversas es influenciado por esfuerzos de compresión, cuyo mecanismo de rotura genera sismos superficiales con la probabilidad alta de presentarse eventos sísmicos de gran magnitud, con predominio de ondas de corte vertical (Ondas SV) y de compresión (Ondas P). El comportamiento de este sistema de fractura frente a los desplazamientos de corteza es actualmente inexplorado en esta región de Bolivia.

Bolivia cuenta con una limitada red de estaciones sísmicas y no posee ningún tipo de estación de monitoreo de movimiento fuerte en la zona de estudio, lo cual dificulta tener un conocimiento acertado de la demanda sísmica de la región y

contrastar las estimaciones teóricas de los parámetros de movimiento.

No se cuenta con información suficiente para definir exactamente el efecto que podría presentar la geología del lugar del área de estudio (estructuras geológicas y estratigrafía local), frente a un evento sísmico con suficiente energía para propagarse desde la región del Subandino (Cadena Montañosa) hacia la región de la Cuenca Aluvial (**Ilanura Chaco - Beniana**) donde se encuentra asentada la Ciudad de Santa Cruz de la Sierra y cuyo efecto de amplificación sísmica es probable.

En base al análisis realizado a los eventos sísmicos registrados (USGS) entre los años 1957 y 2021 y datos publicados por el Observatorio de San Calixto en el área objetivo del presente estudio, se establece que el 94% de los movimientos telúricos se encuentran dentro de los primeros 100 kilómetros de profundidad y sólo el 6% es superior a esta valor; con una distribución de 71% para sismos generados en la esquizósfera (0

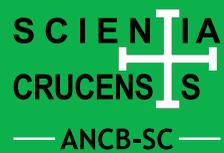
kilómetros - 40 kilómetros de profundidad), un 23% entre 40 kilómetros y 100 kilómetros de profundidad y, el 6% restante, son sismos con hipocentros mayores a los 100 kilómetros de profundidad que son considerados como profundos

Mediante la metodología propuesta por el Dr. Jack Baker se observa, que el espectro de pseudo-aceleraciones promedio se acerca al espectro de respuesta cuando se añade al mismo una cantidad igual al doble de la desviación estándar media calculada de todos los modelos de predicción antes mencionados. Es importante mencionar que, esta modalidad de predicción del espectro de respuesta, puede ser ajustada en base a la información que se obtenga de registros físicos de movimientos fuertes registrados por una red de monitoreo sísmico.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ahlfeld, F.E (1972). *Geología de Bolivia, Enciclopedia Boliviana*, La Paz, Bolivia.
- [2] Brooks, B.A (2011),. *Orogenic – Wedge deformation and potential for great earthquakes in the central Andean backarc*, Nature Geoscience.
- [3] Herraíz, S.M (1996). *Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros*, CISMID, Lima, Perú.
- [4] Krame, S (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall.
- [5] Observatorio de San Calixto (2010), *Revistas técnicas*, La Paz, Bolivia.
- [6] PEER (2021). Ground Motion Data Base, ngawest2.berkeley.edu.
- [7] Suárez, R.S (2000). *Compendio de Geología de Bolivia*, Revista Técnica de Yacimiento Petrolíferos Fiscales Bolivianos, Vol. 18.





**ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS DE BOLIVIA-DEPARTAMENTAL SANTA CRUZ (ANCB-SC)**

Av. Paraguá y 4to. Anillo | Tel.: +591 (3) 346 4000 int. 285 | [gastonmejia@upsa.edu.bo](mailto:gastonmejia@upsa.edu.bo)

Santa Cruz de la Sierra - Bolivia