

IV.- Discusión

A lo largo del presente trabajo, he presentado un modelo que permite estimar la concentración de metano en una acumulación de hidratos y su densidad energética asociada. He presentado una herramienta para poder responder estas interrogantes (con cierta aproximación a la realidad física), contando con evidencias visibles de acumulaciones de hidratos en secciones sísmicas como únicas observaciones directas.

Los valores medios de la concentración de metano, en los puntos seleccionados dentro de la acumulación de hidratos identificada en la sección sísmica, superaron el 90%, como fue sugerido por Francisco Rocha (Comunicación Personal, 2009).

La variabilidad de la fracción de metano, es resultado de varios factores, entre los cuales destacan la profundidad a la acumulación de hidratos, su espesor, la temperatura en el fondo del cuerpo de agua, el número de ensayos realizados en la simulación de Monte Carlo, el rango para los valores de entrada y en menor medida, el tipo de distribución.

La ventaja de aplicar y construir el mismo modelo en dos ambientes o entornos de cómputo distintos, radica en poder cotejar la confiabilidad de los resultados obtenidos. El modelo fue elaborado en *Crystal Ball*[®] originalmente y reportado en Lerche y Noeth (2003). El realizar una versión análoga en MATLAB[®], posibilita corroborar que los resultados dependen principalmente de la eficacia y precisión en el análisis del problema de estimación de composición de hidratos (ecuaciones, variables involucradas en el problema, entorno físico y geológico, etcétera), y no en el funcionamiento particular de la herramienta de cálculo que se decida usar.

Aunque el modelo de *estimación de la composición de hidratos de gas con sismología de exploración*, restringe el problema a unas cuantas variables físicas y numéricas, su flexibilidad permite aplicarlo a distintos ejemplos con resultados convincentes y confiables (semejantes entre distintas plataformas de cálculo), con un mínimo de recursos necesarios.

El etano fue elegido como segundo gas en la mezcla, en aras de aprovechar el desarrollo previo de Lerche y Noeth (2003). La escasez de documentación detallada, sobre distintos gases de interés, como huéspedes en hidratos, alentó aún más a preservar la elección de la mezcla metano – etano como huésped.

Por otro lado, la abundancia del gas metano y de otros hidrocarburos ligeros como el etano, en el ambiente de formación de hidratos y por tanto como potencial gas huésped (Lerche y Noeth, 2003), junto con extensos estudios de exploración en zonas de acumulación de hidratos, da mayor soporte a la elección de los dos gases.

IV.1.- Análisis de los valores calculados

El ajuste de las funciones de distribución teóricas sobre los histogramas de la fracción de metano es aceptable (figura 40). Para el presente trabajo se realizaron solo 5000 ensayos de Monte Carlo en *Crystal Ball*[®] y 10000 en *MATLAB*[®].

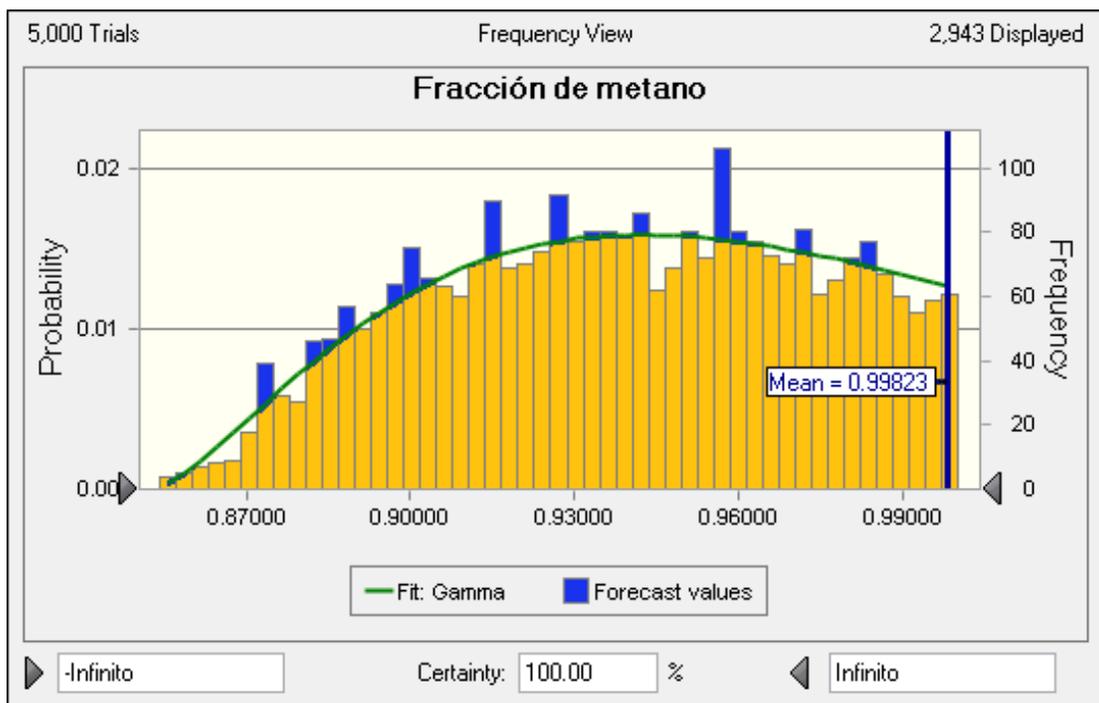


Figura 40. Histograma de la fracción de metano para el objetivo A. La curva verde representa la distribución de probabilidad que mejor ajustó al espacio de los datos en el histograma. El área bajo la curva aparece en amarillo.

Los histogramas de la fracción de metano y la densidad energética, junto con los otros valores de salida, contienen un número de muestras menor (o iguales en el mejor de los casos) al número de ensayos, puesto que hay combinaciones de valores de entrada que no cumplen. El aumento del número de ensayos produjo mejoras incipientes en la precisión de los resultados, a cambio de un costo computacional excesivo.

Además, es importante aclarar que el aumento en el número de los ensayos mejora el ajuste de los datos a la curva teórica de probabilidad y la precisión, pero no su representatividad o verosimilitud. Los resultados que aquí se reportan en los ejemplos 1 y 2, fueron comparados y cotejados con información previa, reportada en Lerche y Noeth (2003).

Los valores de densidad energética resultaron altos, pues rondan el 10% del equivalente de gas natural licuado con fracciones de metano superiores al 90%. Del capítulo II y de acuerdo a Hardage (2007), la densidad de energía es una función de la porosidad Φ y de la saturación de hidratos en el espacio poroso. Si consideramos una porosidad $\Phi = 0.5$, en sedimentos poco consolidados, una saturación de hidratos $C_{hg} = 0.5$ y una fracción de metano f_m como huésped, la ecuación es:

$$E_{hg} = f_m * (0.42 * 0.5 * 0.5) * E_{GNL} \quad (25)$$

Para evaluar la acumulación de hidratos presentada en este trabajo tomemos el objetivo con la menor fracción de metano, que es el A. La media de la fracción de metano, es de 0.99 aproximadamente (99%) para el objetivo A, cuyo tirante de agua es $Z_w \approx 1442$ (m). La ecuación (25) queda:

$$E_{hg} = (0.99) * (0.42 * 0.5 * 0.5) * E_{GNL} \quad (26a)$$

$$E_{hg} = (0.104) E_{GNL} \quad (26b)$$

Dado que E_{hg} y E_{GNL} son cantidades que representan la densidad de energía por unidad de volumen. El volumen de hidratos que produciría igual cantidad de energía (proveniente solo del metano) que un volumen de gas natural licuado es:

$$E_{hg}/0.104 = E_{GNL} \quad (27)$$

$$9.62 E_{hg} \approx E_{GNL} \quad (28)$$

Por lo tanto 9.62 volúmenes de hidratos tienen el mismo potencial energético que un volumen igual de gas natural licuado, con una fracción de metano del 99%, 50% de porosidad en el sedimento de la zona de estabilidad y una saturación de hidratos del 50%.

IV.2.- Análisis de dispersión de valores de gradiente geotérmico contra parámetros de curvas de equilibrio

Si conocemos con suficiente detalle la curva de equilibrio de fases hidrato-agua+gas, la acumulación de hidratos en sí misma puede sugerir el campo valores de temperatura dentro de sí misma y el espacio de valores de gradiente geotérmico factibles. La media de los histogramas de gradiente geotérmico se aproximó considerablemente, a los valores reportados por algunos trabajos (Dai et al., 2004) para el caso del Golfo de México [$\sim 2-3(^{\circ}\text{C}/100\text{m})$].

Por el contrario si carecemos de datos de la composición de los hidratos, los papeles se invierten. El conjunto de valores del gradiente geotérmico se convierten en una pieza clave para calcular un conjunto de curvas de equilibrio posibles. El rango de los gradientes puede ser restringido junto (y como consecuencia, los parámetros de las curvas de equilibrio), basándose en los valores reportados en la literatura.

Existen además otros medios para la restricción de los rangos de los valores de entrada y salida del modelo. Cada histograma expresa la frecuencia de ocurrencia de valores solución que cumplen las condiciones del modelo para un número finito de ensayos. Por esta razón, aunque los ensayos de Monte Carlo son aleatorios

(teóricamente), el espacio de valores solución posible para cada variable, tiene una tendencia central que puede ser aprovechada para restringir su rango.

Para muestra, en la figura 41, presento el histograma de la fracción de metano para el objetivo A, después de restringir los rangos de valores de entrada para b -de acuerdo al histograma de frecuencias elaborado en MATLAB.

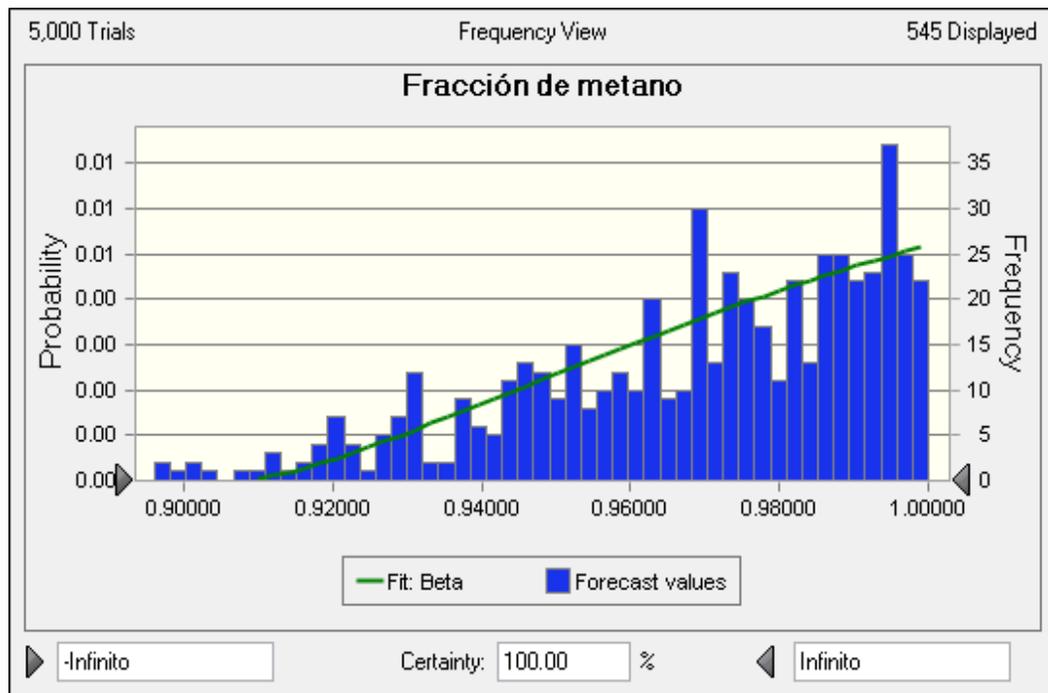


Figura 46. Histograma de frecuencias de valores de fracción de metano para el objetivo A, con un rango modificado para b . El nuevo rango $b=(0.05,0.12; \mu=0.085)$, fue elegido seleccionando los dos intervalos de valores modales que se presentan en el histograma de frecuencias del parámetro b . Comparando con la simulación con el rango convencional de b , existe un aumento de 1 a 4%, en la media de la fracción de metano estimada, que no aparece marcada pues su valor es de aproximadamente 103% de metano. Aunque el valor es totalmente erróneo, la validez de la gráfica radica en que el cambio de la media fue mínimo respecto del valor estimado con el rango inicial de b .

Aunque la fracción de metano difiere de la calculada con los rangos iniciales de b , está dentro del rango de valores aceptables. Por esta razón comprobé que es posible modificar el rango de los valores de entrada basándose en sus histogramas. Pese a que durante los cálculos en los objetivos A y B, los rangos de variación de

b y c son arbitrarios -y pueden ser tan grandes como el usuario quiera-, existe una tendencia dictada por las ecuaciones que constituyen el modelo que limitan el rango a un intervalo de valores posibles –figuras 42a y b.

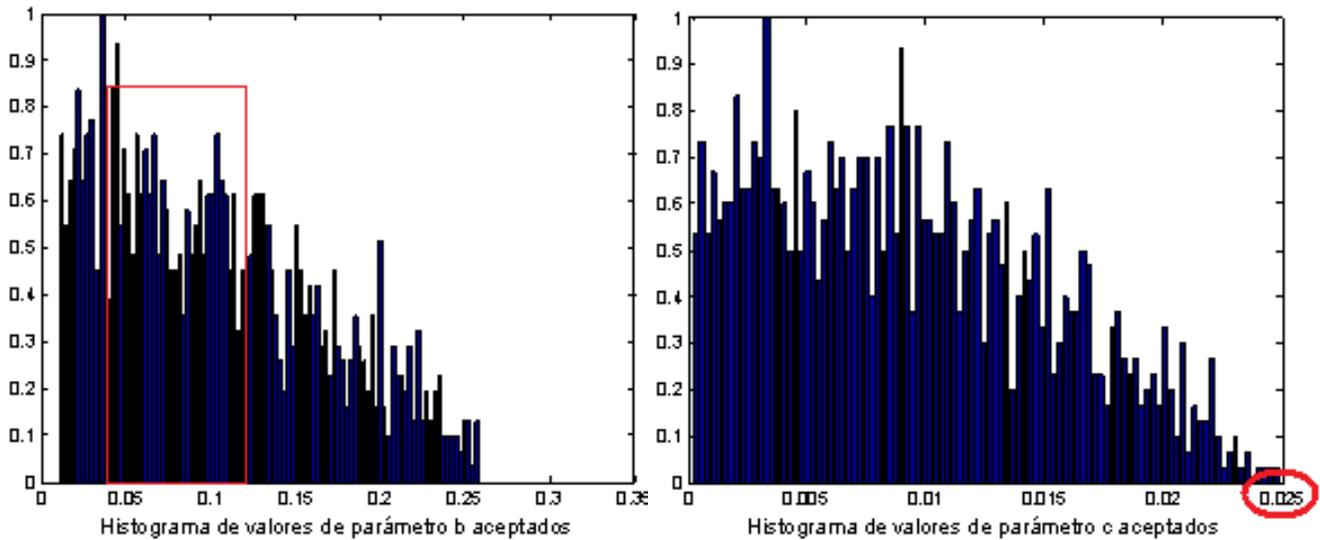


Figura 42a. Izquierda. Dos intervalos modales (valores encerrados en el rectángulo rojo) del parámetro b para el objetivo A fueron utilizados para poder modificar el rango de valores de entrada por las simulaciones en Crystal Ball. **Figura 42b. Derecha.** El óvalo rojo en la esquina inferior derecha del histograma de valores del parámetro c , señala el valor máximo registrado como aceptable para la simulación de Monte Carlo en MATLAB. Este valor es 0.025 y es mucho menor al límite superior de los valores generados ($c=0.1$).

Un modelo es por definición, un sistema, y los cambios, a cualquiera de sus partes, afectarán el resto de ellas. Dado que b y c están interconectados con el resto de las variables a través de las ecuaciones, sus rangos son afectados a su vez por los cambios en el resto de las variables. La solución para conocer el efecto de cada cambio es realizar un análisis de sensibilidad.

En el caso de los objetivos A y B, al generar las gráficas de dispersión de valores de gradiente geotérmico, los rangos de muestreo que propuse para b y c fueron $b = (0.01, 0.25)$ y $c = (0.0001, 0.1)$. No obstante, los valores de entrada aceptados para c durante la simulación en MATLAB®, fueron $c = (0.0001, 0.025)$ para el objetivo A y $c = (0.0001, 0.04)$ en el caso de B. Los rangos de valores aceptados para b y c en la rutina elaborada en *Crystal Ball*® no son presentados ni discutidos puesto que el programa no los presenta.

IV.3.- Sensibilidad del modelo a la profundidad

La sensibilidad de los valores de concentración de metano a la profundidad, en la rutina elaborada en MATLAB® y en la hecha en *Crystal Ball*® es distinta. Sin embargo, en ambos existe una tendencia al aumento en las fracciones de metano respecto de la profundidad, en concordancia con los fundamentos teóricos que dan soporte al modelo.

En las figuras 43 y 44, presento las gráficas de dispersión del gradiente geotérmico, junto con puntos negros que representan la región de la gráfica donde es posible encontrar una mezcla de etano y metano como huéspedes. Dichos puntos, indican los rangos de valores de gradiente geotérmico (de acuerdo a la paleta de colores en la gráfica) y de los parámetros b y c , donde es posible la existencia de metano y etano en una concentración que va desde 0% de metano hasta 100%. Sin embargo, **esta gráfica no describe la relación funcional de la fracción de metano con el gradiente geotérmico y los valores de b y c , puesto que no presenta los valores de concentración de los gases en cada punto.**

En las figuras 45a y 45b presento dos gráficas más de dispersión de valores de gradiente geotérmico para A y B. A diferencia de todas las gráficas de dispersión anteriores, donde la fracción de metano se mantuvo fija en 90%, para estas gráficas tanto los valores de b y c como los del gradiente geotérmico varían aleatoriamente, permitiendo realizar gráficas que corresponden a cualquier fracción de metano.

Las tendencias de distribución de los valores de gradiente geotérmico en función de b y c para concentraciones de metano variables, fueron semejantes a las de las gráficas de la mezcla 90% metano-10% etano. Nuevamente, la dispersión de los valores de gradiente en la gráfica del objetivo A, es mayor que en la del objetivo B.

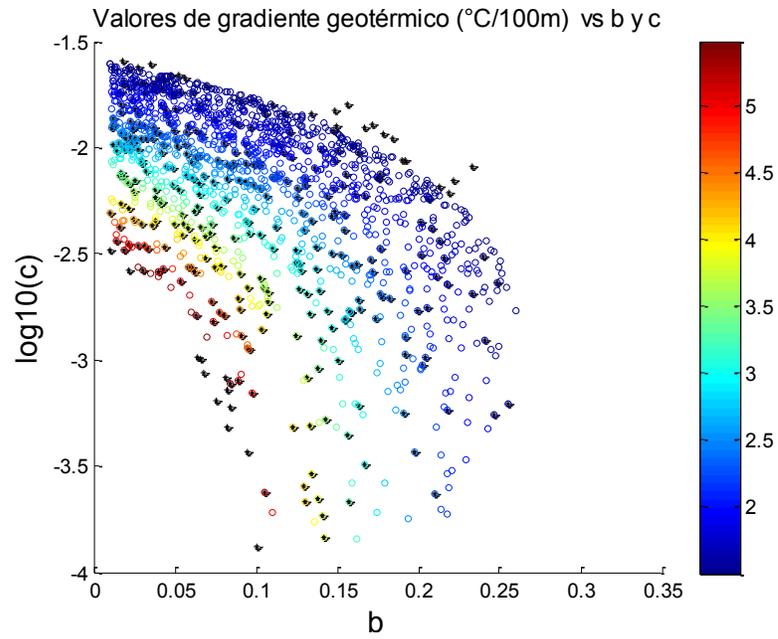


Figura 43. Gráfica de dispersión de valores de gradiente geotérmico contra b y c para el objetivo A. Superpuestos aparecen en dispersión puntos de ocurrencia de la mezcla de metano y etano como huésped (puntos negros).

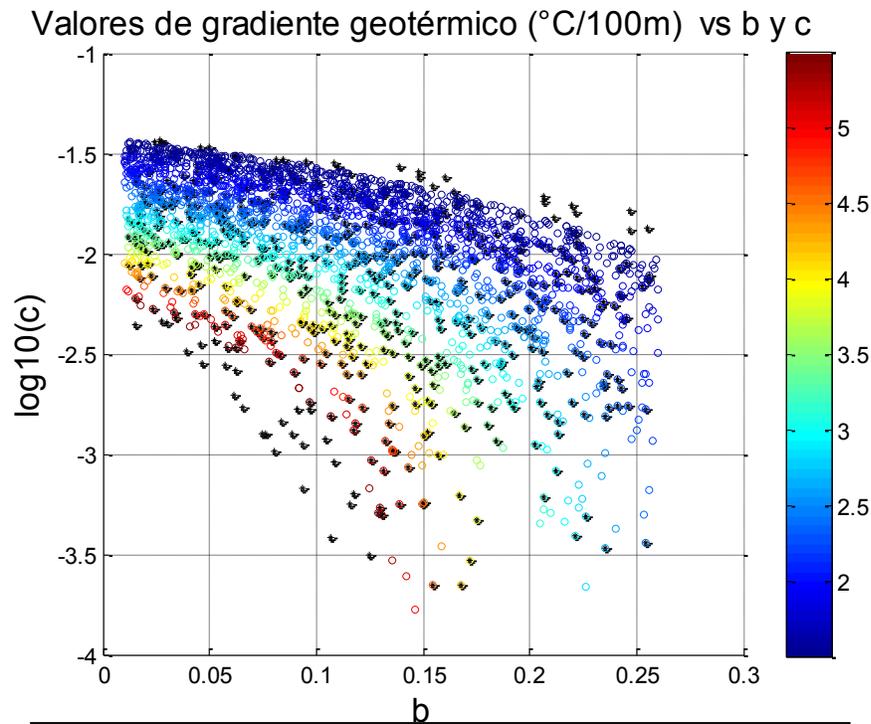


Figura 44. Gráfica de dispersión de valores de gradiente geotérmico y ocurrencia de mezcla metano- etano, contra b y c para el objetivo B.

Valores de gradiente geotérmico vs b y c (°C/100m)

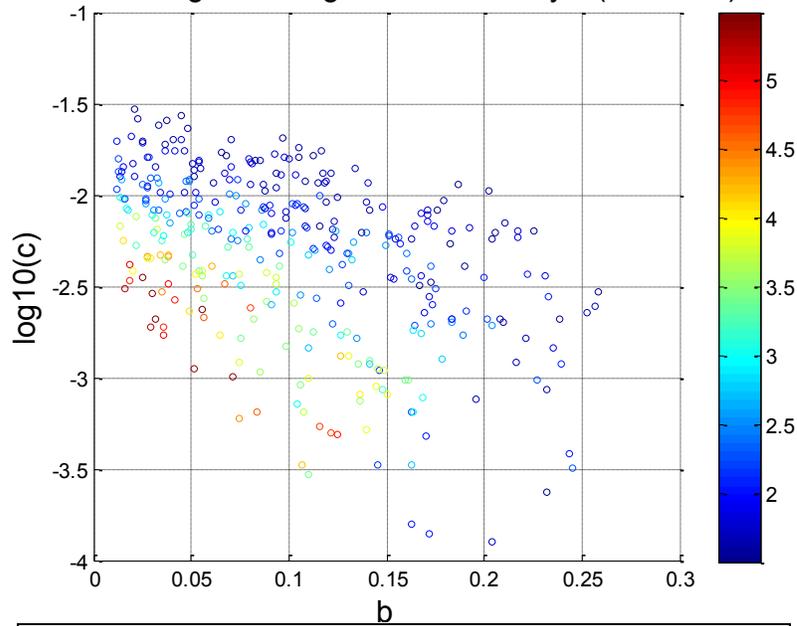


Figura 45a. Gráfica de dispersión de valores de gradiente geotérmico contra b y c , para el objetivo A.

Valores de gradiente geotérmico vs b y c (°C/100m)

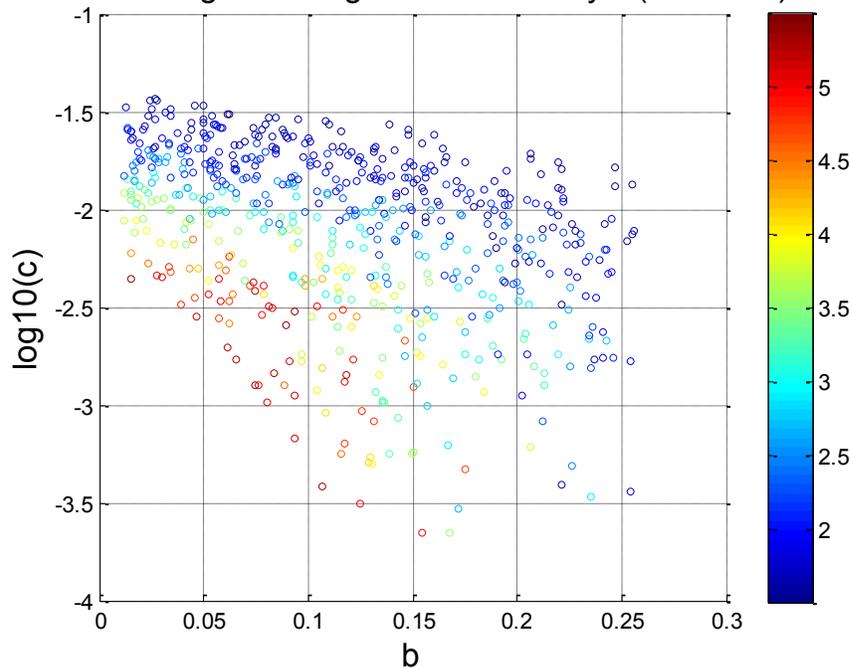


Figura 45b. Gráfica de dispersión de valores de gradiente geotérmico contra b y c , para el objetivo B. Ambas gráficas representan ternas de valores, gradiente geotérmico, parámetro b y c , aceptados durante la simulación, para cualquier mezcla posible de metano y etano.

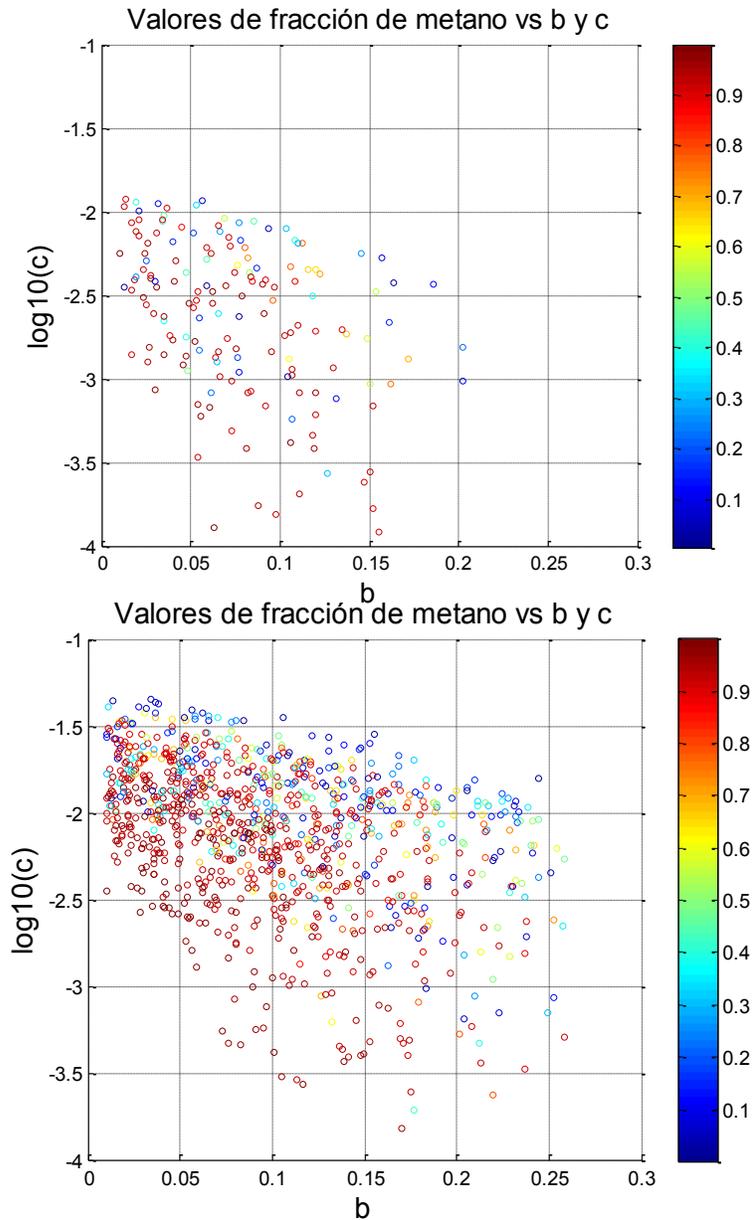


Figura 46. Arriba. Gráfica de dispersión de valores de la fracción de metano en función de b y c . El espesor hipotético de la acumulación en este ejemplo fue de 100 metros. **Figura 47.** Abajo. Gráfica de dispersión de valores de la fracción de metano en función de b y c , ahora con espesor hipotético de 500 metros. El espesor reducido en la figura 46, implica menores temperaturas a profundidad de BSR, y el número de soluciones posibles es grande. Existe además una ligera dependencia de la fracción de metano en los valores de b y c . Este comportamiento da lugar a artefactos numéricos indeseables e independientes de las observaciones. Cuando el espesor aumenta a 500 metros los valores elevados de temperatura a profundidad del BSR -dado el gran espesor-, limitan grandemente el número de ensayos exitosos. El valor modal de la fracción de metano aparenta ser inversamente proporcional al espesor.

Para poder estimar la dependencia de la fracción de metano en b y c , en las gráficas de las figuras 46 y 47 presento gráficas de dispersión de valores de fracción de metano en función de b y c , suponiendo constante el gradiente geotérmico. Ambas gráficas se produjeron con los mismos valores de entrada que en el ejemplo 1, excepto por el espesor de la acumulación de hidratos. Los espesores de la acumulación de hidratos en las figuras 46 y 47 fueron de 100 y 500 metros respectivamente.

Mientras más delgada es la zona de acumulación de hidratos de gas, parece presentarse y acentuarse una dependencia sutil de la fracción de metano estimada en los parámetros b y c . Comparando las figuras 46 y 47, se observa que el valor de la fracción de metano tiende a ser inversamente proporcional a los valores de b y c . La dispersión aumenta considerablemente en los valores de fracción de metano, a medida que el espesor y el número de valores posibles de b y c , disminuyen. Conforme se incrementa el espesor aumenta la temperatura media a profundidad del BSR, reduciendo el número de valores posibles de concentración de metano que permiten la formación y estabilidad termodinámica de una fase de hidratos.

La fracción de metano tiene una relación incipiente con los valores de los parámetros de la ecuación de equilibrio, por lo cual los resultados parecen corresponder a las inferencias y observaciones sobre los objetivos y no a efectos numéricos producto de los valores asignados a las variables de entrada.

De acuerdo a los resultados de concentración de metano para los objetivos seleccionados en la sección sísmica - ver tabla 4-, se observa que la fracción de metano es inversamente proporcional al espesor de la acumulación y directamente proporcional a la profundidad.

De acuerdo al modelo, para una misma presión, una mayor concentración de metano produce que la temperatura a la que se disocian los hidratos sea menor. El gradiente geotérmico en condiciones normales y a escalas locales, es una función creciente de la profundidad. Como resultado, a mayores fracciones de metano en la mezcla de gases huésped, la profundidad a la cual los hidratos se disocian es menor y por tanto, el espesor es menor. De manera semejante, la presión hidrostática (y por tanto la profundidad) en el ambiente de

acumulación deberá ser mayor para permitir mayores concentraciones de metano. Por tanto, las tendencias de comportamiento de la fracción de metano que he descrito en este apartado son congruentes con las premisas de operación del modelo.