



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ING. EN EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE R. N. – YACIMIENTOS

ESTIMACIÓN DE LA COMPRESIBILIDAD TOTAL EN YACIMIENTOS
NATURALMENTE FRACTURADOS MEDIANTE LAS VARIACIONES DEL POTENCIAL
GRAVITACIONAL

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
DELIA JEANETTE CAMPOS LÓPEZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. FERNANDO ASCENCIO CENDEJAS, PEMEX

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. SAMANIEGO VERDUZCO FERNANDO

Secretario: DR. BASHBUSH BAUZA JOSÉ LUIS

Vocal: DR. ASCENCIO CENDEJAS FERNANDO

1 er. Suplente: DR. RIVERA RODRÍGUEZ JESÚS

2 d o. Suplente: M.C. ESCOBEDO ZENIL DAVID

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad de México

TUTOR DE TESIS:

DR. FERNANDO ASCENCIO CENDEJAS

FIRMA

DEDICATORIA

A mis padres quienes siempre confiaron en mis decisiones, por su paciencia y su apoyo no sólo durante este proceso, sino en todo el camino. Gracias por sus consejos y buenos deseos.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por el amor, apoyo y paciencia durante este largo proceso.

A mi director de tesis, Dr. Fernando Ascencio Cendejas, por compartir sus conocimientos y su tiempo. Gracias por todos sus consejos y observaciones.

A cada uno de los sinodales, gracias por su dedicación, tiempo y amables consejos.

Al próximo Maestro en Ingeniería Jorge Huescani por todos sus consejos, su compañerismo y amistad durante la maestría y después de ella.

A CONACYT por el apoyo económico brindado y a la UNAM por permitirme continuar con mi formación académica.

ÍNDICE

Resumen

Lista de Figuras

Lista de Tablas

Capítulo I. Introducción.....	1
Capítulo II. Revisión de la literatura.....	4
Capítulo III. Importancia de la Compresibilidad Total de la Formación en Yacimientos Naturalmente Fracturados.....	9
Capítulo IV. Mareas terrestres y los efectos periódicos de la presión en un yacimiento.....	19
Capítulo V. Conceptos básicos de Astronomía.....	27
V.I Movimientos de la Tierra.....	27
V.II Sistemas de coordenadas.....	30
Capítulo VI. Desarrollo del modelo computacional.....	36
VI.I Análisis de datos de presión.....	36
VI.II Cálculo del potencial gravitacional.....	39
VI.III Estimación de la Compresibilidad de la Formación.....	44
Capítulo VII. Análisis de casos de campo.....	57
VII.I Pozo A-1 del Campo A.....	57
VII.II Pozo B-1 del Campo B.....	74

Capítulo VIII. Conclusiones	88
Nomenclatura	90
Glosario Astronómico	92
Apéndice A. Consideraciones al llevar a cabo los cálculos	95
Apéndice B. Estructura del programa	99
Referencias	106

RESUMEN

El efecto gravitatorio del Sol, de la Luna y de los planetas del Sistema Solar afectan a la Tierra no solo en las partes oceánicas, sino también en las continentales, ocasionando las llamadas “mareas terrestres”. Este efecto genera una deformación elástica del planeta Tierra. En un yacimiento petrolero, la dilatación gravitacional inducida causa una compactación o expansión diferencial la cual ocasiona un incremento o decremento de su presión. La correlación entre estos dos efectos (dilatación gravitacional y variación de la presión), permite determinar el producto porosidad-compresibilidad de un yacimiento.

En la ingeniería petrolera, la necesidad por obtener valores confiables de esos parámetros se debe a su uso extensivo en las ecuaciones de flujo y de balance de materia; por lo cual contar con una herramienta que proporcione de una manera más precisa estos valores es de vital importancia.

Por las razones anteriores, este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un programa computacional para el procesamiento de datos afectados por el potencial gravitacional, con la finalidad de determinar la compresibilidad total de la formación en yacimientos naturalmente fracturados.

.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 3.1 Representación de un Yacimiento Naturalmente Fracturado.....	9
Fig. 3.2 Representación de la presión de confinamiento (p_c) y la presión de poro (p_p) actuando sobre un medio poroso.....	11
Fig. 3.3 Efecto de la compresibilidad en un yacimiento petrolero.....	16
Fig. 4.1 Diagrama de una marea terrestre ocasionada por la acción gravitatoria de la Luna sobre la Tierra.....	19
Fig. 4.2 La atracción gravitacional de la Luna es la principal fuerza de marea (Imagen tomada de education.nationalgeographic.org/media/earths-tides).....	20
Fig. 4.3 La alineación del Sol, la Luna y la Tierra origina las mareas vivas también llamadas mareas de sicigias.....	21
Fig. 4.4 Cuando el Sol y la Luna se encuentran en ángulo recto entre sí se originan las mareas muertas también llamadas mareas de cuadratura.....	22
Fig. 4.5 Gráfica que muestra el comportamiento de un registro de marea diurna (Imagen tomada de: oceanservice.noaa.gov/education/kits/tides).....	23
Fig. 4.6 Gráfica que muestra el comportamiento de un registro de marea semidiurna (Imagen tomada de: oceanservice.noaa.gov/education/kits/tides).....	23
Fig. 4.7 Gráfica que muestra el comportamiento de un registro de marea semidiurna mixta (Imagen tomada de: oceanservice.noaa.gov/education/kits/tides).....	24
Fig. 5.1 El movimiento de rotación de la Tierra tiene una duración de 23 horas y 56 minutos provocando la sucesión de días y noches.....	27

Fig. 5.2 En el movimiento de traslación de la Tierra, el Perihelio es el punto más cercano al Sol, mientras que el Afelio es el más lejano.....	28
Fig. 5.3 Movimientos de precesión y nutación de la Tierra (Imagen tomada de es.wikipedia.org/wiki/Precesi3n_de_los_equinoccios).....	29
Fig. 5.4 Las coordenadas geográficas son utilizadas para situar un punto en la esfera terrestre.....	30
Fig. 5.5 Sistema de coordenadas ecuatoriales constituidas por la ascensión recta y la declinación.....	34
Fig. 5.6 Triángulo esférico formado por los puntos A, B y C.....	35
Fig. 6.1 Ejemplo del código utilizado para la generación de la sección de análisis de datos.....	38
Fig. 6.2 Sistema Tierra – Luna.....	40
Fig. 6.3 Coordenadas geocéntricas.....	42
Fig. 6.4 Software <i>Alcyone Ephemeris</i> , en su versión 4.2.....	43
Fig. 6.5 Ejemplo del código utilizado para la generación de la etapa para el cálculo del potencial gravitacional.....	44
Fig. 6.6 En presencia de un potencial gravitacional la Tierra se distorsiona a un esferoide alargado cuyo eje más largo apunta a la Luna.....	45
Fig. 6.7 Representación gráfica de las componentes del tensor tensión en una base ortogonal.....	46
Fig. 6.8 Representación de la dilatación en un cuerpo.....	49
Fig. 7.1 Fases lunares en el mes de febrero de 2006.....	59
Fig. 7.2 Gráfica de los datos originales del pozo A-1 del campo A.....	60

Fig. 7.3 Gráfica de los datos originales al considerar los efectos de la subida y bajada del sensor (pozo A-1 del campo A)	61
Fig. 7.4 Gráfica de los datos considerando un dato por minuto para el pozo A-1 del campo A (<i>Datos Medidos</i>).....	61
Fig. 7.5 Gráfica de los datos suavizados considerando un promedio móvil de 24 horas (pozo A-1 del campo A)	62
Fig. 7.6 Ajuste mediante regresión polinomial a los datos obtenidos al aplicar el promedio móvil (pozo A-1 del campo A).....	63
Fig. 7.7 Comparación de los datos medidos y datos calculados del pozo A-1 del campo A.....	63
Fig. 7.8 Efecto periódico de la presión del pozo A-1 del campo A.....	64
Fig. 7.9 Gráfica que muestra el efecto periódico de la presión, las presiones medidas y las presiones calculadas (pozo A-1 del campo A).....	65
Fig. 7.10 Carga de datos de la Zona A, a la que pertenece el campo A, en el programa <i>Alcyone Ephemeris</i>	66
Fig. 7.11 Comparación de resultados de la Ascensión Recta y la Declinación (para el Sol y la Luna) entre <i>EstComp</i> y <i>Alcyone Ephemeris</i> (campo A).....	68
Fig. 7.12 Resultados al calcular el Potencial Lunar, Potencial Solar y Potencial Total del campo A en el programa <i>EstComp</i>	69
Fig. 7.13 Comparación entre el Potencial Gravitacional Total y los Efectos Periódicos de la presión obtenidos para el pozo A-1 del campo A.....	69
Fig. 7.14 Comparación entre el Potencial Gravitacional Total y los Efectos Periódicos de la presión al considerara el desfase de 12 horas obtenidos para el pozo A-1 del campo	70
Fig. 7.15 Cálculo de la amplitud pico a pico	71

Fig. 7.16 Fases lunares en el mes de noviembre de 2004.....	75
Fig. 7.17 Gráfica de los datos originales del pozo B-1 del campo B.....	76
Fig. 7.18 Datos considerando los efectos del sensor (pozo B-1 del campo B).....	77
Fig. 7.19 Primer intervalo de datos de presión del pozo B-1 que presentan el efecto sinusoidal: 9-10 de Noviembre de 2004.....	77
Fig. 7.20 Segundo intervalo de datos de presión que presentan el efecto sinusoidal: 10-17 de Noviembre de 2004 (pozo B-1 campo B).....	78
Fig. 7.21 Datos Calculados y Datos medidos para el primer intervalo (pozo B-1 del campo B).....	79
Fig. 7.22 Datos Calculados y Datos medidos para el segundo intervalo (pozo B-1 del campo B).....	79
Fig. 7.23 Efecto periódico de la presión, datos medidos y datos calculados para el primer intervalo (pozo B-1 del campo B).....	80
Fig. 7.24 Efecto periódico de la presión, datos medidos y datos calculados para el segundo intervalo (pozo B-1 del campo B).....	81
Fig. 7.25 Carga de datos del campo B al programa <i>Alcyone Ephemeris</i>	82
Fig. 7.26 Comparación de resultados de los parámetros astronómicos para el campo B entre <i>Alcyone Ephemeris</i> y <i>EstComp</i>	83
Fig. 7.27 Potencial Solar, Lunar y Total para el pozo B-1 del campo B.....	84
Fig. 7.28 Comparación entre el Potencial Gravitacional Total y los Efectos Periódicos de la presión obtenidos para el pozo B-1 del campo B.....	85
Fig. 7.29 Comparación entre el Potencial Gravitacional Total y los Efectos Periódicos considerando el desfase de 12 horas para el pozo B-1 del campo B.....	85

Fig. B.1 Pantalla principal del programa *EstComp*.....99

LISTA DE TABLAS

Tabla 7.1 Características petrofísicas del campo A.....	58
Tabla 7.2 Tipos de fluido y condiciones del campo A.....	58
Tabla 7.3 Datos necesarios para calcular el potencial gravitacional para el campo A..	66
Tabla 7.4 Diferencias máxima y mínima entre el programa <i>EstComp</i> y <i>Alcyone Ephemeris</i> , al comparar los resultados obtenidos para los parámetros astronómicos principales del campo A.....	67
Tabla 7.5 Cálculo de las amplitudes pico a pico del potencial gravitacional ΔV_2 y de la variación de la presión ΔP del pozo A-1 del campo A	72
Tabla 7.6 Cálculo del producto porosidad-compresibilidad ϕc_f , para el pozo A-1 del campo A.....	73
Tabla 7.7 Cálculo de la compresibilidad total de la formación c_f , con diferentes valores de porosidad ϕ para el pozo A-1 del campo A	73
Tabla 7.8 Características petrofísicas del campo B.....	74
Tabla 7.9 Tipos de fluido y condiciones del campo B.....	74
Tabla 7.10 Datos necesarios para calcular el potencial gravitacional para el campo B.....	81
Tabla 7.11 Diferencias máxima y mínima entre el programa <i>EstComp</i> y <i>Alcyone Ephemeris</i> al comparar los resultados obtenidos para los parámetros astronómicos principales para el campo B.....	83
Tabla 7.12 Cálculo de las diferencias pico a pico del potencial gravitacional ΔV_2 y de la variación de la presión ΔP para el pozo B-1 del campo B.....	86

Tabla 7.13 Cálculo del producto porosidad-compresibilidad ϕc_f87

Tabla 7.14 Cálculo de la compresibilidad de la formación c_f con valores representativos de porosidad ϕ para el pozo B-1 del campo B..... 87

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Los yacimientos petroleros son sistemas muy complejos y requieren una gran cantidad de datos para llevar a cabo una determinación física y una evaluación económica de un campo de hidrocarburos, que sean válidas y precisas, por lo cual, la obtención de datos confiables es uno de los mayores retos de la ingeniería de yacimientos.

La necesidad por obtener datos confiables se debe a que se utilizarán para calcular valores de diferentes parámetros, por ejemplo en las ecuaciones de balance de materia, gracias a los cuales se podrán obtener datos como la dimensión y la posible producción de un yacimiento, por lo que valores erróneos para el cálculo de estas variables, pueden conducir a una mala interpretación del resultado. Dos de los valores más difíciles de obtenerse son la porosidad y la compresibilidad del yacimiento (**Arditty y Ramey, 1978**).

Al llevar a cabo el análisis de los datos resultantes de las pruebas de presión en los pozos, a menudo se observan perturbaciones indeseadas (ruido), las cuales afectan la interpretación de los datos, sobre todo en los periodos de tiempo finales (**Langaas et al., 2006**). Estas perturbaciones pequeñas tienen un comportamiento periódico definido; generalmente ocurren en una escala de tiempo semi-diurna (repetiendo cada medio día) y otras en una escala diurna (repetiéndose diariamente). Se puede demostrar que las perturbaciones observadas en la presión del yacimiento, coinciden con la variación periódica en la atracción gravitacional de la Tierra por la Luna y el Sol.

Las variaciones de estas perturbaciones y sus amplitudes instantáneas se pueden calcular, en sus diversos componentes con la precisión deseada, a partir de elementos de las órbitas terrestres y lunares y los valores de las masas de la Luna y el Sol (**Melchior, 1974**).

Al comparar la variación sinusoidal de la presión del yacimiento y el potencial gravitacional impuesto a la Tierra por la Luna y el Sol, se observa que ambos efectos son coincidentes. La correlación entre estos dos efectos es lo que permite determinar el producto de la porosidad-compresibilidad de un yacimiento, como ha sido demostrado por diversos autores en la literatura, tales como **(Arditty y Ramey, 1978)**, **(Deskin et al., 1991)**, **(Chang y Firoozabadi, 2000)**; entre otros.

Teniendo en cuenta que una parte esencial en la administración integral de yacimientos es la adquisición y análisis de datos, es una necesidad obtener valores confiables de los parámetros principales del yacimiento. La compresibilidad del yacimiento es uno de los valores más difíciles de obtener, por esta razón y con la finalidad de aportar una herramienta que proporcione de una manera más precisa este parámetro, en el trabajo presente se desarrolla un programa computacional para el procesamiento de datos afectados por el potencial gravitacional, con el objetivo de determinar la compresibilidad total de la formación en yacimientos naturalmente fracturados.

El trabajo está estructurado de la manera siguiente:

En el Capítulo II se hace una revisión de la literatura, presentando una breve descripción de las principales aportaciones de los diferentes autores que de alguna manera han contribuido al desarrollo de esta metodología, partiendo de los principales trabajos dentro de la hidrología hasta los últimos dentro de la ingeniería petrolera.

El Capítulo III está dedicado a la importancia que tiene conocer el valor de la compresibilidad total de la formación dentro de la ingeniería de yacimientos, mientras que en el Capítulo VI se presenta la metodología que se utilizará para llegar a obtener este parámetro, la cual está dividida en tres partes principales: análisis de datos, cálculo del potencial gravitacional y finalmente la estimación de la compresibilidad total de la formación. La relación entre el análisis de los datos de presión y el cálculo del potencial

gravitacional se presenta en el Capítulo IV. Para una mejor comprensión del procedimiento para la obtención del potencial gravitacional, el Capítulo V contiene conceptos básicos de Astronomía, los cuales se utilizarán durante los capítulos siguientes. De la misma manera, debido al uso de terminología especializada, se cuenta con un Glosario Astronómico al final del trabajo.

En el Capítulo VII se muestran los resultados obtenidos al aplicar la metodología a dos campos seleccionados. Finalmente en el Capítulo VIII se discuten los resultados y se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Los fenómenos naturales aportan información conducente a una mejor comprensión sobre la Tierra, siempre y cuando, se tenga el interés de explorar esta información.

En la disciplina de la Hidrología desde hace mucho tiempo, las fluctuaciones en el nivel del agua en muchos pozos debidas a la carga atmosférica, las mareas terrestres y los eventos sísmicos han sido motivo de estudio. Estas fluctuaciones son principalmente de interés para los geofísicos e hidrólogos, ya que los pozos de agua sirven como indicadores sensibles de la tensión de la corteza terrestre, además de que contienen información esencial relacionada con las propiedades del material de la roca y/o de los sedimentos. Debido a la importancia de la información que pueden contener estas fluctuaciones, muchos investigadores han examinado la respuesta de los pozos a la carga atmosférica y a las mareas terrestres.

Las mareas terrestres, al igual que las mareas oceánicas, se originan por la atracción gravitacional entre el Sol, la Luna y la Tierra. Debido a la rigidez de la tierra en comparación con el agua, las mareas terrestres no pueden observarse directamente con facilidad, ya que son pequeñas en comparación con las mareas oceánicas.

Las primeras observaciones de los cambios en un volumen poroso inducidos por las mareas terrestres, se llevaron a cabo en el campo de la Hidrología, analizando las variaciones de altura del fluido en pozos de agua. La mayoría de las observaciones iniciales se realizaron en minas y en pozos, en los cuales las fluctuaciones periódicas más pequeñas de los niveles de agua se pudieron detectar y medir fácilmente.

Uno de los aportes principales dentro de este estudio fue realizado por Longman, quien en 1959 publica el artículo "*Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun*", en el cual presenta un resumen de fórmulas que permiten el

cálculo de las aceleraciones de marea, debidas a la Luna y al Sol, a cualquier tiempo dado y para cualquier punto en la superficie de la Tierra. Posteriormente en 1960, en su artículo "*The interpolation of Earth-tide records*", Longman presenta un método mediante el cual los registros de gravedad de la marea terrestre pueden interpolarse convenientemente, contemplando la posibilidad de generar estos registros en su totalidad para cualquier estación. La importancia de estos aportes se debió a que antiguamente los registros se obtenían a través de métodos mecánicos.

Más tarde, los estudios de Melchior, en 1966, y de Bredehoeft, en 1967, fueron pioneros en el uso de los registros de marea terrestre, como una herramienta útil para la predicción de ciertas propiedades físicas de los acuíferos. Bredehoeft en su artículo "*Response of well-aquifer systems to Earth tides*", presenta una investigación exhaustiva de la oscilación de la altura del líquido en un acuífero causada por los cambios en el volumen poroso, además de mostrar un método para el cálculo del almacenamiento específico y la porosidad de un acuífero, a partir de un análisis de las fluctuaciones de marea terrestre.

Años después, en 1970, Bodvarsson y, en 1971, Robinson y Bell demostraron la existencia de una relación entre las características de la roca y la amplitud de la respuesta de un sistema de pozo abierto con entrada de agua. Lo anterior está descrito en el artículo de Bodvarsson "*Confined fluids as strain meters*" donde presenta esta teoría basada en una forma generalizada de la ley de Darcy, implicando un término de inercia, concluyendo que las observaciones en pozos pueden proporcionar datos cuantitativos relacionados con las dilataciones de la roca. Johnson, en 1973, en su tesis "*Pore pressure changes associated with Creep events on the San Andreas fault*", describió el comportamiento de un sistema de este tipo en detalle.

En 1984, Morland y Donaldson en su artículo "*Correlation of porosity and permeability of reservoirs with well oscillations induced by Earth tides*", analizan el retraso de fase que se produce entre la gravedad máxima y el máximo nivel de agua,

debido a las mareas terrestres en pozos conectados a yacimientos profundos, concluyendo que la amplitud de las oscilaciones del nivel de agua inducidas por las pequeñas variaciones armónicas de la gravedad, debidas a las mareas terrestres, y el desfase relativo a la marea, están relacionados con la porosidad y la permeabilidad del yacimiento.

La Ingeniería de yacimientos ha usado todas estas ideas de la Hidrología, ya que ésta fue una de las primeras ciencias en combinar el fenómeno de las mareas con las propiedades físicas de los acuíferos. De esta manera se utilizaron las ecuaciones obtenidas para los acuíferos y se aplicaron a objetivos petroleros.

El efecto de las mareas fue detectado por primera vez en yacimientos de petróleo con la aparición de los medidores de presión de alta sensibilidad. En 1976, Khurana presentó el primer trabajo relacionando con la oscilación periódica de la presión durante las pruebas de pozos en el Mar de Timor (situado entre la isla de Timor y Australia) debida a las mareas oceánicas. Arditty y Ramey en 1978, en el artículo "*Response of a closed well-reservoir system to stress induced by earth tides*", desarrollaron una teoría que describe la variación de presión en sistemas de pozo cerrado, causada por mareas terrestres y además estudiaron los parámetros que determinan la amplitud de los registros.

Entre los trabajos de vanguardia, también se encuentra el de Jonathan y Lawrence, quienes en 1982 proponen una metodología para el análisis y orientación de fracturas en yacimientos, a través del estudio de la deformación que producen las mareas terrestres en los yacimientos. Posteriormente, en 1986, Hemala y Balnaves en su artículo "*Tidal effect in petroleum well testing*" proporcionaron una visión general de los efectos de mareas desde el punto de vista de la ingeniería petrolera, proponiendo algunas aplicaciones de los efectos para predecir heterogeneidades del fluido en yacimientos. En 1990 McKee et al., presentaron una teoría para calcular la compresibilidad a partir del factor de eficiencia de marea. El factor de eficiencia de

marea, es la relación entre la respuesta de presión de poro debida a las mareas en el yacimiento y el cambio de presión debido a las mareas en el fondo del mar (**Langaas et al., 2006**).

Inspirados por la propuesta de Hemala y Balnaves, en 1990 Wannell y Morrison en su artículo "*Vertical permeability measurement in new reservoirs using tidal pressure*", sugieren un método práctico para medir la permeabilidad vertical de un yacimiento. Ellos afirmaron:

Las mareas oceánicas y terrestres inducen pequeños cambios en la presión de los yacimientos petrolíferos, aunque los mecanismos involucrados difieren. Las mareas terrestres exprimen el yacimiento reduciendo su volumen alrededor de una cien millonésima parte, lo que produce un cambio en la presión de yacimiento, el cual induce movilidad a su vez en los fluidos contenidos en el interior mostrando un desfase con la respuesta teórica esperada, este desfase es a su vez utilizado para el cálculo de la permeabilidad vertical del yacimiento (Wannell y Morrison, 1990).

Años más tarde, en 1994, Dean et al. introducen un método para calcular la compactación y los cambios de compresibilidad en yacimientos de altamar. Por su parte Netland et al., en 1996, publican un método para el monitoreo de la compactación no limitado a una roca de yacimiento específica, utilizando una expresión más compleja para el módulo de compactación. Posteriormente, en 1997, Pinilla et al. presentan un modelo acoplando los aspectos de geomecánica, marea y flujo de fluido en medios porosos.

Entre los trabajos más recientes se encuentra el de Chang y Firoozabadi quienes en 2000, en su artículo "*Gravitational potential variations of the Sun and Moon for estimation of reservoir compressibility*", muestran que el potencial gravitacional puede utilizarse para estimar la compresibilidad total en yacimientos naturalmente fracturados.

En 2003, Levitan y Phan en "*Identification of tidal signal in well test pressure data*", desarrollan un algoritmo especial para la identificación de señales de marea en datos de presión de pruebas de fondo de pozo. Por su parte Smit y Sayers, en 2005, en "*Can tidal-driven pressure changes reveal reservoir properties for use in 4D monitoring?*", presentan una derivación general del factor de eficiencia de marea y discuten como la respuesta de marea puede asistir al monitoreo sísmico 4D.

En 2006 Langaas et al, presentan una revisión de la respuesta de presión a las mareas en yacimientos petroleros, en su artículo "*Tidal pressure response and surveillance of water encroachment*", concluyendo que con los efectos de mareas incorporados en los simuladores de yacimientos, es posible estudiar los problemas multifásicos complejos y evaluar el seguimiento de la respuesta de las mareas como un método de monitoreo del yacimiento. Posteriormente, en 2013 Xingru et al., presentan el artículo "*Deepwater reservoir characterisation using tidal signal extracted from permanent downhole pressure gauge*", en el cual discuten como utilizar la Transformada Rápida de Fourier (F.F.T.) para extraer la señal de marea, además de mostrar la teoría y el método para procesar la señal con el propósito de la caracterización de los yacimientos.

En resumen, el fenómeno de las mareas terrestres puede aportar información esencial para la ingeniería de yacimientos; por tal motivo, el objetivo principal de este trabajo es aprovechar esta información y proporcionar una herramienta computacional para la estimación de la compresibilidad total de un yacimiento naturalmente fracturado, con miras en un futuro de poder anexar el cálculo de más propiedades y así contar con una herramienta que permita una mejor caracterización de los yacimientos.

El trabajo realizado está sustentado principalmente en los artículos de **(Arditty y Ramey, 1978)** y **(Chang y Firoozabadi, 2000)** así como la investigación realizada en **(Ascencio, 2015)**.

CAPÍTULO III. IMPORTANCIA DE LA COMPRESIBILIDAD TOTAL DE LA FORMACIÓN EN YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS

Una cantidad considerable de los yacimientos de hidrocarburos, a nivel mundial, se encuentran en rocas que presentan fracturas naturales. En México, aproximadamente el 80% de la producción de hidrocarburos proviene de yacimientos carbonatados naturalmente fracturados, en los cuales se estima que se encuentran la mitad de las reservas mundiales de hidrocarburos. Un Yacimiento Naturalmente Fracturado es aquel cuya producción está afectada por la presencia de fracturas, como se puede observar en la **Fig. 3.1**.

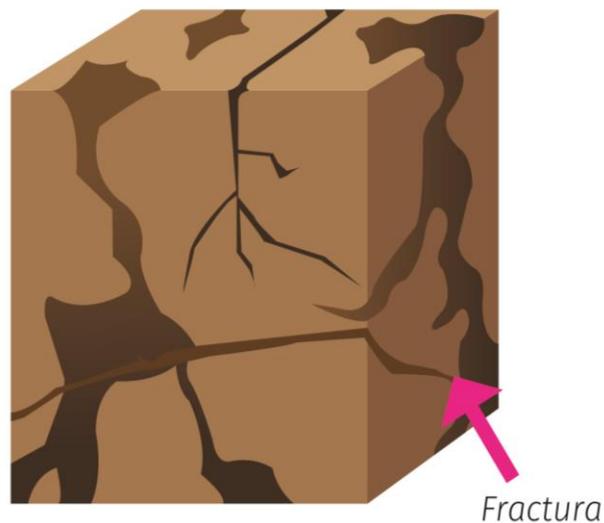


Fig. 3.1 Representación de un Yacimiento Naturalmente Fracturado.

Una fractura es una discontinuidad plana en el material que compone la roca, la cual es el resultado debido a que los esfuerzos de confinamiento a los que ha estado expuesta la roca son superiores a los esfuerzos de ruptura. Si bien la mayoría de los yacimientos de hidrocarburos se han afectado de alguna manera por las fracturas naturales, los efectos de las fracturas a menudo se conocen en forma imprecisa y en gran medida se subestiman.

Las fracturas naturales influyen en el comportamiento tanto de la producción como en la declinación de presión del yacimiento. Esta influencia puede resultar tanto negativa como positiva, sobre todo en la parte del flujo de fluido. En un Yacimiento Naturalmente Fracturado, los fluidos están almacenados dentro del espacio poroso de la matriz y dentro de las fracturas de la roca.

Un yacimiento a profundidad, está sujeto a presiones de sobrecarga causadas por el peso de los estratos superiores, las cuales varían arealmente según la profundidad, naturaleza de la estructura, consolidación de la formación e historia geológica de la roca.

La variación más importante de la presión se presenta con la profundidad. En un yacimiento consolidado el peso de los estratos superiores sólo aplica una fuerza compresiva, que no se transmite a los fluidos dentro del espacio poroso. Esta diferencia de presión, entre la presión de sobrecarga y la presión interna, se denomina presión de sobrecarga efectiva.

A medida que el yacimiento produce, la presión interna en los poros disminuye y, por lo tanto, la presión de sobrecarga efectiva aumenta, causando los efectos siguientes:

- El volumen poroso y el volumen de la roca del yacimiento se reduce
- Los granos de arena dentro del espacio poroso se expanden

Estos tres cambios en el volumen reducen el espacio poroso, y por lo tanto, la porosidad de la roca.

El parámetro que cuantifica la relación entre la presión ejercida sobre un cuerpo y el cambio resultante en su volumen es **la compresibilidad**.

Un material no poroso tiene una sola compresibilidad, definida por la ecuación siguiente:

$$c = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (3.1)$$

donde:

c = Compresibilidad del material en el intervalo de presión de p_1 a p_2 .

V = Volumen del cuerpo a la presión p_1 .

$\frac{dV}{dp}$ = Cambio de volumen por unidad de cambio de presión de p_1 a p_2 .

El signo negativo de la ecuación es por convención, para que la compresibilidad sea positiva para las disminuciones que resulten con el incremento mecánico de la presión.

En contraste con la relación única de presión-volumen que existe para un material no poroso, la situación es más complicada para una roca porosa, ya que, como se dijo anteriormente, puede someterse a un confinamiento externo de presión, así como a una presión de poro interna, como está representado en la **Fig. 3.2**.

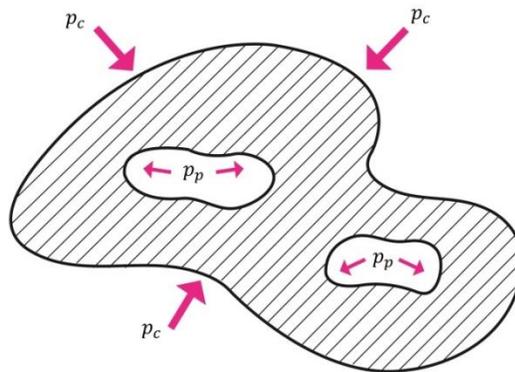


Fig. 3.2 Representación de la presión de confinamiento (p_c) y la presión de poro (p_p) actuando sobre un medio poroso.

Cuando se extrae fluido de una roca receptora, la presión interna cambia, aumentando la presión diferencial entre esta presión interna y la presión externa de sobrecarga que permanece constante. Esto trae como consecuencia el desarrollo de diferentes esfuerzos en la roca, dando como resultado un cambio en la parte sólida, en los poros y por consiguiente, en la roca total. Desde el punto de vista de ingeniería de yacimientos, el cambio principal es el experimentado por los poros.

(Geertsma, 1957) precisó que en las rocas se pueden distinguir tres tipos de compresibilidad:

- **Compresibilidad de la matriz de la roca**

Se define como el cambio fraccionario en el volumen del material sólido de la roca (granos) con respecto al cambio en la unidad de presión, expresada por:

$$c_r = -\frac{1}{V_r} \frac{dV_r}{dp}, \quad (3.2)$$

donde c_r es la compresibilidad de la matriz de la roca, y V_r es el volumen de sólidos.

- **Compresibilidad del volumen total de la roca**

Se define como el cambio fraccional del volumen total de la roca ocasionado por el cambio en la unidad de presión, expresada por:

$$c_B = -\frac{1}{V_B} \frac{dV_B}{dp}, \quad (3.3)$$

donde c_B es el coeficiente de compresibilidad de la roca, y V_B es el volumen total.

- **Compresibilidad de los poros**

Cambio fraccional en el volumen poroso de la roca debido al cambio de unidad de presión. Se expresa por la siguiente relación:

$$c_p = \frac{1}{V_p} \frac{dV_p}{dp}, \quad (3.4)$$

donde p es la presión en los poros, c_p es el coeficiente de compresibilidad de los poros, y V_p es el volumen poroso. La ecuación anterior puede expresarse en términos de la porosidad tomando en cuenta que tanto ϕ como V_p aumentan con el incremento de la presión de los poros, es decir:

$$c_p = \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} \quad (3.5)$$

(Geertsma, 1957) y (Ursin y Zolotukhin, 1997) muestran que la compresibilidad del volumen poroso, c_p , del volumen total de la roca, c_B y de la matriz de la roca, c_r , presentan la relación siguiente:

$$c_p = \frac{c_B - (1 + \phi)c_r}{\phi}. \quad (3.6)$$

Considerando que los fluidos se encuentran almacenados en el volumen poroso (V_p), la compresibilidad del volumen poroso (c_p) es la que se considera en los cálculos de ingeniería de yacimientos.

La compresibilidad de la formación, c_f , es el término que se utiliza para describir la **compresibilidad total de la formación**, que define el cambio en el volumen poroso

dividido por el cambio en la presión del yacimiento que causó el cambio en el volumen poroso; es decir se considera igual a la de los poros, c_p :

The formation compressibility c_f is the term commonly used to describe the total compressibility of the formation and is set equal to c_p (Tarek, 2010, pag. 89).

$$c_f = c_p = \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} \quad (3.7)$$

El intervalo de valores típicos para la compresibilidad de la formación es de 3×10^{-6} a 25×10^{-6} .

Geertsma (1957) sugirió que la compresibilidad del volumen total de la roca c_B está relacionada con la compresibilidad del volumen poroso c_p mediante la siguiente expresión:

$$c_B \cong c_p \phi \quad (3.8)$$

En yacimientos naturalmente fracturados, la compresibilidad total de la roca juega un papel importante, especialmente si existe un gran contraste entre la porosidad de la matriz y de la fractura ($\phi_f \ll \phi_m$). En este caso, la compresibilidad asociada al sistema de doble porosidad se expresa mediante el parámetro de capacidad de almacenamiento (*storage capacity*) (**Van Golf, 1982**):

$$c_t \phi. \quad (3.9)$$

En la ecuación anterior, c_t es la compresibilidad total del sistema, que incluye las rocas y los fluidos que saturan los poros, y es descrita como:

$$c_t = S_o c_o + S_w c_w + S_g c_g + c_f, \quad (3.10)$$

donde:

S_o, S_w, S_g = Saturación de aceite, agua y gas; respectivamente.

c_o, c_w, c_g = Compresibilidad del aceite, del agua y del gas; respectivamente.

c_t = Compresibilidad total del yacimiento

c_f = Compresibilidad de la formación

Cuando se hace referencia a una sola fase, la compresibilidad total, recibe el nombre de compresibilidad efectiva para la fase dada. Al utilizar la compresibilidad efectiva en yacimientos naturalmente fracturados, la ecuación deberá tomar en cuenta los términos para la matriz y para la red de fracturas. Esto mismo se debe considerar para la compresibilidad total de la formación, es decir:

$$c_f = c_{f,m} + c_{f,f}, \quad (3.11)$$

donde $c_{f,m}$ es el termino que considera a la matriz y $c_{f,f}$ el de la fractura.

La compresibilidad de la formación al igual que la de los fluidos es un mecanismo de expulsión de hidrocarburos. Al comenzar la explotación de un yacimiento y caer la presión, se expanden la roca y los fluidos. La expansión de la roca causa una disminución del espacio poroso interconectado. La expansión de los fluidos tiende a contrarrestar parcialmente el vaciamiento ocurrido por la producción de fluidos, que a su vez causó la caída de presión. Ambos efectos van en la misma dirección, la cual es expulsar fluidos del espacio poroso interconectado. Este mecanismo de expulsión, representado en la **Fig. 3.3**, es especialmente importante en la producción de yacimientos bajosaturados. De hecho, en este caso la compresibilidad total de la formación es la única fuente de energía de producción.

La compresibilidad de la formación se puede medir en el laboratorio. En algunos casos, cuando no se dispone de estos datos, se recurre a correlaciones estadísticas basadas en mediciones sobre muestras de otros yacimientos. Lo cierto es que no existen buenas correlaciones para calcular la compresibilidad de la formación, pues esta propiedad es altamente dependiente del tipo de roca. Sin embargo, se acepta que la compresibilidad de una formación guarda cierta relación con su porosidad y que esta relación puede cambiar para cada yacimiento y aún para diferentes zonas de un mismo yacimiento (**Bidner, 2001**).

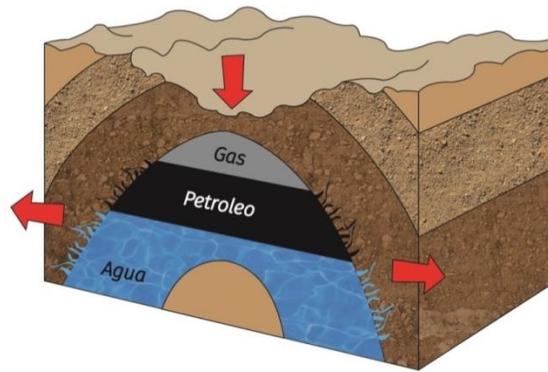


Fig. 3.3 Efecto de la compresibilidad en un yacimiento petrolero.

Si no hay mediciones de la compresibilidad disponibles, se puede recurrir a las correlaciones gráficas, las cuales presentan una dispersión considerable en los datos provenientes de mediciones hechas en el laboratorio sobre cierto tipo de rocas. Entre estas correlaciones se encuentran:

- **Hall (1953):** La correlación de Hall se refirió al efecto combinado de aumento de volumen de sólidos de la roca al disminuir la presión de yacimiento (incremento del esfuerzo efectivo), y la disminución del volumen poroso de la formación a causa de la extracción de fluidos. En la correlación establecida, la presión de sobrecarga se mantiene constante. El autor consideró que la compresibilidad de la formación es independiente del tipo de roca y del rango de presiones siendo entonces, exclusivamente como una función de porosidad, lo cual no es correcto.

- **Van der Knaap (1959):** Indicó que el cambio en la porosidad para una roca dada depende solo de la diferencia entre las presiones interna y externa y no del valor absoluto de las presiones. Notó que la c_f incrementa conforme la porosidad decrece. Su correlación es similar a la de Hall, pero realizada con muestras de calizas de un solo pozo.
- **Newman (1973):** Newman utilizó 79 muestras de areniscas consolidadas y calizas con rango de porosidades variando entre 1 y 35%.
- **Horne (1990):** Horne correlacionó c_f con ϕ inicial de acuerdo al tipo de roca: calizas, arenas consolidadas y arenas no consolidadas.

Como se ha establecido, las mediciones de laboratorio para la compresibilidad c_f muestran un rango amplio para un espectro de rocas que van desde carbonatos hasta arenas no consolidadas, de ahí la importancia de poder contar con otro método que permita la obtención del valor de éste parámetro de una forma más precisa, ya que muchas veces la compresibilidad declina drásticamente, por lo cual pueden presentarse cambios considerables desde el descubrimiento hasta el abandono de un yacimiento.

Aunque la compresibilidad de la formación es un mecanismo de energía del yacimiento adicional a otros mecanismos de expansión de fluidos, frecuentemente se desprecia en el análisis de comportamientos de yacimientos, donde la contribución suele ser significativamente menor comparada con otros mecanismos de producción, como el empuje hidráulico, gas en solución o capa de gas (yacimientos saturados). Sin embargo, los efectos de la compresibilidad de la roca deben considerarse cuando el yacimiento se encuentra bajosaturado, ya que en este caso la contribución por expansión de la roca y los fluidos, puede ser de aproximadamente de un 10% de la recuperación total.

La compresibilidad total de la formación tiene un gran impacto en las estimaciones de recuperación para yacimientos de arena no consolidados. Una estimación realista del factor de recuperación es imprescindible para las decisiones potenciales de desarrollo. La confirmación de una alta compresibilidad de volumen de poro puede conducir al desarrollo de nuevos descubrimientos. En los yacimientos compuestos por arena no consolidada, debido al débil sistema estructural, la compresibilidad del volumen de poros puede tener un mayor impacto en las estimaciones de la recuperación final, y las formaciones son más susceptibles a la migración de finos **(Deskin et al., 1991)**.

Además de lo anteriormente dicho, no se debe olvidar el papel que tiene el valor de la compresibilidad de la formación dentro del cálculo de la compresibilidad total del yacimiento c_t , la cual es ampliamente utilizada en la ecuación de flujo transitorio y la ecuación de balance de materia (EBM). La ecuación de balance de materia permite establecer un balance entre lo producido y los efectos de la expansión de los fluidos del yacimiento, como resultado de una caída de presión. Con esta ecuación se determinan aspectos importantes como el Volumen Original de Aceite, la entrada de agua por la expansión de un acuífero y también permite predecir el comportamiento del yacimiento bajo diferentes esquemas de explotación.

El uso del valor físicamente correcto para la compresibilidad de la formación c_f , en los estudios de ajuste del comportamiento del yacimiento por medio de la EBM, permite la estimación apropiada de dos parámetros esenciales, que son el volumen original del aceite y el volumen del acuífero **(Samaniego, 2005)**.

La precisión del método de balance de materia depende de la cantidad y sobre todo de la calidad de los datos, por lo cual tener la posibilidad de conocer el valor de la compresibilidad total de la formación con una mayor precisión es indispensable para la obtención de resultados más confiables.

CAPÍTULO IV. MAREAS TERRESTRES Y LOS EFECTOS PERIÓDICOS DE LA PRESIÓN EN UN YACIMIENTO

La atracción gravitacional entre el Sol, la Luna y la Tierra da origen a las mareas oceánicas y a las mareas terrestres. Las mareas oceánicas se observan fácilmente, dependen de la rotación de la Tierra, de la atracción gravitatoria entre la Tierra, el Sol y la Luna y otros efectos. Por otro lado, las mareas terrestres (**Fig. 4.1**) son pequeñas en comparación con las mareas oceánicas y no pueden observarse directamente con facilidad, debido a la rigidez de la tierra en comparación con el agua.

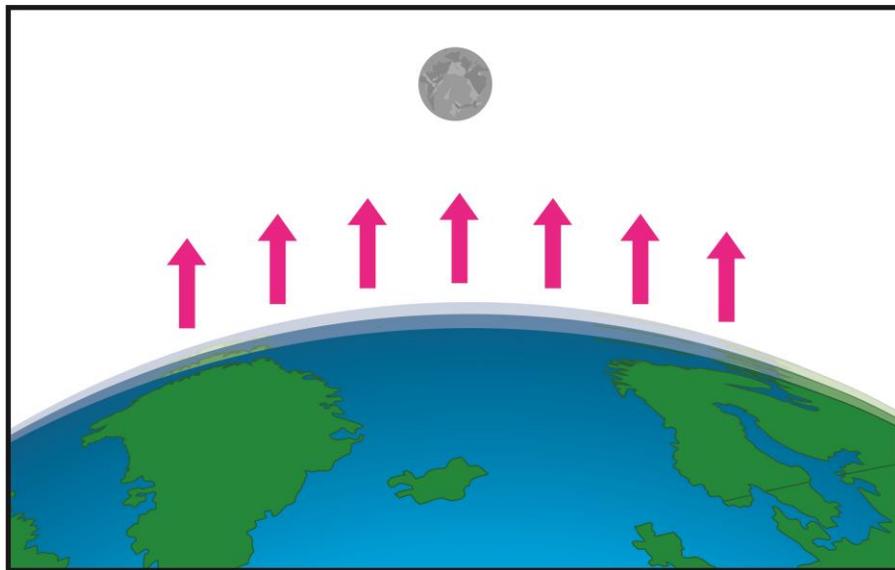


Fig. 4.1 Diagrama de una marea terrestre ocasionada por la acción gravitatoria de la Luna sobre la Tierra.

El origen del fenómeno de las mareas terrestres es simple. Cada punto de la superficie terrestre está sometido a la atracción de toda la masa del planeta y de la fuerza centrífuga de su rotación. La resultante de estas dos fuerzas es un vector cuyo

módulo define la intensidad de la gravedad en cada punto, y su dirección la de la dirección de la vertical del lugar.

La existencia de los potenciales gravitatorios lunar y solar, variables con la distancia entre el astro que lo crea y el punto a considerar, origina una fuerza perturbadora variable, cuyo efecto es que tanto la dirección como la intensidad de la gravedad de un lugar no sean rigurosamente constantes, sino que, por el contrario, varíen con el tiempo **(Machín, 1969)**.

Si la Tierra fuese perfectamente rígida, se podrían medir con toda exactitud las perturbaciones pequeñas. Sin embargo, al tener la Tierra una cierta viscosidad y elasticidad, aparecen deformaciones de tipo elástico que afectan a la amplitud de las perturbaciones, y originan tensiones internas y variaciones volumétricas y periódicas en el planeta.

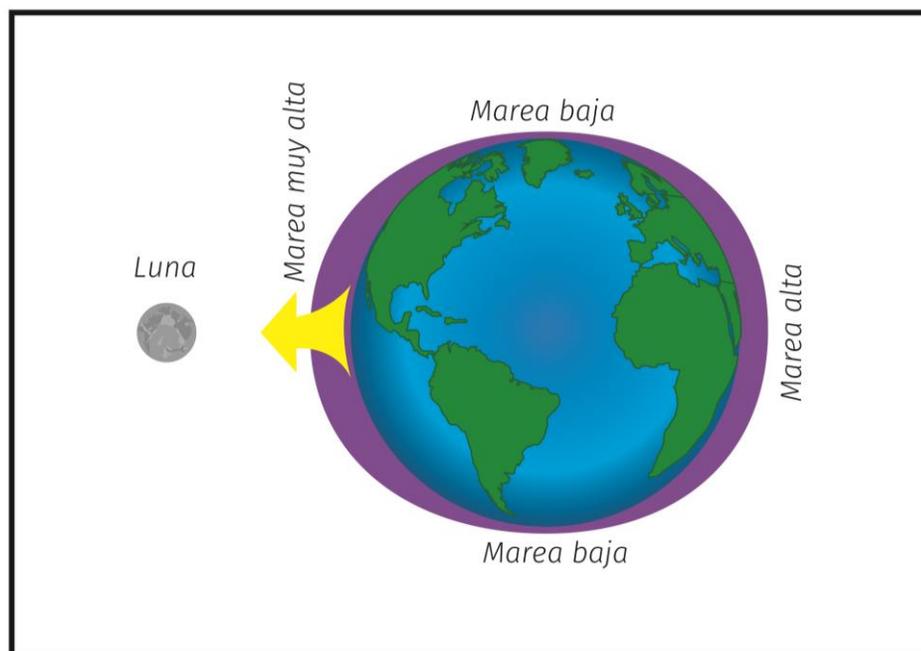


Fig. 4.2 La atracción gravitacional de la Luna es la fuerza principal de marea (Imagen modificada de education.nationalgeographic.org/media/earths-tides).

Las deformaciones causadas por la acción gravitatoria de la Luna y el Sol no son homogéneas, es decir, dependiendo de la zona específica existirá una mayor o menor deformación. Por todo lo anterior, el estudio del fenómeno de mareas terrestres y sus efectos se convierte en una herramienta eficaz que permitirá determinar ciertas características elásticas de la Tierra.

La mayor influencia en las mareas terrestres la origina la Luna (**Fig. 4.2**), sin embargo, el Sol también genera considerables fuerzas de marea. Las mareas solares son aproximadamente la mitad del tamaño de las mareas lunares y se expresan como una variación de los patrones de las mareas lunares, no como un conjunto separado de mareas (**Sumich, 1996**).

En conjunto, la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol afectan las mareas de la Tierra sobre una base mensual. Cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineados, como se aprecia en la **Fig. 4.3** (luna nueva o llena), la marea solar tiene un efecto aditivo sobre la marea lunar; en este caso la amplitud de las mareas es máxima y toman el nombre de mareas vivas.

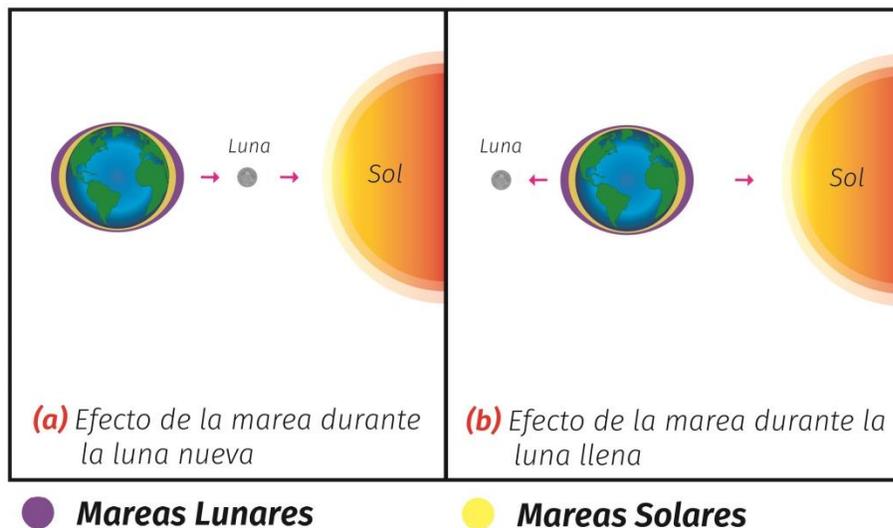


Fig. 4.3 La alineación del Sol, la Luna y la Tierra origina las mareas vivas, también llamadas mareas de sicigias.

Una semana más tarde, cuando el Sol y la Luna están en ángulo recto entre sí (**Fig. 4.4**), la marea solar anula parcialmente la marea lunar y la amplitud de las mareas es mínima (cuartos menguantes y cuartos crecientes); en este caso se conocen como mareas muertas. Durante cada mes lunar, ocurren dos mareas vivas y dos mareas muertas.

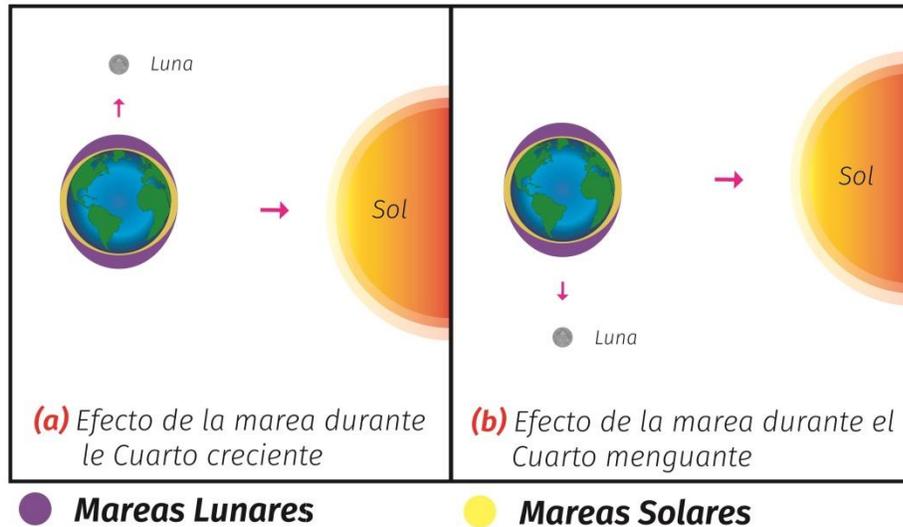


Fig. 4.4 Cuando el Sol y la Luna se encuentran en ángulo recto entre sí se originan las mareas muertas, también llamadas mareas de cuadratura.

Dependiendo de la ubicación en la Tierra, existen tres patrones básicos de marea:

Marea diurna. Se presenta un ciclo de marea diurna si se experimenta una marea alta y una marea baja cada día lunar. Un día lunar cuenta con 24 horas y 50 minutos. Este comportamiento se representa en la **Fig. 4.5**.

Marea semidiurna. Se presenta si se experimentan dos mareas altas y dos mareas bajas, de aproximadamente el mismo tamaño cada día lunar. Este comportamiento se representa en la **Fig. 4.6**.

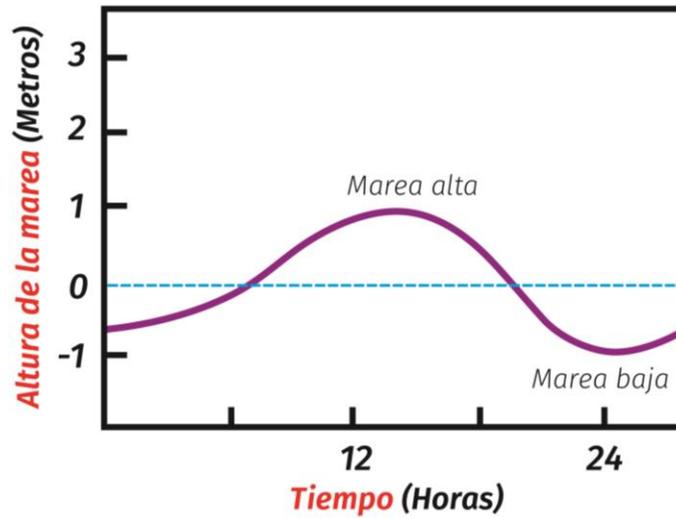


Fig. 4.5 Gráfica que muestra el comportamiento de un registro de marea diurna (Imagen modificada de: oceanservice.noaa.gov/education/kits/tides).

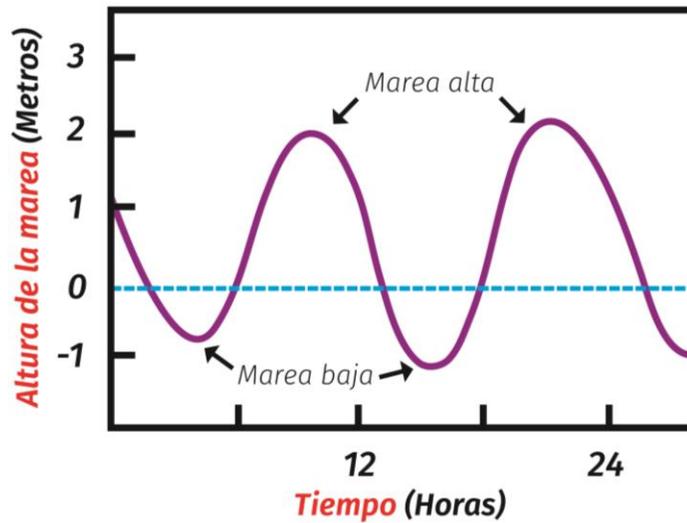


Fig. 4.6 Gráfica que muestra el comportamiento de un registro de marea semidiurna (Imagen modificada de: oceanservice.noaa.gov/education/kits/tides).

Marea semidiurna mixta. Este ciclo se presenta si se experimentan dos mareas altas y dos mareas bajas de diferente tamaño en un día lunar, lo cual está representado en la **Fig. 4.7.**

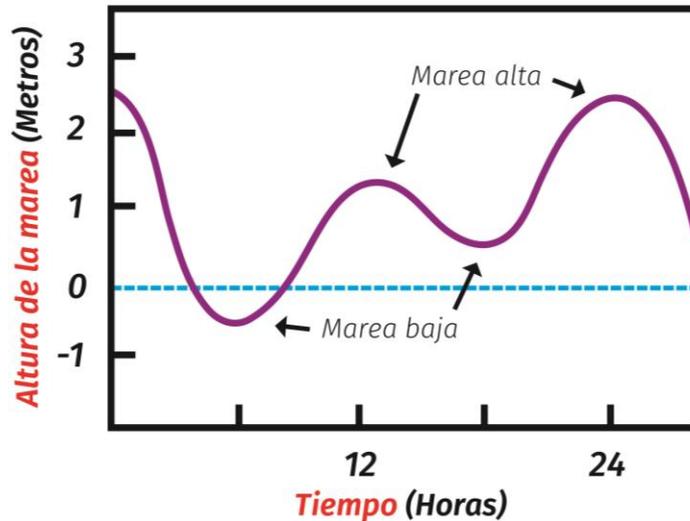


Fig. 4.7 Gráfica que muestra el comportamiento de un registro de marea semidiurna mixta (Imagen modificada de: oceanservice.noaa.gov/education/kits/tides).

Las primeras aplicaciones prácticas de la observación de los efectos de la marea terrestre se llevaron a cabo en el campo de la hidrología, principalmente por **(Bredehoeft, 1967)**, **(Bodvarsson, 1970)** y **(Robinson y Bell, 1971)**, quienes demostraron la existencia de una relación entre las características de la roca y la amplitud de la respuesta del sistema.

Como se ha establecido, en yacimientos de petróleo, se ha observado que en ocasiones los datos adquiridos durante las pruebas de presión muestran pequeñas, pero fácilmente observables, variaciones de presión con un comportamiento periódico definido. Estas fluctuaciones periódicas generalmente ocurren en una escala de tiempo semi-diurna (repetiendo cada medio día) y otras en una escala diurna (repetiéndose diariamente). En muchos casos el origen de la variación sinusoidal en la presión de

yacimientos, observada en los datos de pruebas en pozos, es coincidente con la variación periódica en el potencial gravitatorio impuesto a la Tierra por la Luna y el Sol.

Las oscilaciones inducidas por las mareas se distinguen por un patrón característico que refleja una combinación de varias frecuencias presentes en la señal. Para los pozos en alta mar, el patrón característico de las oscilaciones de las mareas se puede observar fácilmente en los datos de presión medidos, inducidas por el cambio de nivel del agua (mareas oceánicas).

La señal de presión oscilante en la profundidad del yacimiento, sin embargo, tiene una amplitud mucho más pequeña y presenta un retardo en el tiempo, en comparación con la señal en el fondo del mar. La atenuación de la amplitud y la relación de la amplitud en el yacimiento con la amplitud en el fondo del mar, son una función de la compresibilidad total del yacimiento y el tiempo de retraso es una función de la permeabilidad de la formación **(Levitan y Phan, 2003)**.

El mecanismo de las oscilaciones de presión inducidas por las mareas en yacimientos en tierra es diferente. El efecto combinado de las fuerzas gravitatorias inducido por la Luna y el Sol a la Tierra causan deformaciones periódicas en la corteza terrestre (mareas terrestres). Esto a su vez provoca una expansión y contracción del yacimiento, que resulta en oscilaciones de la presión de poro. Las deformaciones son proporcionales a la variación de la combinación de las fuerzas gravitacionales: el potencial de marea.

Las mareas terrestres activan el movimiento de los fluidos en la formación del subsuelo, y como se ha mencionado, este movimiento se detecta como dos contribuciones a la presión medida en los pozos: la primera es referente al nivel del fluido y la segunda es un desfase entre las fuerzas de marea y el movimiento hidráulico en el subsuelo.

En cierto sentido, el potencial de marea es equivalente a las oscilaciones de presión en el fondo del mar para el caso de yacimientos costa fuera; por lo tanto, la relación de la señal de presión inducida en el yacimiento y la fuerza que causa estas oscilaciones (potencial de marea), es una función de la compresibilidad del yacimiento.

Similarmente, el tiempo de retraso entre el potencial de marea y la respuesta de presión en el yacimiento es una función de la permeabilidad de la formación **(Levitan y Phan, 2003)**.

Para identificar la amplitud de la variación de presión debida a los efectos de marea en pozos de yacimientos, se requieren mediciones de alta resolución. Además de que se ha establecido que en los puntos localizados cerca del ecuador (entre el trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio), las variaciones del potencial gravitatorio son más significantes.

Tomando en cuenta lo descrito anteriormente, se puede afirmar que la identificación de los efectos de mareas en los datos de presión medidos durante una prueba de pozo, pudiera ofrecer un medio para determinar la compresibilidad y la permeabilidad de la formación de un yacimiento. Si además los datos de presión obtenidos son de buena calidad, y las variaciones de las mareas inducidas son claras, la correspondencia entre el potencial gravitacional y la respuesta asociada debe ser lo suficientemente clara para poder obtener confiables al momento de procesar los datos.

CAPÍTULO V. CONCEPTOS BÁSICOS DE ASTRONOMÍA

Para poder comprender de una mejor manera el modelo matemático para la obtención del efecto de las mareas terrestres actuando en un punto sobre la Tierra, es necesario el conocimiento de ciertos conceptos básicos de astronomía, los cuales se presentan a continuación:

V.1 Movimientos de la Tierra

La Tierra, como los demás cuerpos celestes, no se encuentra en reposo, sino que está sujeta a ciertos movimientos, siendo los más importantes: la rotación, la translación, la precesión y la nutación.

El **movimiento de rotación** de la Tierra tiene una duración de 23 horas 56 minutos, que es el tiempo que la Tierra tarda en dar una vuelta completa alrededor de su eje, en dirección Oeste – Este, en sentido contrario al de las manecillas del reloj, como se muestra en la **Fig. 5.1**.

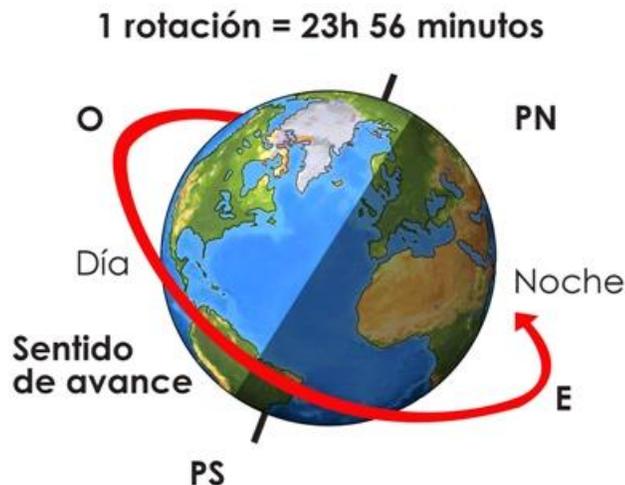


Fig. 5.1 El movimiento de rotación de la Tierra tiene una duración de 23 horas y 56 minutos, provocando la sucesión de días y noches.

El **movimiento de traslación** tiene una duración de 365 días, 5 horas y 57 minutos, durante el cual, el planeta describe una trayectoria elíptica (**Fig. 5.2**) de 930 millones de kilómetros alrededor del Sol. La distancia media entre el Sol y la Tierra asciende a 150 millones de kilómetros, lo que se conoce como una Unidad Astronómica.

La excentricidad (variación de la forma) de la órbita terrestre causa la variación de la distancia entre la Tierra y el Sol en el transcurso de un año. A principios del mes de enero la Tierra alcanza su máxima proximidad al Sol (147.09 millones de kilómetros) y se dice que pasa por el *perihelio*, mientras que a principios del mes de Julio llega a su máxima lejanía encontrándose en el *afelio* (152.10 millones de kilómetros).

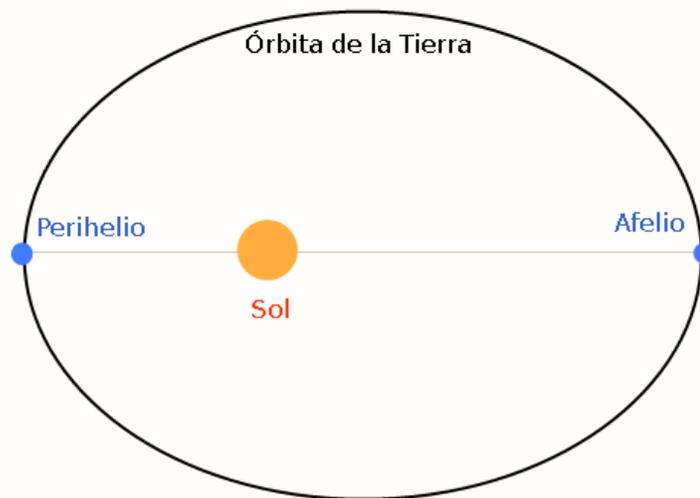


Fig. 5.2 En el movimiento de traslación de la Tierra, el Perihelio es el punto más cercano al Sol, mientras que el Afelio es el más lejano.

Si la Tierra fuera totalmente esférica solamente realizaría los movimientos de rotación y traslación, pero al ser un elipsoide de forma irregular, achatado por los polos, la atracción gravitacional del Sol y la Luna, y en menor medida de los planetas, provoca un cambio lento y gradual en la orientación del eje de la Tierra. Este movimiento recibe el nombre de **movimiento de precesión** o **precesión de los equinoccios** y se efectúa en sentido inverso al de rotación; es decir en sentido

retrógrado (sentido de las manecillas del reloj). El movimiento de precesión causa que la posición que indica el eje de la Tierra en la esfera celeste se desplace alrededor del polo de la eclíptica, trazando un cono y recorriendo una circunferencia completa cada 25776 años, periodo conocido como año platónico.

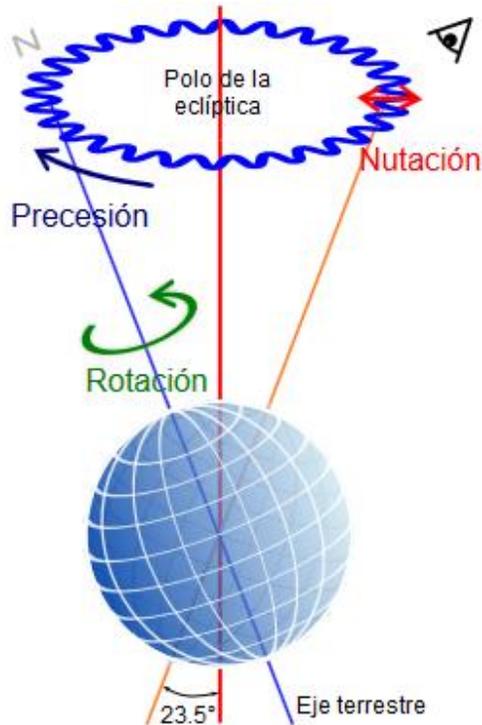


Fig. 5.3 Movimientos de precesión y nutación de la Tierra (Imagen tomada de es.wikipedia.org/wiki/Precesión_de_los_equinoccios).

Un segundo movimiento, que se superpone con el de precesión, es el **movimiento de nutación**, un movimiento pequeño de vaivén en el movimiento cónico de precesión, provocado por la atracción de la Luna y el Sol sobre el abultamiento ecuatorial de la Tierra, produciéndose cada 18.6 años. Estos movimientos están representados en la **Fig. 5.3**.

V.II Sistemas de coordenadas

Una parte importante en el estudio de la Tierra es el poder conocer la ubicación de un punto exacto, ya sea sobre la superficie de la Tierra o fuera de ella, para lo cual es necesario un sistema de referencia y por lo tanto un sistema de coordenadas.

Para situar un punto sobre la superficie terrestre, se utilizan las **coordenadas geográficas (Fig. 5.4)**, las cuales suponen que la Tierra es una esfera perfecta, denominada esfera terrestre.

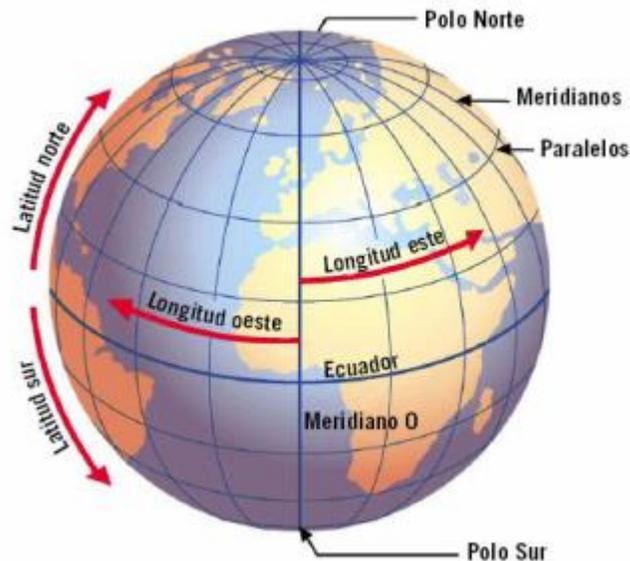


Fig. 5.4 Las coordenadas geográficas se utilizan para situar un punto en la esfera terrestre.

Las coordenadas geográficas son aquellas que indican la posición de un punto sobre la superficie terrestre y se determinan por dos coordenadas angulares, latitud (Norte y Sur) y longitud (Este y Oeste).

La latitud mide el ángulo entre cualquier punto y el ecuador, medida sobre el meridiano que pasa por ese punto. Las líneas de latitud se denominan paralelos.

Según el hemisferio en el que se sitúe el punto, puede ser latitud norte o sur. Todos los puntos ubicados sobre el mismo paralelo tienen la misma latitud. Se mide en grados sexagesimales, de 0° a 90° , y pueden representarse de dos formas:

- Indicando a que hemisferio pertenece la coordenada.
- Anteponiendo el signo $+$, si el punto está situado en el norte, o el signo $-$, si el punto se encuentra en el sur.

Así, diez grados de latitud norte se pueden representar como 10°N , $+10^\circ$ o simplemente 10° ; mientras que diez grados de latitud sur se representan como 10°S o -10° .

Por otra parte, la longitud mide el ángulo a lo largo del Ecuador, desde cualquier punto de la Tierra. Las líneas de longitud son los meridianos. Habitualmente en la actualidad el meridiano base es el meridiano de Greenwich. La longitud se mide en grados sexagesimales, existiendo varias maneras de medirla y expresarla:

- Entre 0° y 360° , aumentando hacia el Este del meridiano 0°
- Entre 0° y 180° , indicando a qué hemisferio pertenece, Este (E) u Oeste (O (Oeste) o W (West)).
- Entre 0° y 180° positivos (Este) o negativos (Oeste).

De esta manera noventa grados longitud este puede representarse como 90° , 90°E o $+90^\circ$; y noventa grados longitud oeste pueden ser representados como 270° , 90°O o -90° .

En el caso del estudio de las posiciones aparentes y movimientos de los cuerpos celestes, se emplea la esfera celeste, en cuya superficie, se fijan líneas y puntos principales respecto a los cuales se efectúa las mediciones correspondientes. Se

denomina esfera celeste a la esfera imaginaria de radio arbitrario, con centro en un punto cualquiera del espacio, en la cual aparentemente se mueven los astros.

Para determinar la posición de un objeto en la esfera celeste, se recurre a las **coordenadas celestes**. Existen diversas coordenadas celestes según sea su origen y plano de referencia.

Clasificación de los sistemas de coordenadas celestes

- **Según el sistema de coordenadas**
 - *Sistemas basados en coordenadas cartesianas.* Se toman tres ejes XYZ, perpendiculares entre sí, que se cruzan en un punto origen.
 - *Sistemas basados en coordenadas esféricas.* Para situar un punto se necesitan dos ángulos y una distancia
- **Según la posición del observador**
 - *Coordenadas topocéntricas.* Su centro es el propio observador.
 - *Coordenadas geocéntricas.* Centradas en el centro de la Tierra.
 - *Coordenadas heliocéntricas.* El centro de referencias es el Sol.
 - *Coordenadas baricéntricas.* Su origen es el centro de masas del Sistema Solar.
 - *Coordenadas galácticas.* Se centran en el centro de nuestra galaxia, ubicada en la constelación de Sagitario.
- **Según el plano de referencia**
 - *Coordenadas horizontales.*
 - Plano de referencia: el horizonte del observador
 - Origen: topocéntrico
 - Coordenadas: azimut y altura o distancia
 - *Coordenadas horarias.*
 - Plano de referencia: el ecuador celeste y el meridiano celeste
 - Origen: topocéntrico
 - Coordenadas: ángulo horario y declinación

- *Coordenadas ecuatoriales.*
 - Plano de referencia: el ecuador celeste
 - Origen: geocéntrico
 - Coordenadas: ascensión recta y declinación
- *Coordenadas eclípticas*
 - Plano de referencia: la eclíptica
 - Origen: geocéntrico o heliocéntrico
 - Coordenadas: longitud y latitud celestes
- *Coordenadas galácticas*
 - Plano de referencia: el plano de la Vía Láctea.
 - Origen: el centro de la Vía Láctea
 - Coordenadas: longitud galáctica y latitud galáctica.

En particular, las **coordenadas ecuatoriales** son un tipo de coordenadas celestes que determinan la posición de un objeto en la esfera celeste, respecto al ecuador celeste y al equinoccio vernal (punto Aries).

El equinoccio vernal es el punto de intersección de la eclíptica con el plano ecuatorial celeste, por dónde el Sol pasa de Sur a Norte de este plano en su movimiento aparente por la eclíptica, mientras que el ecuador celeste es el círculo que resulta de la intersección del plano ecuatorial terrestre con la esfera celeste. Ésta y la Tierra, son concéntricas. Prolongando el eje de rotación de la Tierra se encuentra el eje del mundo, o eje de rotación del movimiento diurno.

Las coordenadas ecuatoriales están constituidas por la declinación y la ascensión recta, que son equivalentes a la latitud y longitud geográficas (Ver **Fig. 5.5**).

La ascensión recta (AR), denotada por α , es el ángulo, medido sobre el ecuador celeste, abarcado entre el Punto Aries (equinoccio vernal) y el círculo horario o meridiano, que pasa por el objeto observado. Equivale a la longitud geográfica. Su

sentido positivo es el directo o antihorario, el mismo de la rotación terrestre vista desde el polo Norte. Sus unidades son las angulares, expresadas en horas: 24 horas corresponden a 360° . Es decir que 1 hora equivalen a 15° , ó 1° equivale a 4 minutos horarios.

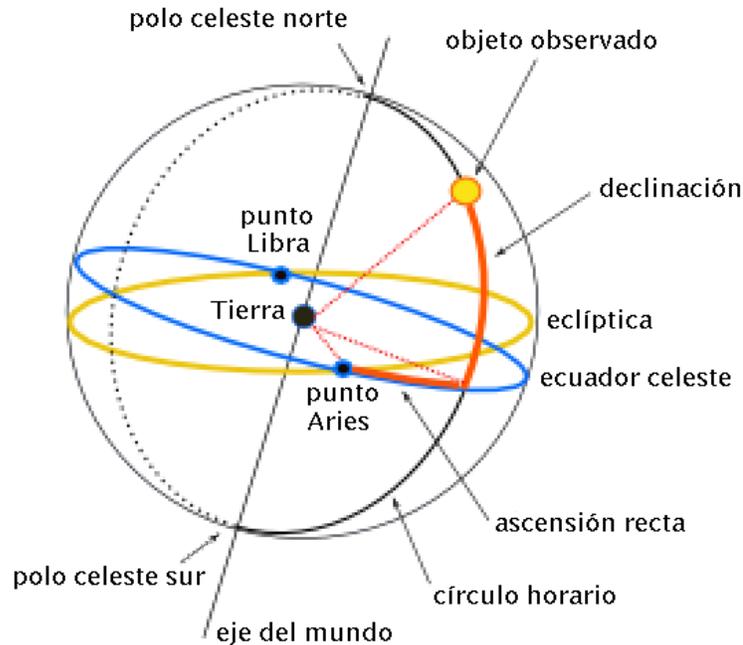


Fig. 5.5 Sistema de coordenadas ecuatoriales constituidas por la ascensión recta y la declinación.

La declinación, denotada por δ , es el ángulo que forman el ecuador celeste y el objeto. Para objetos situados entre el ecuador y el polo norte, la declinación es positiva y, en caso contrario, negativa. Equivale a la latitud geográfica.

Si tres puntos de la superficie esférica (A, B y C en la **Fig. 5.6**) se unen por arcos de círculo máximo menores a 180° , la figura obtenida se denomina **triángulo esférico**. En el triángulo esférico los ángulos cumplen que $180^\circ < \alpha + \beta + \gamma < 540^\circ$.

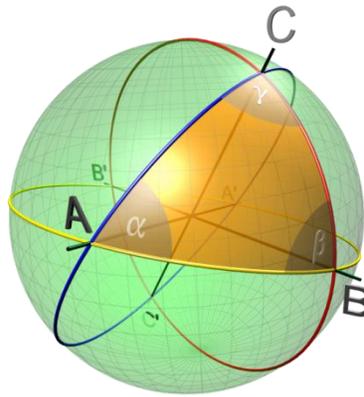


Fig. 5.6 Triángulo esférico formado por los puntos A, B y C.

Para la resolución del triángulo esférico es necesario recurrir a la trigonometría esférica, por ejemplo al teorema del seno, del coseno, fórmulas de Bessel, etc..., las cuales pueden consultarse en cualquier tratado de trigonometría esférica.

CAPÍTULO VI. DESARROLLO DEL MODELO COMPUTACIONAL

Para el desarrollo del modelo computacional se hizo uso del software matemático **Matlab** (abreviatura de Matrix Laboratory, “laboratorio de matrices”), herramienta que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE), con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

El modelo a desarrollar está basado en el cálculo del potencial gravitacional tanto para el Sol como para la Luna. La suma de estos potenciales se comparará con las fluctuaciones de presión registradas en un pozo de observación de un yacimiento naturalmente fracturado, para finalmente calcular la compresibilidad total de la formación. De esta manera, se pueden observar tres etapas fundamentales que conformarán el modelo computacional:

- Análisis de datos de presión
- Cálculo del potencial gravitacional
- Estimación de la compresibilidad total de la formación

Se hace la observación que para el caso del cálculo del potencial gravitacional se hará uso de terminología especializada, por lo que para un mayor entendimiento, se cuenta con un capítulo introductorio (**Capítulo V**) así como con un **Glosario Astronómico** en la parte final del trabajo.

VI.I Análisis de datos de presión

El análisis de los datos tiene como finalidad determinar los efectos periódicos de la presión, debidos al efecto de las mareas terrestres.

Es habitual cuando se quiere analizar un flujo de datos cuyo comportamiento clave es periódico utilizar la transformada de Fourier; sin embargo, en el caso que se está tratando, dado que las influencias astronómicas que generan las fluctuaciones potenciales gravitacionales se conocen con gran precisión, no es necesario ajustar los modelos a través de la utilización del análisis de Fourier, debido a que la información sería redundante y el procedimiento sería equivalente a la amplificación innecesaria del ruido.

Para determinar los efectos periódicos de la presión se utilizó un método basado en el promedio móvil y en un ajuste de regresión polinomial. La manera en que se llevó a cabo el análisis de los datos fue la siguiente:

1. Se debe llevar a cabo un análisis minucioso de los datos obtenidos de las pruebas de presión, ya que deben presentar el menor ruido posible. En caso de que las medidas de presión contengan más de un dato por minuto, deben reducirse, lo cual se hará tomando el promedio de presión dentro del rango elegido; de esta manera se suaviza la curva y se disminuye el riesgo de error.
2. Se eliminarán los valores de presión correspondientes tanto a la bajada como a la subida del sensor y algunos puntos individuales, que pudieran estar fuera del patrón de presión medido.
3. En caso de considerar que la gráfica resultante de los pasos anteriores todavía tenga ruido, se utilizará el método de promedio móvil de 24 horas de cada punto (tomando en cuenta 12 horas antes y 12 horas después) para suavizar nuevamente los datos.
4. Con los datos de presión resultantes se llevará a cabo el ajuste de regresión polinomial.

- Finalmente se obtendrá el efecto periódico graficando la diferencia entre presiones medidas (datos sin efecto de sensor vs tiempo) y presiones calculadas (ajuste polinomial vs tiempo).

Se hace la observación de que el análisis de los datos del programa, se debe llevar a cabo de forma directa por el usuario ya que la interpretación de la mayoría de las gráficas es cien por ciento visual. En la **Fig. 6.1** se muestra un poco del código realizado para el análisis de los datos de presión.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
EFFECTOS PERIÓDICOS DE LA PRESIÓN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% GRÁFICA 1
%% Datos originales
DAT = textread('PC115_06.tx
Presion = DAT(:,2);
no = size(Presion,1);
Tiempo = 1:no;
subplot(2,2,1)
plot(Tiempo,Presion)
title('Datos originales Pue
ylabel('Presión (psi)')
set(gca,'xtick',[6637 23921
set(gca,'xticklabel',{'10Fe
grid on

%% Datos sin valores de pre
subplot(2,2,2)
plot(Tiempo,Presion)
title('Datos sin valores de
ylabel('Presión (psi)')
set(gca,'xtick',[4785 22065
set(gca,'xticklabel',{'10Fe
grid on

%% GRÁFICA 2
%% PROMEDIO MOVIL Y Regresión Polinomial
subplot(2,2,1)
plot(Tiempo,Presion, 'b-')
title('Datos considerando Promedio Movil Y su Regresión
ylabel('Presión (psi)')
set(gca,'xtick',[400 1840 3280 4720])
set(gca,'xticklabel',{'11Feb','12Feb','13Feb'})

%% GRÁFICA 3
ylim = [12220,12224];
yticks = [12220:.5:12224];
ytickslabel = {'12220','12220.5','12221','12221.5',
y1string = 'Presión (psi)';
y2lim = [-0.10,0.06] ;
y2ticks = [-0.10:0.02:0.06];
y2tickslabel = {'-0.1','-0.08','-0.06','-0.04','-0.02'};
y2string = 'Delta Presión (psi)';
xlim = [0,5777];
xticks = [400 1840 3280 4720];
xtickslabel = {'10Feb','11Feb','12Feb','13Feb'};
x1string = 'Tiempo';
color1 = [0 0 0];
color2 = [0 0 0];
axes1 = axes('Parent',figure1,...
'YTick',yticks,'YTickLabel',ytickslabel,...
'XTick',[],...
'ColorOrder',[color2; color1],...
'YColor',color1,...
'FontSize',10);
    
```

Fig. 6.1 Ejemplo del código utilizado para la generación de la sección de análisis de datos.

VI.II Cálculo del potencial gravitacional

La mejor forma de abordar, tanto cualitativa como cuantitativamente el fenómeno de las mareas terrestres, es mediante el estudio del potencial del que deriva la fuerza generadora de la deformación.

La deducción que se presenta a continuación de la ecuación para el cálculo del potencial, se puede ver con mayor detalle en el artículo “*Gravitational Potential Variations of the Sun and Moon for Estimation of Reservoir Compressibility*”, de Chang y Firoozabadi.

La expresión para el potencial se calcula directamente a partir de la Ley de Newton de la atracción gravitatoria entre dos masas, requiriéndose únicamente los datos de las masas y las distancias de separación entre ellas (las cuales son funciones del tiempo). Estas cantidades se conocen con una gran precisión, tanto a partir de cálculos astronómicos como de las observaciones que comprenden más de un siglo.

El potencial gravitacional o potencial gravitatorio en un punto, se define formalmente como el trabajo por unidad de masa que una fuerza debe realizar para transportar un cuerpo a velocidad constante, desde el infinito, hasta un punto considerado del campo gravitatorio. Para una masa puntual m , el potencial gravitacional V está dado por la expresión siguiente:

$$V = \frac{Gm}{l}, \quad (6.1)$$

donde G es la constante de gravitación universal, y l la distancia del punto de interés a la masa puntual.

Ahora, como se muestra en la **Fig. 6.2**, se considera un punto P sobre la Tierra (de distancia r a partir del centro de la Tierra). El potencial en el punto P debido al cuerpo perturbador, con masa m , se expresa por medio de la ecuación 6.2.

$$V = Gm \left(\frac{1}{l} - \frac{1}{R} - \frac{r \cos \theta}{R^2} \right) \quad (6.2)$$

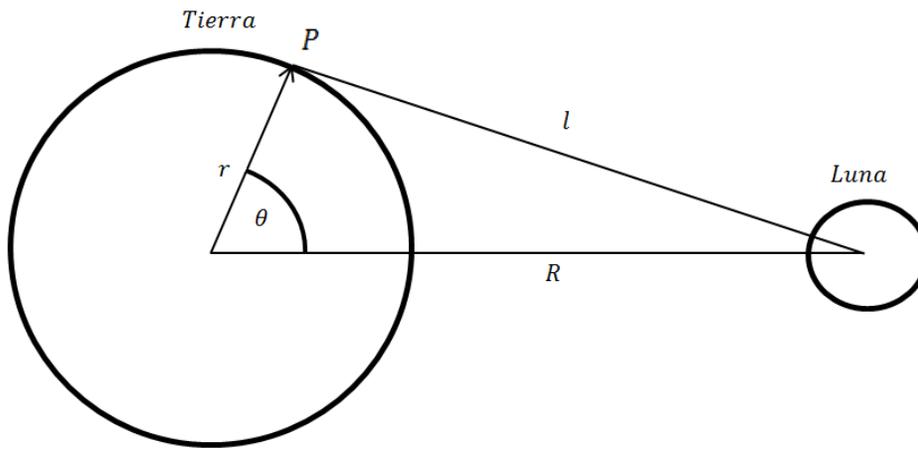


Fig. 6.2 Sistema Tierra – Luna.

El cuerpo perturbador puede ser la Luna o el Sol. Cuando se consideran tanto el Sol como la Luna, el potencial total será:

$$V = V_m + V_s, \quad (6.3)$$

donde V_m es el potencial lunar y V_s el potencial solar. La adición simple de estos potenciales es suficiente, ya que la ecuación para la determinación de la respuesta de dilatación es lineal, y puede aplicarse el principio de superposición.

Del triángulo en la **Fig. 6.2** se tiene $l^2 = R^2 + r^2 - 2rR \cos \theta$. Combinando la expansión de esta expresión y notando que $\frac{r}{R} \approx \frac{1}{60}$ para la Luna y $\frac{r}{R} \approx \frac{1}{23600}$ en el caso del Sol, en combinación con la ecuación (6.2):

$$V = \frac{3 Gm}{4 R} \left(\frac{r^2}{R^2} \right) \left[\left(\cos 2\theta + \frac{1}{3} \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{r}{R} \right) (5 + \cos 3\theta + 3 \cos \theta) + \dots \right]. \quad (6.4)$$

Utilizando la definición del número de Doodson (Ver **Apéndice A**):

$$N_D = \frac{3}{4} Gm \left(\frac{r^2}{c^3} \right), \quad (6.5)$$

donde c es la distancia media a partir del centro de la Tierra al centro del cuerpo perturbador; entonces:

$$V = N_D \left(\frac{c}{R} \right)^3 \left[\left(\cos 2\theta + \frac{1}{3} \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{r}{R} \right) (5 + \cos 3\theta + 3 \cos \theta) + \dots \right]. \quad (6.6)$$

La contribución del primer término de V en la ecuación anterior se denotará por V_2 , es decir:

$$V_2 = N_D \left(\frac{c}{R} \right)^3 \left(\cos 2\theta + \frac{1}{3} \right). \quad (6.7)$$

El segundo término se representará por V_3 . Se tiene que V_3 es más pequeño que V_2 por un factor de aproximadamente el radio de la Tierra a la distancia de separación; esto es 1/45 el tamaño de V_2 para la Luna y aún menor para el caso del Sol.

La ecuación (6.7) es todavía inconveniente de utilizar, ya que θ (ver Fig. 6.2) depende tanto del punto de observación P como de la posición de la Luna. Es deseable separar esta dependencia mediante la transformación en coordenadas esféricas

geocéntricas, lo que puede llevarse a cabo utilizando la fórmula fundamental del triángulo de posición de la geometría esférica.

$$\cos \theta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos(\tau_1 - 180^\circ) \quad (6.8)$$

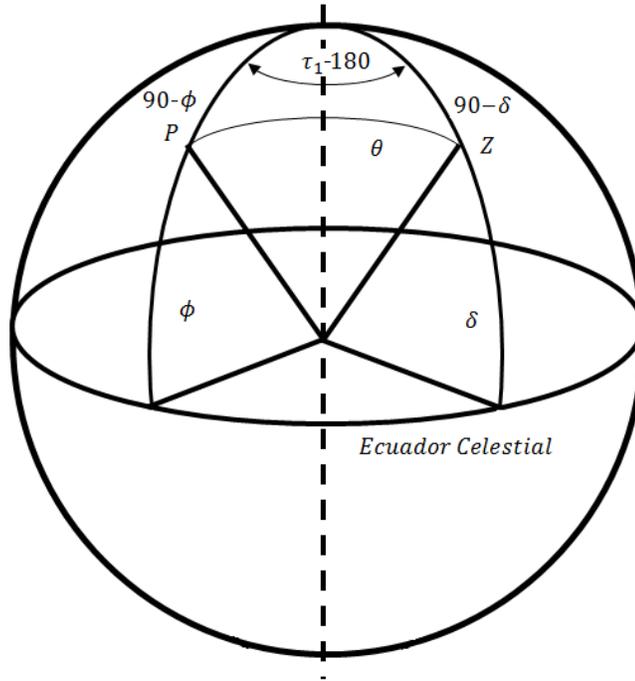


Fig. 6.3 Coordenadas geocéntricas.

En el nuevo sistema de coordenadas (ver **Fig. 6.3**) la ecuación (6.7) se expresa por medio de la ecuación 6.9.

$$V_2 = N_D \left(\frac{c}{R}\right)^3 \left[3 \left(\frac{1}{3} - \sin^2 \delta\right) \left(\frac{1}{3} - \sin^2 \phi\right) - \sin 2\phi \sin 2\delta \cos \tau_1 + \cos^2 \phi \cos^2 \delta \cos 2\tau_1 \right]. \quad (6.9)$$

El primer término de la ecuación anterior representa la excitación de largo periodo, mientras que el segundo y tercer término representan las excitaciones diurnas y

semidiurnas, respectivamente. La declinación se denota por δ , ϕ es la latitud, y $\tau_1 - 180^\circ$ es el ángulo horario en la esfera celeste de la Luna. Para la evaluación de esta expresión se requiere la localización del punto de observación (latitud y longitud), la fecha en la que se llevó a cabo la prueba y su tiempo de duración.

Para la determinación de los parámetros astronómicos que intervienen en la ecuación 6.9, se recurrió al libro “*Astronomical Algorithms*” (Meeus, 1991), en el cual se pueden encontrar los algoritmos para la obtención de estos parámetros. Para tener una confiabilidad de los resultados obtenidos se hará uso del software astronómico “*Alcyone Ephemeris*” (Fig. 6.4).

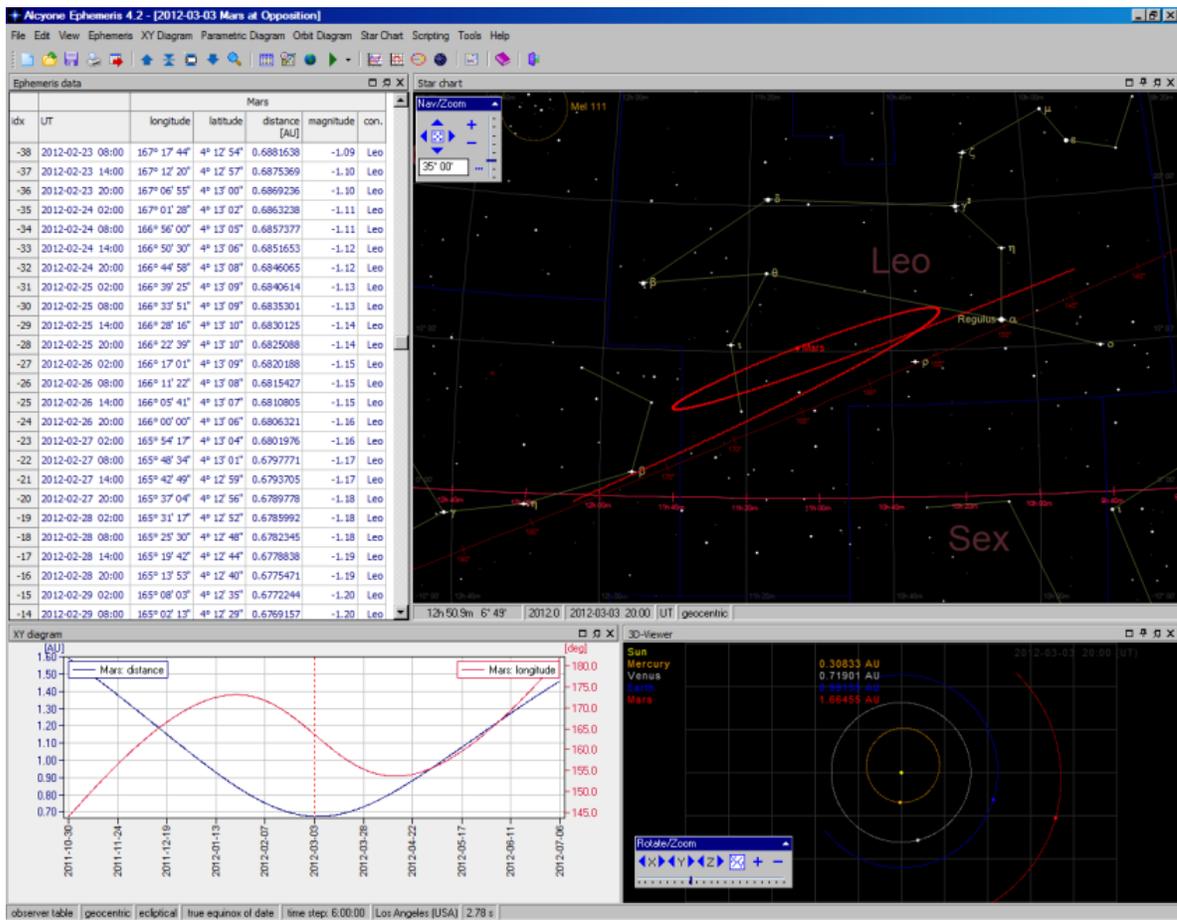


Fig. 6.4 Software *Alcyone Ephemeris*, en su versión 4.2.

potencial gravitacional, la Tierra se distorsiona a un esferoide alargado, cuyo eje más largo apunta a la Luna, como se observa en la **Fig. 6.6**.

Con la finalidad de relacionar el potencial gravitacional con el cambio de presión observado en el yacimiento, es necesario conocer la “deformación” resultante del volumen de la Tierra.

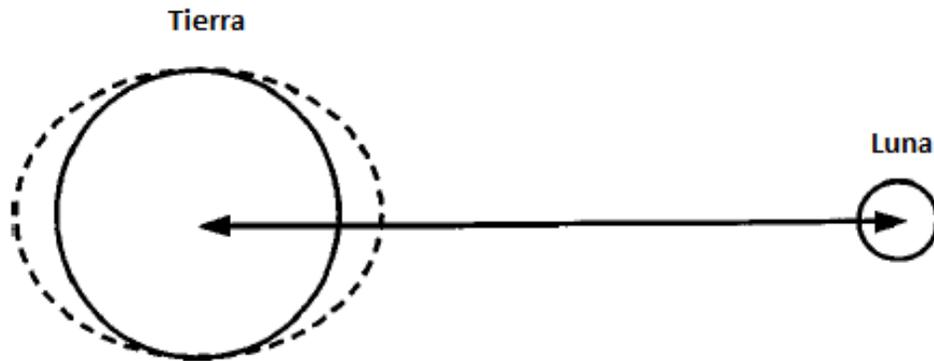


Fig. 6.6 En presencia de un potencial gravitacional la Tierra se distorsiona a un esferoide alargado, cuyo eje más largo apunta a la Luna.

La tensión o el estrés, σ , es una fuerza aplicada a una superficie, causando su deformación. La tensión se define como:

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A}. \quad (6.10)$$

En un sistema de coordenadas cartesianas, el tensor de tensiones tiene componentes en las tres direcciones, de la forma siguiente:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}. \quad (6.11)$$

Los componentes de la diagonal del tensor de tensiones se conocen como *tensiones normales*, debido a que la superficie a la cual se aplican es perpendicular a los ejes. Los demás componentes se llaman *tensiones cizallantes* o de corte, porque representan las fuerzas que tienden a deslizar o cizallar el material en el plano de ΔA .

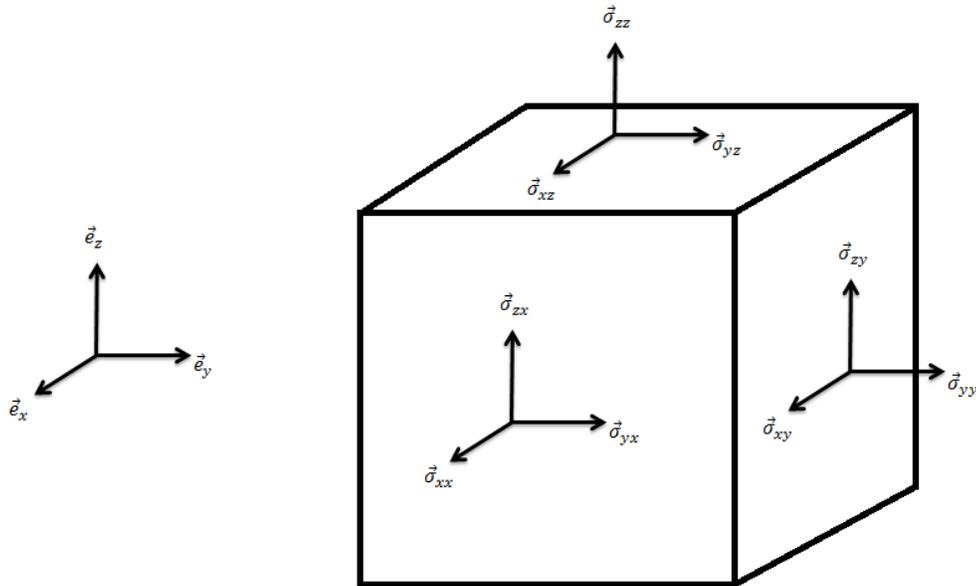


Fig. 6.7 Representación gráfica de las componentes del tensor tensión en una base ortogonal.

Una propiedad importante del tensor de tensiones es su simetría; es decir:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (6.12)$$

El tensor de tensiones σ_{ij} , se puede descomponer en la suma de otros dos tensores: el tensor volumétrico (también conocido como tensor hidrostático) y el tensor desviador. El tensor volumétrico se define como:

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}). \quad (6.13)$$

Las componentes del tensor desviador se definen de la forma siguiente:

$$\begin{aligned}
 S_{xx} &= \sigma_{xx} - \sigma_{\alpha\alpha} \\
 S_{yy} &= \sigma_{yy} - \sigma_{\alpha\alpha} \\
 S_{zz} &= \sigma_{zz} - \sigma_{\alpha\alpha} \\
 S_{xy} &= \sigma_{xy} \\
 S_{xz} &= \sigma_{xz} \\
 S_{yz} &= \sigma_{yz}.
 \end{aligned}
 \tag{6.14}$$

Si la tensión se aplica a un material que no es rígido, los puntos en su interior se moverán con respecto a otro, por lo que el cuerpo se deforma. La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo, debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo. La deformación puede tener lugar según diversos modos y en diversas direcciones, y puede además provocar distorsiones en la forma del cuerpo; en esas condiciones la deformación de un cuerpo se puede caracterizar por un tensor (más exactamente un campo tensorial) de la forma:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}.
 \tag{6.15}$$

donde cada una de las componentes del tensor anterior es una función cuyo dominio es el conjunto de puntos del cuerpo, cuya deformación se pretende caracterizar. El tensor de deformaciones puede escribirse en términos de los módulos de elasticidad:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{\alpha\alpha} \delta_{ij} \right) + \frac{1}{3K} \sigma_{rr} \delta_{ij},
 \tag{6.16}$$

donde :

G = Módulo de elasticidad o de cizalladura.

K = Módulo de compresibilidad.

δ_{ij} = Delta de Kronecker.

En coordenadas cartesianas el tensor anterior se expresa en términos de las componentes del campo de desplazamientos, como sigue:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (6.17)$$

De esta manera, el tensor se expresa de la forma siguiente:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{pmatrix}. \quad (6.18)$$

Como se puede observar, los elementos son variaciones de cada componente del vector de desplazamiento con respecto a los ejes coordenados. Los componentes de la diagonal muestran desplazamientos en las direcciones de los ejes (**Fig. 6.8**), mientras que los triángulos de la matriz describen los cambios de desplazamiento con respecto a otra dirección. Los tres componentes de la diagonal se conocen como la deformación normal y la traza o suma de la diagonal del tensor de deformación, representa el cambio unitario de volumen asociado a la deformación, conocido como **dilatación (Θ)**.

$$\Theta = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}. \quad (6.19)$$

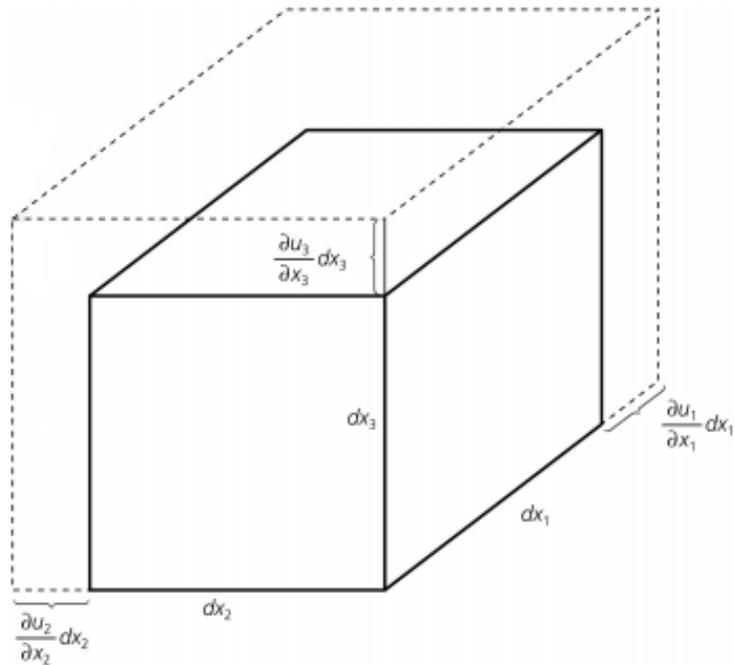


Fig. 6.8 Representación de la dilatación en un cuerpo.

Equivalentemente al tensor de tensiones, el tensor de deformaciones puede expresarse como la suma de otros dos tensores: el tensor de deformación volumétrico (en relación con la dilatación o cambio de volumen) y el tensor de deformación desviador (relacionado con la distorsión).

El tensor de deformación volumétrico se define de la manera siguiente:

$$e = \frac{1}{3}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) = \frac{1}{3}\Theta, \quad (6.20)$$

mientras que el tensor de deformación desviador será:

$$e_x = \varepsilon_{xx} - e$$

$$e_y = \varepsilon_{yy} - e$$

$$\begin{aligned}
 e_z &= \varepsilon_{zz} - e & (6.21) \\
 e_{xy} &= \varepsilon_{xy} \\
 e_{xz} &= \varepsilon_{xz} \\
 e_{yz} &= \varepsilon.
 \end{aligned}$$

Con la finalidad de resolver el problema en el comportamiento de un medio sólido con propiedades mecánicas específicas, es necesario combinar las ecuaciones de tensión de equilibrio con ecuaciones específicas del comportamiento mecánico de un sólido.

En adelante se supone que la Tierra es un medio elástico, isótropo y poroso que reacciona linealmente a una tensión. Un material es elástico cuando al desaparecer el agente deformador, la forma y el tamaño vuelve a su aspecto original. Un material elástico se dice que es isótropo cuando las propiedades elásticas en un punto son las mismas independientemente de la dirección. Si las propiedades del material son las mismas en cualquier punto dentro del sólido, se dice que es homogéneo. Finalmente, un medio lineal es aquel en el que existe una relación lineal entre los tensores de deformación y de tensiones.

Un sólido elástico isótropo se caracteriza por la coincidencia de los ejes principales de los tensores de deformación y de tensiones. Para cada una de las direcciones principales de los tensores de tensiones y de deformación se cumple la proporcionalidad:

$$\sigma_{ij} = C_{ij} \varepsilon_{ij}, \quad (6.22)$$

donde C_{ij} se conocen como las constantes elásticas.

Puesto que la relación entre la tensión y la deformación es lineal, se cumplirá el principio de superposición, con lo cual es posible expresar las componentes del tensor de tensiones en función de las del tensor de deformación de la siguiente forma:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{\alpha\alpha} \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} = \lambda \Delta \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (6.23)$$

con

$$\delta_{ij} = 1, \text{ si } i = j$$

$$\delta_{ij} = 0, \text{ si } i \neq j$$

donde λ y G son las constantes de Lamé.

La constante de Lamé G también conocida como coeficiente de rigidez, siempre es positiva, ya que físicamente describe la respuesta a un esfuerzo cizallante; es decir al cambio de forma del cuerpo. Un material que no permita esfuerzos cizallantes se le conoce como fluido perfecto. Este módulo se define como:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (6.24)$$

donde E es el Módulo de Young, parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza, definido como el cociente entre la tensión uniaxial (σ_{xx} es la única tensión distinta de cero) y la deformación.

$$E = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} = \frac{G(3\lambda + 2G)}{\lambda + G}. \quad (6.25)$$

El coeficiente de Poisson (denotado mediante la letra griega ν), es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de

material elástico lineal e isótropo, cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la del estiramiento. Se define como el cociente de la expansión lateral y la contracción longitudinal:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} \quad (6.26)$$

El primer parámetro de Lamé λ se define como:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (6.27)$$

Finalmente el módulo de compresibilidad (K) de un material mide su resistencia a la compresión uniforme y, por tanto, indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen dada. Se define como la relación de la presión hidrostática, P_c , y la deformación volumétrica que produce, Θ , esto es:

$$K = \frac{P_c}{\Theta} = \lambda + \frac{2}{3}G. \quad (6.28)$$

El inverso del módulo de compresibilidad indica la compresibilidad de un material y se denomina **coeficiente de compresibilidad**, esto es:

$$K = \frac{1}{C}, \quad (6.29)$$

donde C es la compresibilidad del sólido.

Para resolver un problema del comportamiento de un sólido lineal, se necesitan ecuaciones de equilibrio. Las ecuaciones de equilibrio son las ecuaciones diferenciales parciales que describen las tensiones y desplazamientos resultantes en el interior de un

cuerpo. Para resolver estas ecuaciones, son necesarias condiciones específicas de la superficie. Se supone que hay algunas fuerzas (de gravedad, etc.) a lo largo del interior del cuerpo. Si la fuerza se representa por $\vec{X}(X_x, X_y, X_z)$ y ρ_m es la densidad del sólido, las ecuaciones de equilibrio se escriben como sigue:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \rho_m X_x &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + \rho_m X_y &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho_m X_z &= 0\end{aligned}\tag{6.30}$$

Estas ecuaciones se pueden expresar en términos de desplazamientos en lugar de tensiones, utilizando las relaciones de tensión-deformación descritas anteriormente.

Hasta este momento, todos los conceptos revisados son para sólidos no porosos. Al considerar un cuerpo poroso, la mayoría permanece sin cambios; sin embargo algunas definiciones deben modificarse; por ejemplo, la ecuación de la tensión:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{\alpha\alpha} \delta_{ij} \right) + \frac{1}{3K} \sigma_{rr} \delta_{ij},\tag{6.31}$$

se convierte en:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{\alpha\alpha} \delta_{ij} \right) + \frac{1}{3K} (\sigma_{rr} \delta_{ij}) - \frac{1}{3H} (p_p \delta_{ij}),\tag{6.32}$$

donde H es un módulo de volumen efectivo, que tiene el efecto de los poros en consideración, y p_p es la presión de poro.

La nueva ecuación para la dilatación considerando el efecto de los poros ahora será:

$$\Theta = \frac{p_c}{K} - \frac{p_p}{H} = \frac{1}{K} (p_c - \alpha p_p), \quad (6.33)$$

donde $\alpha = \frac{K}{H}$.

Sea $\langle p \rangle = p_c - \alpha p_p$, entonces $\Theta = \frac{\langle p \rangle}{K} = \langle p \rangle \cdot C$. Al considerar que K es el módulo de volumen de la roca matriz ($K = \frac{1}{c_m}$) y H del volumen poroso $H = \frac{1}{c_p}$, la última ecuación puede escribirse como:

$$\Theta = \left(p_c - \frac{c_f}{c_m} p_p \right) c_m. \quad (6.34)$$

Si los poros están llenos de fluido:

$$H = \frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_f} \quad (6.35)$$

donde la compresibilidad de poro es esencialmente la compresibilidad del fluido.

Con el uso de las diferentes relaciones entre la tensión y la deformación, la presión, la presión de poro y los módulos de elasticidad, es posible desarrollar las ecuaciones que expresan la respuesta de un yacimiento a las fuerzas de marea.

Las mareas terrestres son pequeñas en comparación con las mareas oceánicas y no pueden observarse directamente con facilidad. Esto resulta porque la tierra es efectivamente rígida, y el agua no.

Considerando la fuerza gravitacional actuando sobre la Tierra, las tensiones correspondientes a los desplazamientos inducidos por el potencial, considerando coordenadas esféricas, son las siguientes:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \lambda\theta + 2G\varepsilon_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} &= \lambda\theta + 2G\varepsilon_{\theta\theta} \\ \sigma_{\psi\psi} &= \lambda\theta + 2G\varepsilon_{\psi\psi}.\end{aligned}\tag{6.36}$$

Es posible escribir las ecuaciones de equilibrio (ecuación 6.30) relacionando el potencial gravitacional V_2 (ecuación 6.9) y las tensiones normales (ecuación 6.36). La primera solución a este sistema de ecuaciones, calculada utilizando un modelo realista de la Tierra, se obtuvo numéricamente por (**Takeuchi, 1950**). El modelo de la Tierra consideró un núcleo compresible, pero no rígido, con densidad de 12.284 g/cm^3 , variando la distancia a partir del centro de la Tierra entre 0 y 1. La solución con estos parámetros resultó en la forma descrita por la ecuación 6.37:

$$\theta = 0.49 \frac{V_2}{rg},\tag{6.37}$$

donde r representa el radio de la Tierra y g la aceleración gravitacional.

El factor de 0.49 es una constante de integración que resulta de esta elección particular del modelo de la Tierra (**Takeuchi, 1950**).

Como se ha discutido, la relación entre la dilatación y los cambios del potencial gravitacional que la causan son bastante complejos; es el resultado de un sistema elástico lineal, en el que la Tierra se deforma bajo la influencia de un campo gravitacional no uniforme. La deformación del volumen de un yacimiento se resiste por la rigidez de la red de poros y la compresibilidad del fluido que contiene. Si la compresibilidad del grano de la matriz es pequeña en comparación con la del espacio

poroso, la mayor parte del cambio del volumen tras la deformación ocurrirá en el segundo. Por lo tanto, se puede escribir:

$$\Theta = \phi c_f \Delta p, \quad (6.38)$$

donde ϕ es la porosidad, c_f es la compresibilidad del espacio poroso y Δp es el cambio de presión.

Una vez calculado el potencial solar y lunar, la suma de ellos se graficará junto con los datos de presión resultantes del análisis de datos y se observará que la relación entre el potencial y la presión mantiene un valor bastante uniforme en los ciclos sucesivos. Finalmente, utilizando la ecuación 6.38 conjuntamente con la ecuación 6.37, se puede obtener el valor de la compresibilidad mediante la ecuación:

$$c_f = \frac{0.49}{\phi r g} \left(\frac{\Delta V_2}{\Delta p} \right), \quad (6.39)$$

dónde: ϕ representa la porosidad, r el radio de la Tierra, g la aceleración gravitacional, ΔV_2 es la amplitud de los ciclos del potencial gravitacional y Δp es la amplitud de los ciclos de la variación de la presión.

CAPÍTULO VII. ANÁLISIS DE CASOS DE CAMPO

En el comportamiento periódico de la presión registrado con sensores de alta resolución en pozos cerrados, fue posible identificar efectos de “marea terrestre” en algunos de ellos. Siguiendo la metodología propuesta en el capítulo anterior, se llevó a cabo el análisis de los datos de presión y el cálculo del potencial gravitacional, para finalmente obtener los valores de la compresibilidad total de la formación.

Debido a la existencia de convenios de confidencialidad los dos campos seleccionados para su análisis serán nombrados como campo A y campo B, respectivamente. A continuación se presentan los resultados obtenidos para el pozo A-1 del campo A, considerando el período de registro del mes de febrero del 2006, y para el pozo B-1 del campo B, en el período de registro correspondiente al mes de noviembre de 2004.

VII.I Pozo A-1 del Campo A

El campo A se encuentra localizado en la región sureste del país. Este pozo inicia su producción en el año 1985. Posteriormente, se continua el desarrollo del campo durante los siguientes tres años sin resultados satisfactorios, en ese momento se tenían 10 pozos perforados taponados ya fuera por accidentes mecánicos o por encontrar columnas no programadas, principalmente de sal, o simplemente por resultar improductivos.

Al mes de marzo de 2002, el campo aportaba una producción de 32116 BPD y 24.612 MMPCD de aceite y gas, respectivamente. En julio de 2005 se alcanzó una máxima de producción con 84649 BPD; para mayo de 2008 se tiene una producción de 39771 BPD y 29.5 MMPCD.

A continuación, en las tablas 7.1 y 7.2 se presentan las características petrofísicas del campo A así como el tipo de fluidos y condiciones que se tenían en el campo en mayo de 2008 (datos obtenidos de: *PEP, Proyecto Integral del Campo A, 2008*).

TABLA 7.1 Características petrofísicas del campo A.

CARACTERÍSTICAS PETROFÍSICAS DEL CAMPO A	
AREA	34 Km ² (KI), 26 Km ² (JSK)
TIPO DE YACIMIENTO	Naturalmente Fracturado
ROCA	Calizas, Dolomías y Brechas
POROSIDAD (%)	9 (KI), 5(JSK), 11(BRECHA)
PERMEABILIDAD (mD)	5-1000 mD
ESPESOR BRUTO (m)	135(KI), 500 (JSK), 30 (BRECHA)
ESPESOR NETO (m)	100 (KI), 300 (JSK), 24 (BRECHA)
PROFUNDIDAD (m)	6100

TABLA 7.2 Tipos de fluido y condiciones del campo A.

TIPO DE FLUIDO Y CONDICIONES DEL CAMPO A	
TIPO DE FLUIDO	Aceite Negro
DENSIDAD DE ACEITE	32° API
DENSIDAD RELATIVA DE GAS	0.78 (aire = 1)
RGA	115 m ³ /m ³
PRESIONES (Kg/cm²)	
• Inicial	1136
• En 2008	870
• Saturación	133
TEMPERATURA	150 °C

VII.I.I Analisis de los datos de presión del Pozo A-1 del Campo A

La primera etapa del programa comprende el análisis de los datos obtenidos a partir de la prueba de presión. A continuación se muestran las gráficas resultantes del análisis llevado a cabo en este pozo.

El resultado de la prueba de presión realizada en el pozo A-1 consta de aproximadamente 70000 datos, divididos de forma irregular, entre 4 y 12 datos por minuto, para el intervalo del 9/02/2006 14:46:44 al 13/02/2006 19:25:34. Las fechas en que se realizó la prueba, al tener cercanía con la fase de luna llena del 13 de febrero de 2006 (donde la amplitud de las mareas es máxima), permitirán una mejor visualización del efecto sinusoidal, lo cual facilitará el análisis (Ver Fig. 7.1).

Fases Lunares Febrero de 2006



Fig. 7.1 Fases lunares en el mes de febrero de 2006.

Los datos de presión originales del pozo A-1, se pueden observar en la **Fig. 7.2**, en los que es notorio el proceso de bajada y subida del sensor (al principio y al final del período), por lo cual, para un buen procesamiento de los datos, este efecto debe ser eliminado. El resultado de aplicar éste filtro, se muestran en la **Fig. 7.3**.

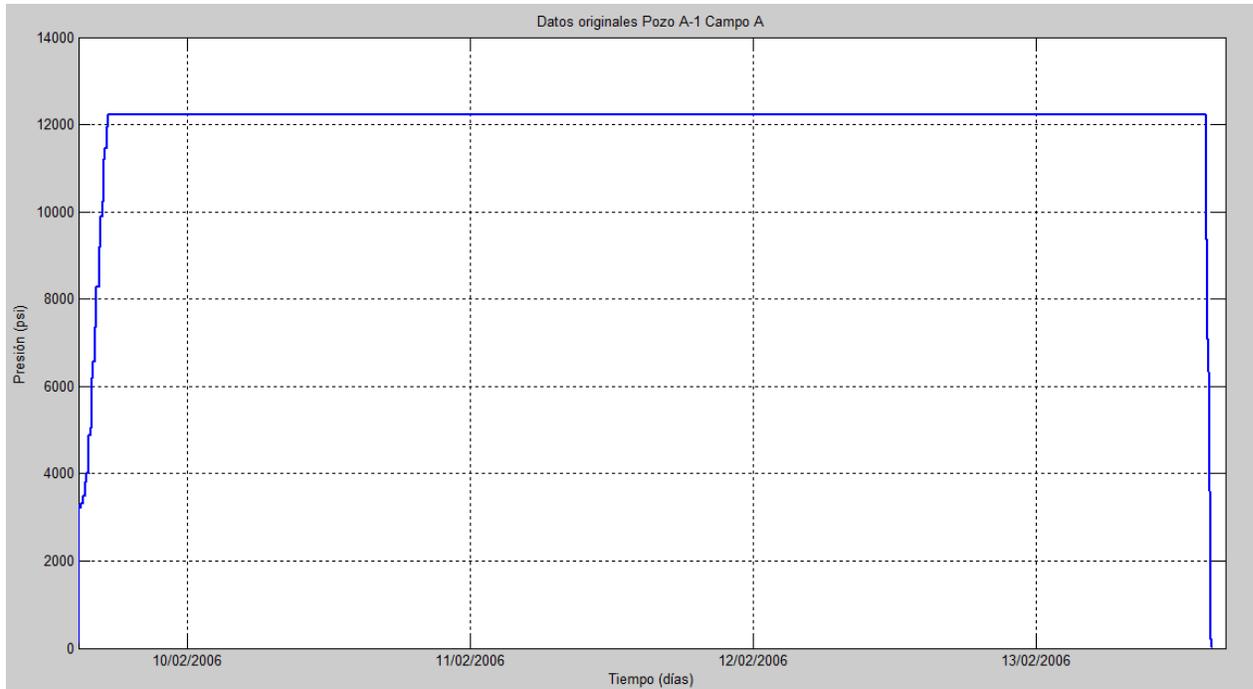


Fig. 7.2 Gráfica de los datos originales del pozo A-1 del campo A.

En la escala expandida de la Fig. 7.3 se puede observar un pequeño efecto sinusoidal de la presión, sin embargo la gráfica aún es muy densa (≈ 67000 datos). El número de valores de (presión, tiempo) es uno de los aspectos que se debe tomar en cuenta al momento de realizar éste análisis. Lo recomendable es contar con un dato por minuto para poder observar mejor el comportamiento sinusoidal y disminuir el ruido en los datos.

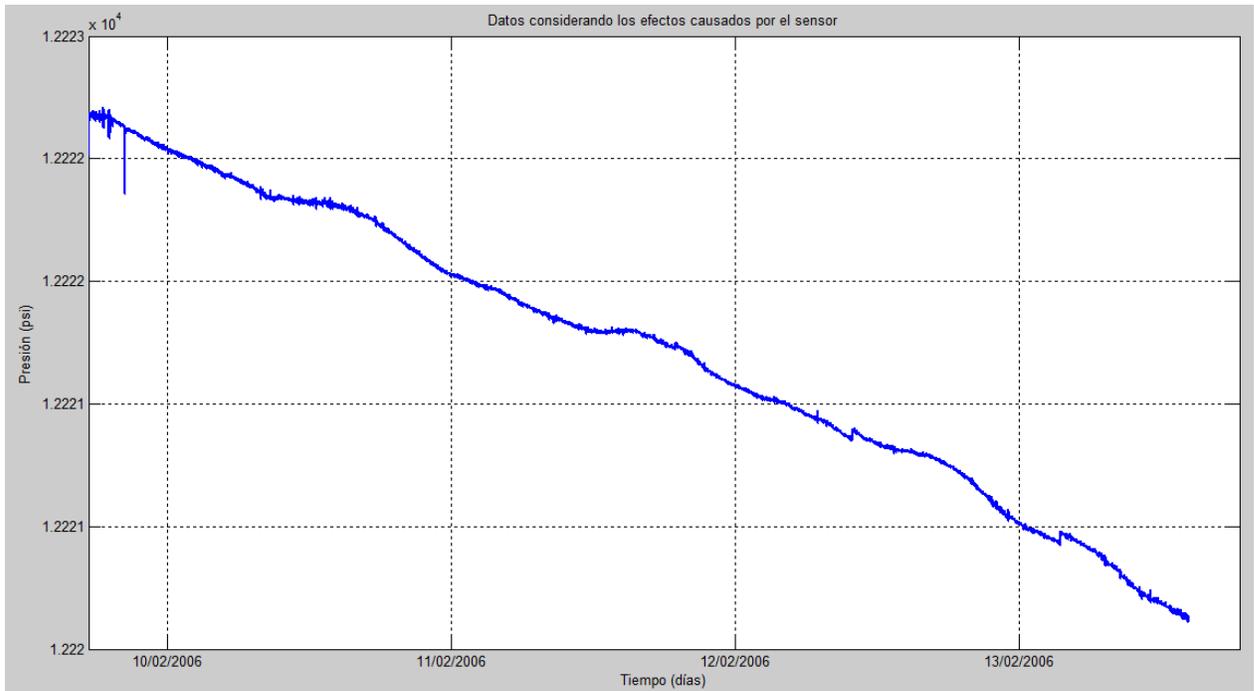


Fig. 7.3 Gráfica de los datos originales al considerar los efectos de la subida y bajada del sensor (pozo A-1 del campo A).

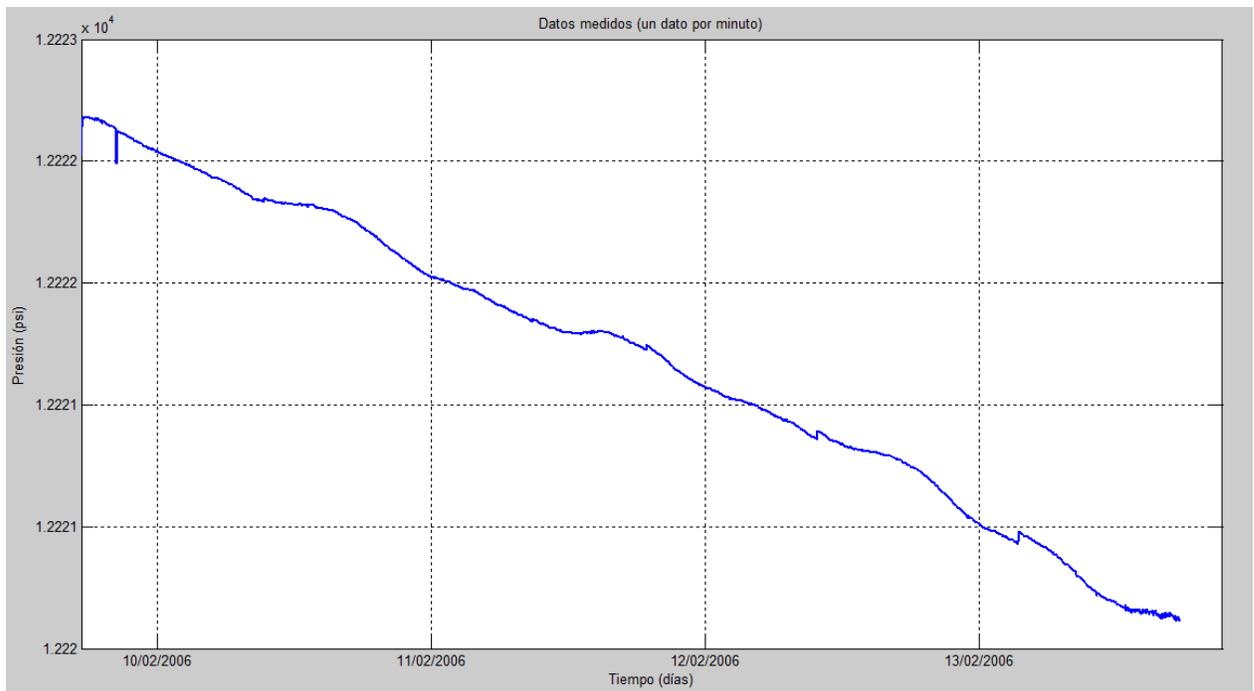


Fig. 7.4 Gráfica presión vs tiempo promediando valores por minuto para el pozo A-1 del campo A (*Datos Medidos*).

En el caso del pozo A-1, al no tener una uniformidad en los datos se realizó un segundo filtro con la finalidad de contar con solo un dato por minuto. Lo anterior se llevó a cabo promediando los datos para cada intervalo deseado. La gráfica resultante se muestra en la **Fig. 7.4**, la cual se suaviza en relación a la anterior. A los datos obtenidos en esta gráfica se les llama *Datos Medidos*.

El paso siguiente del análisis es obtener el promedio móvil de 24 horas, como ya se mencionó esto se lleva a cabo tomando en cuenta 12 horas antes y 12 horas después de cada punto. El método del promedio móvil ayudará a que la gráfica se suavice un poco más para obtener una tendencia y poder aplicar la regresión. La gráfica resultante de éste proceso se observa en la **Fig. 7.5**. Con los valores del promedio móvil se efectuó el ajuste mediante una regresión polinomial, como se muestra en la **Fig. 7.6**. A los puntos de la regresión obtenida se le llaman *Datos Calculados*.

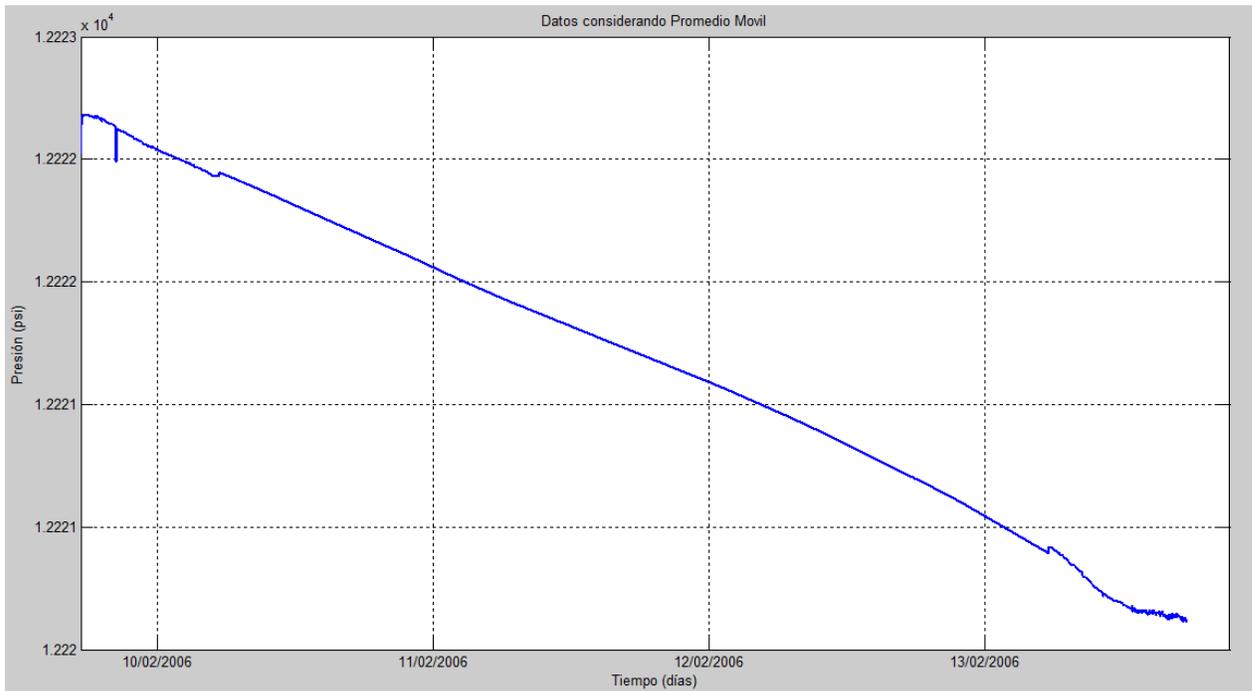


Fig. 7.5 Gráfica de los datos suavizados considerando un promedio móvil de 24 horas (pozo A-1 del campo A).

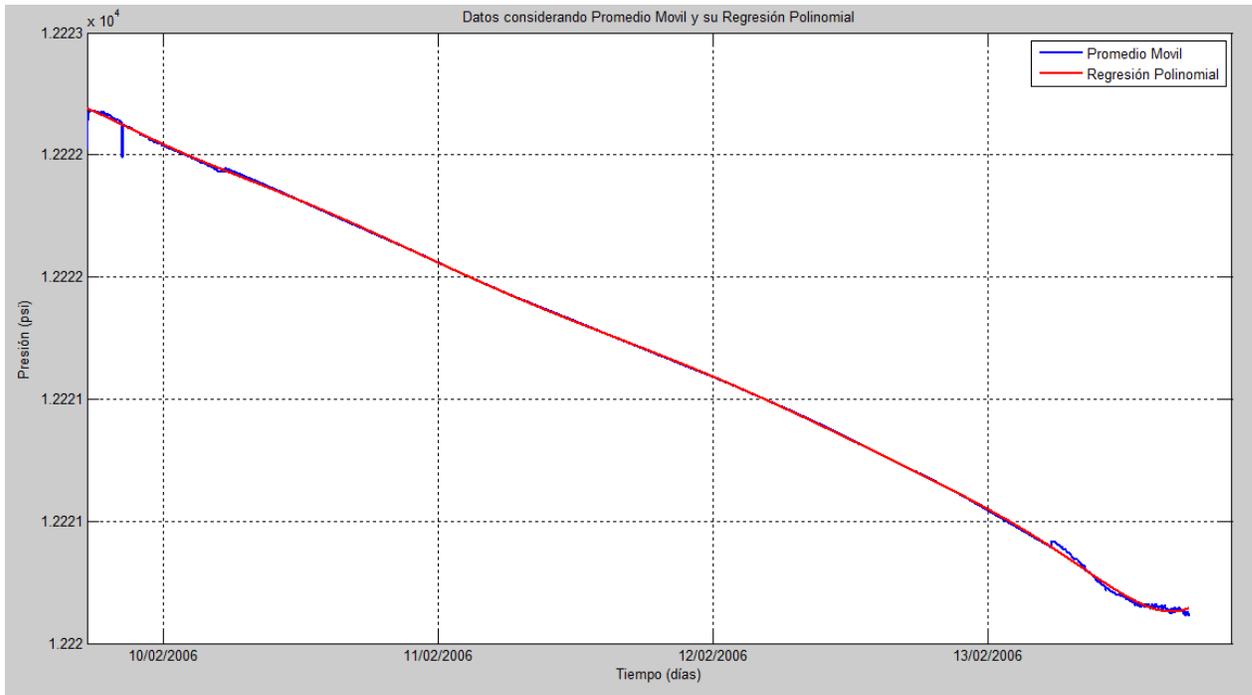


Fig. 7.6 Ajuste mediante regresión polinomial a los datos obtenidos al aplicar el promedio móvil (pozo A-1 del campo A).

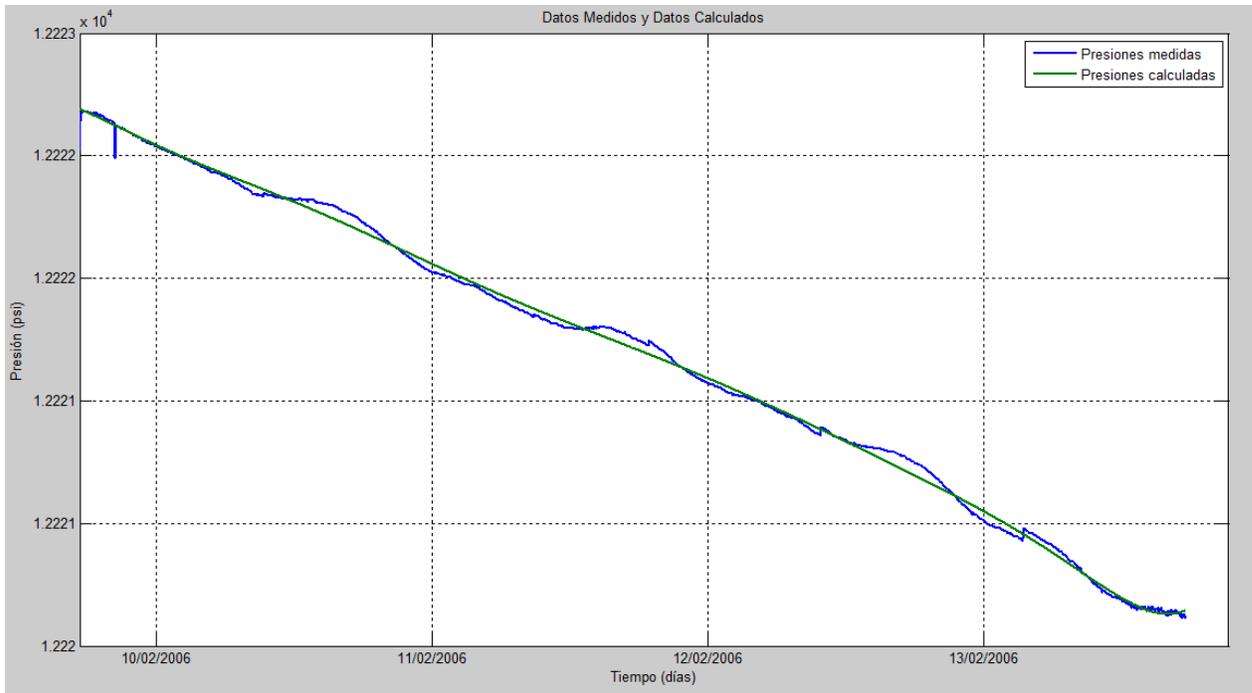


Fig. 7.7 Comparación de los datos medidos y datos calculados del pozo A-1 del campo A.

Al considerar los datos medidos y los datos calculados en una misma gráfica (**Fig. 7.7**), se observa el comportamiento sinusoidal que presenta la presión medida, el cual será más notorio al momento de eliminar el efecto de declinación de la presión.

Para eliminar el efecto de la declinación, se calcula la diferencia entre las presiones medidas (datos sin efecto de sensor considerando uno por minuto vs tiempo) y las presiones calculadas (ajuste polinomial vs tiempo); de esta manera se obtiene el efecto periódico de la presión, el cual se muestra en la **Fig. 7.8**. Para una mejor visualización y análisis se presenta en la **Fig. 7.9** la gráfica que incluye las presiones medidas, las presiones calculadas y el efecto periódico de la presión.

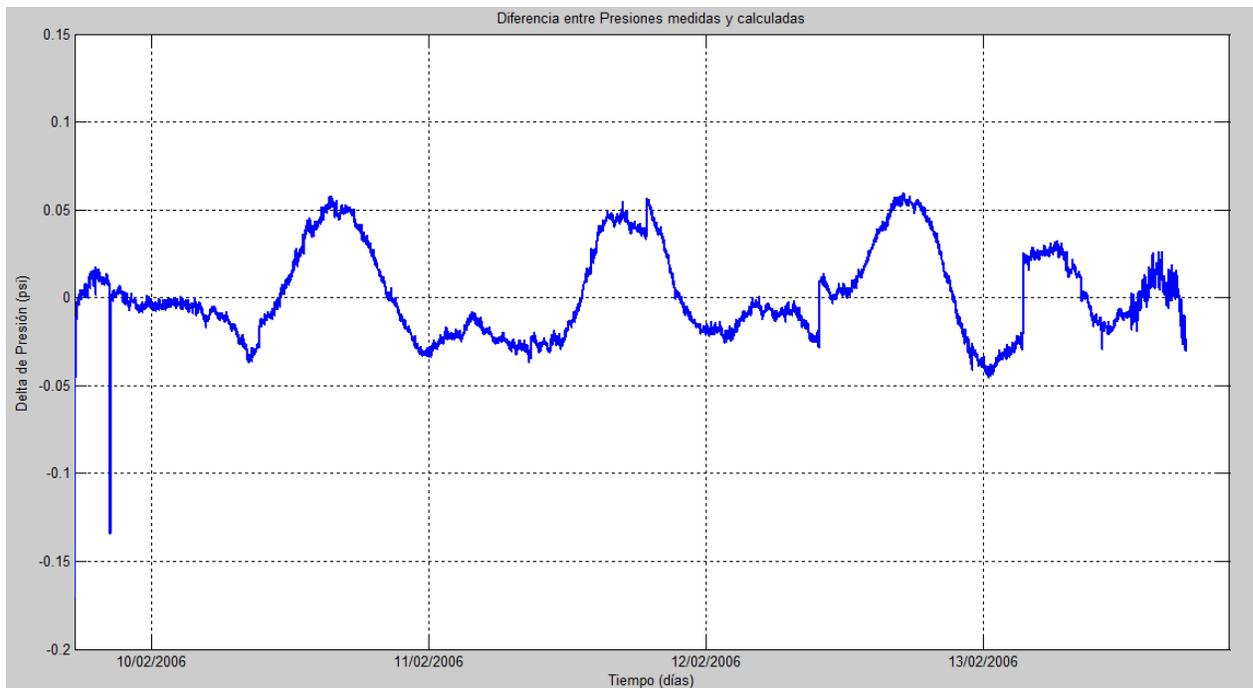


Fig. 7.8 Efecto periódico en la presión del pozo A-1 del campo A.

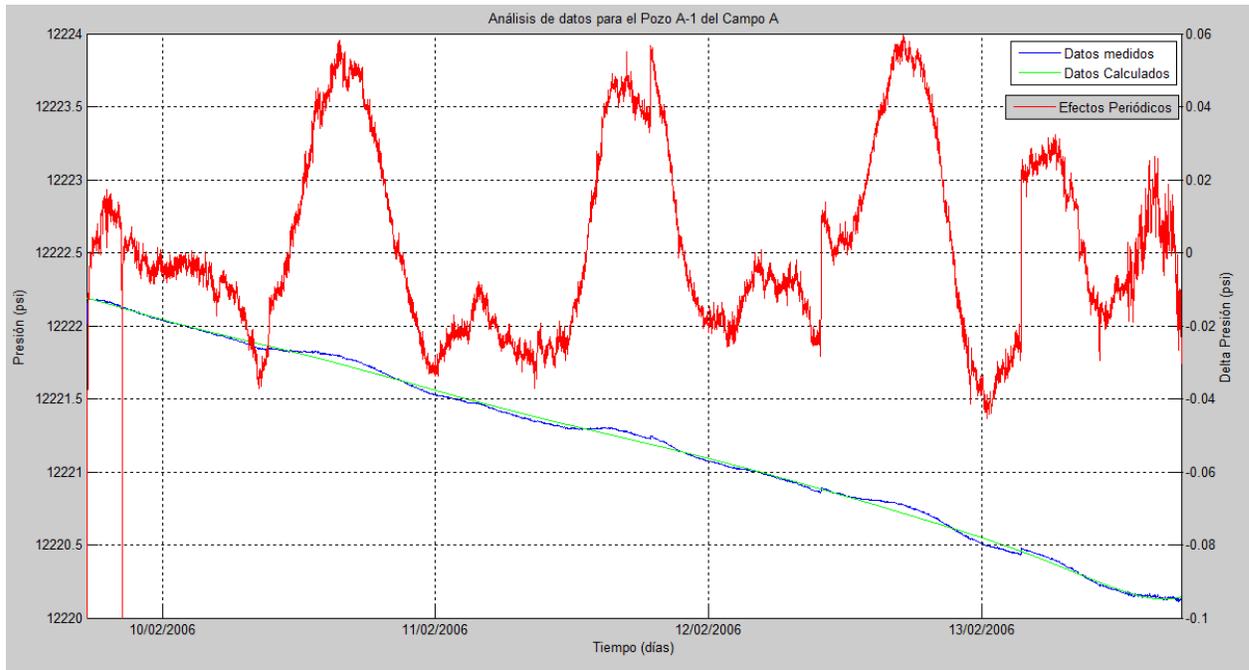


Fig. 7.9 Gráfica que muestra el efecto periódico en la presión, las presiones medidas y las presiones calculadas (pozo A-1 del campo A).

VII.I.II Cálculo del Potencial Gravitacional para el Campo A

Para llevar a cabo el cálculo del potencial gravitacional, el programa computacional desarrollado en este trabajo (el cual se referirá en adelante como **“EstComp”**) necesita los siguientes datos de entrada:

- Periodo en que se llevó a cabo la prueba de presión.
- Longitud y latitud del lugar donde se llevó a cabo la prueba.

Para el caso del campo A, los datos a ingresar se muestran en la **Tabla 7.3**.

TABLA 7.3 Datos necesarios para calcular el potencial gravitacional para el campo A.

DATOS DE ENTRADA PARA EL CÁLCULO DEL POTENCIAL GRAVITACIONAL	
Periodo de prueba (D/M/A HH:MM)	9/02/2006 17:21 – 13/02/2006 17:37
Latitud (°)	18° 27' 00" N
Longitud(°)	93° 13' 47" W
Huso horario	GMT-6

Como se observa en la **Fig. 7.10**, estos datos también se cargaron en el programa **Alcyone Ephemeris**, para llevar a cabo una validación de los parámetros astronómicos principales (Ver **Glosario Astronómico**):

- Fecha Juliana (JD).
- Delta-T (ΔT).
- GMST(θ_0).
- LMST.
- Ascensión recta (α).
- Declinación (δ).

Region	Location	Longitude	Latitude	Elevation	Time zone
Mexico	Tuxtla Gutierrez	93° 07' 00" W	16° 45' 00" N	570 m	GMT-6:00
Mexico	Torreon	103° 26' 00" W	25° 33' 00" N	1130 m	GMT-6:00
Mexico	Morelia	101° 07' 00" W	19° 42' 00" N	2080 m	GMT-6:00
Mexico	Mazatlan	106° 25' 00" W	23° 13' 00" N		GMT-7:00
Mexico	Tlalnepantla	99° 13' 00" W	19° 32' 00" N	2280 m	GMT-6:00
Mexico	Tonala	103° 14' 00" W	20° 37' 00" N	1600 m	GMT-7:00
México	Zona A	93° 13' 47" W	18° 27' 00" N	13 m	GMT-6:00
Micronesia	Weno	151° 51' 00" E	7° 27' 00" N	50 m	GMT+10:00
Moldova	Chisinau	28° 51' 00" E	47° 00' 00" N	50 m	GMT+2:00
Monaco	Monte-Carlo	7° 25' 00" E	43° 44' 00" N		GMT+1:00
Mongolia	Ulaanbaatar	106° 55' 00" E	47° 55' 00" N	1300 m	GMT+8:00
Morocco	Marrakech	8° 00' 00" W	31° 38' 00" N	450 m	GMT
Morocco	Fes	4° 59' 00" W	34° 03' 00" N	450 m	GMT

Fig. 7.10 Carga de datos de la Zona A, a la que pertenece el campo A, en el programa **Alcyone Ephemeris**.

Una vez ingresados los datos necesarios en ambos programas, se llevó a cabo su procesamiento, *Alcyone Ephemeris* tardó 5 seg. en arrojar los resultados de los parámetros astronómicos principales, mientras que *EstComp* lo hizo en 2 seg. mostrando además los resultados del cálculo de los potenciales Solar, Lunar y Total.

EstComp permite visualizar los resultados para los parámetros astronómicos, tanto para el Sol como para la Luna, los cuales se comparan con los obtenidos por medio de *Alcyone Ephemeris* en la **Tabla 7.4** y en la **Fig. 7.11**.

TABLA 7.4 Diferencias máxima y mínima entre el programa *EstComp* y *Alcyone Ephemeris*, al comparar los resultados obtenidos para los parámetros astronómicos principales del campo A.

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS ASTRONÓMICOS ENTRE <i>EstComp</i> Y <i>Alcyone Ephemeris</i>		
PARÁMETROS	MÁXIMA DIFERENCIA	MÍNIMA DIFERENCIA
Fecha Juliana (JD)	0.041667	0.000000
Delta-T (días)	0.000003	0.000003
GMST (días)	0.041781	0.000000
LMST (días)	0.041791	0.000010
Ascensión recta (α) (°)		
• SOL	0.041543	0.000000
• LUNA	0.091932	0.000025
Declinación (δ) (°)		
• SOL	0.014707	0.000557
• LUNA	0.171894	0.000002

Tomando en cuenta la cantidad de datos procesados así como los cálculos realizados para obtener los parámetros, sobre todo para la ascensión recta y la declinación, el rango de diferencias se considera aceptable, ya que además, las diferencias máximas se dieron en puntos aislados. La finalidad de esta comparación fue para tener la seguridad de que los cálculos obtenidos son correctos.

UT-6h	SOL			SOL			LUNA			LUNA		
	Ascensión Recta (grad)			Declinación (grad)			Ascensión Recta (grad)			Declinación (grad)		
	Alcyone	Est. Compres.	Dif.	Alcyone	Est. Compres.	Dif.	Alcyone	Est. Compres.	Dif.	Alcyone	Est. Compres.	Dif.
2006-02-09 17:21	323.214266	323.214020	0.000246	-14.554928	-14.556171	0.001243	104.319034	104.323436	0.004402	27.905017	27.912456	0.007438
2006-02-09 17:22	323.214954	323.214709	0.000245	-14.554704	-14.555947	0.001243	104.328515	104.332862	0.004347	27.904088	27.911519	0.007431
2006-02-09 17:23	323.215642	323.215397	0.000245	-14.554480	-14.555723	0.001243	104.337996	104.342288	0.004292	27.903159	27.910582	0.007423
2006-02-09 17:24	323.216330	323.216085	0.000245	-14.554256	-14.555499	0.001243	104.347477	104.351714	0.004237	27.902229	27.909645	0.007416
2006-02-09 17:25	323.217019	323.216774	0.000245	-14.554032	-14.555275	0.001243	104.356958	104.361140	0.004182	27.901298	27.908706	0.007408
2006-02-09 17:26	323.217707	323.217462	0.000245	-14.553808	-14.555051	0.001243	104.366438	104.370565	0.004127	27.900366	27.907767	0.007401
2006-02-09 17:27	323.218395	323.218151	0.000244	-14.553584	-14.554827	0.001243	104.375918	104.379990	0.004072	27.899434	27.906828	0.007393
2006-02-09 17:28	323.219083	323.218839	0.000244	-14.553361	-14.554603	0.001243	104.385398	104.389415	0.004017	27.898502	27.905888	0.007386
2006-02-09 17:29	323.219771	323.219527	0.000244	-14.553137	-14.554379	0.001243	104.394878	104.398840	0.003962	27.897568	27.904947	0.007378
2006-02-09 17:30	323.220460	323.220216	0.000244	-14.552913	-14.554155	0.001243	104.404357	104.408264	0.003907	27.896634	27.904005	0.007371
2006-02-09 17:31	323.221148	323.220904	0.000244	-14.552689	-14.553931	0.001242	104.413837	104.417688	0.003852	27.895700	27.903063	0.007363
2006-02-09 17:32	323.221836	323.221593	0.000243	-14.552465	-14.553707	0.001242	104.423316	104.427112	0.003797	27.894764	27.902120	0.007356
2006-02-09 17:33	323.222524	323.222281	0.000243	-14.552241	-14.553483	0.001242	104.432794	104.436536	0.003742	27.893828	27.901177	0.007348
2006-02-09 17:34	323.223212	323.222970	0.000243	-14.552017	-14.553259	0.001242	104.442273	104.445959	0.003687	27.892892	27.900233	0.007341
2006-02-09 17:35	323.223901	323.223658	0.000243	-14.551793	-14.553035	0.001242	104.451751	104.455383	0.003632	27.891954	27.899288	0.007334
2006-02-09 17:36	323.224589	323.224346	0.000243	-14.551569	-14.552811	0.001242	104.461229	104.464806	0.003577	27.891017	27.898343	0.007326
2006-02-09 17:37	323.225277	323.225035	0.000242	-14.551345	-14.552587	0.001242	104.470707	104.474228	0.003522	27.890078	27.897397	0.007319
2006-02-09 17:38	323.225965	323.225723	0.000242	-14.551121	-14.552363	0.001242	104.480184	104.483651	0.003467	27.889139	27.896450	0.007311
2006-02-09 17:39	323.226653	323.226412	0.000242	-14.550898	-14.552139	0.001242	104.489662	104.493073	0.003412	27.888199	27.895503	0.007304

Fig. 7.11 Comparación de resultados de la Ascensión Recta y la Declinación (para el Sol y la Luna) entre *EstComp* y *Alcyone Ephemeris* (campo A).

Las gráficas obtenidas en *EstComp* de los diferentes potenciales se muestran en la **Fig. 7.12**, en la cual se puede notar que la mayor aportación al potencial total es por parte del efecto de la Luna, lo cual coincide con lo mencionado en el Capítulo IV.

El siguiente paso es la comparación del potencial total (suma del potencial lunar y solar) con el efecto periódico de la presión obtenido anteriormente, lo que se observa en la **Fig. 7.13**.

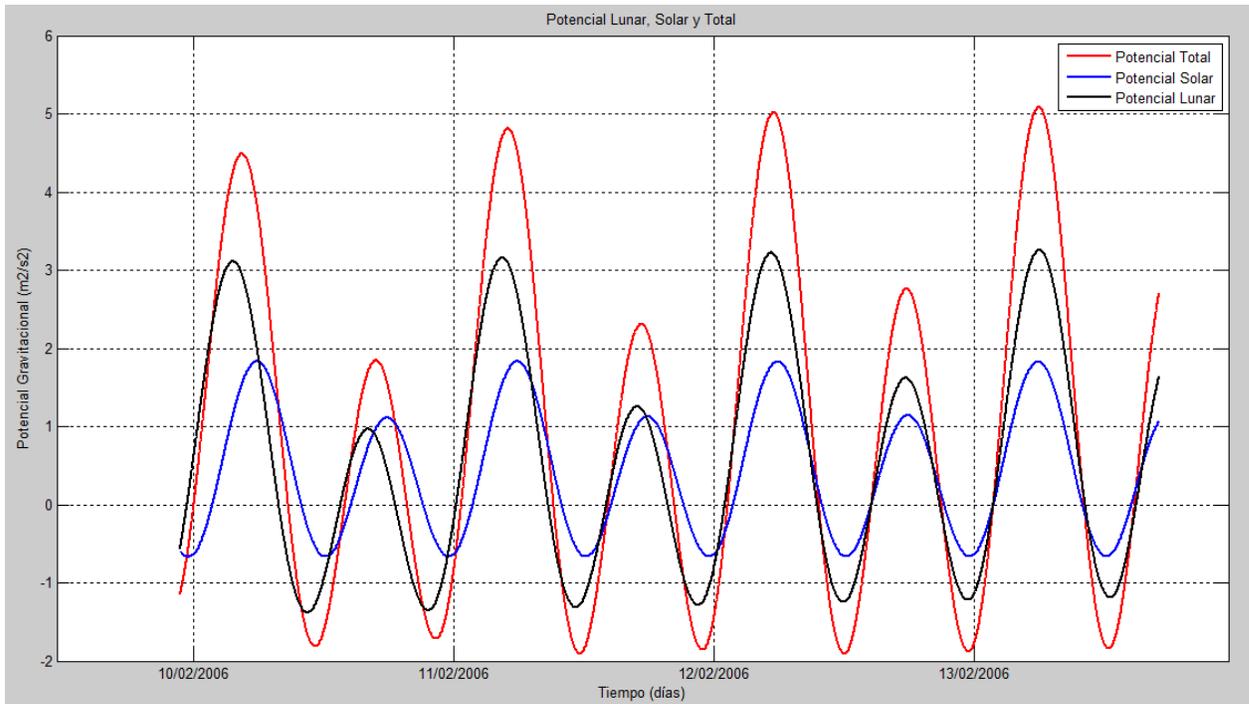


Fig. 7.12 Resultados al calcular el Potencial Lunar, Potencial Solar y Potencial Total del campo A en el programa *EstComp*.

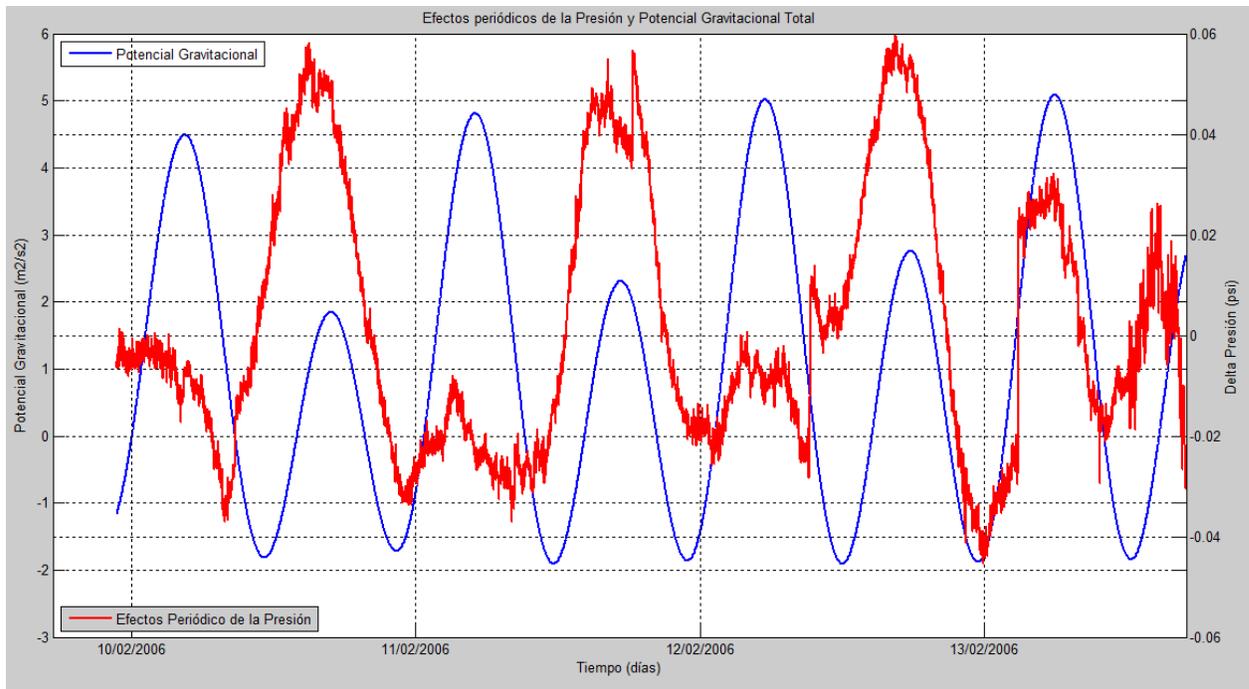


Fig. 7.13 Comparación entre el Potencial Gravitacional Total y los Efectos Periódicos de la presión obtenidos para el pozo A-1 del campo A.

Varias características son inmediatamente evidentes a partir de esta gráfica. La primera es que la presión claramente está siendo impulsada por el potencial de marea. Cada vez que hay un gran pico en el potencial, a continuación hay un gran pico en la curva de presión, y de la misma manera con los picos pequeños.

Otra característica evidente es el desfase entre la señal de presión y el potencial gravitacional. Para realizar una comparación más clara, el potencial gravitacional deberá desplazarse 12 horas, como se muestra en la **Fig. 7.14**.

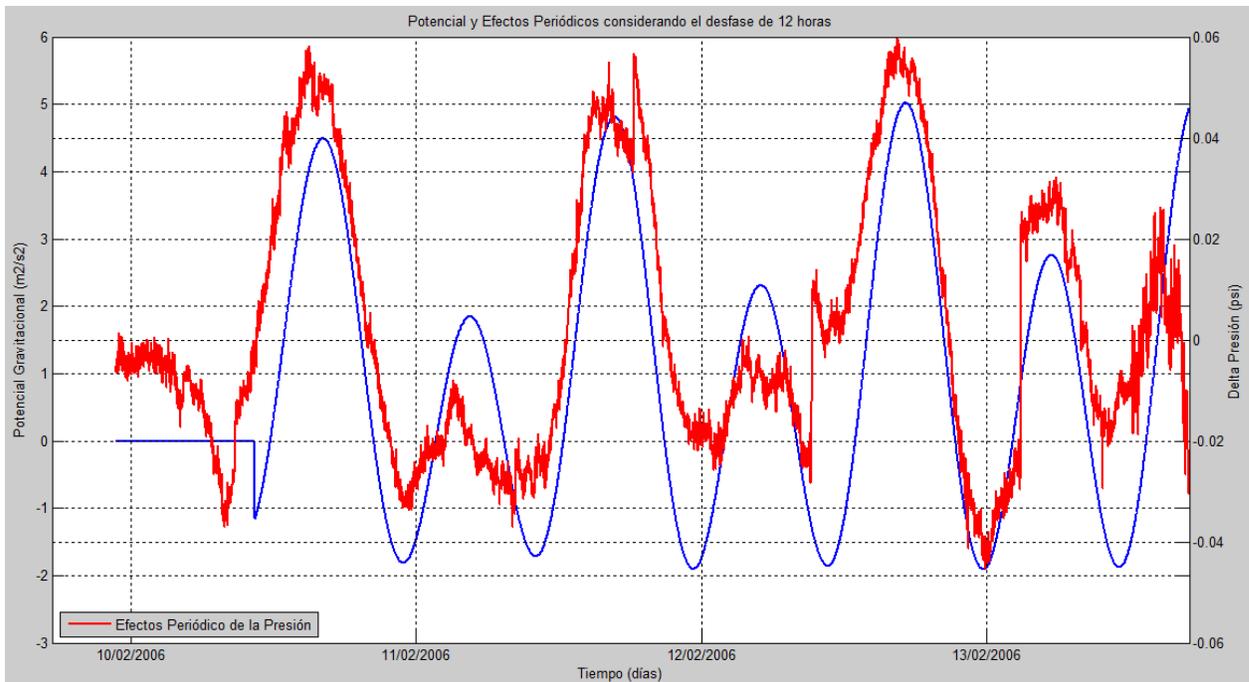


Fig. 7.14 Comparación entre el Potencial Gravitacional Total y los Efectos Periódicos de la presión al considerar el desfase de 12 horas obtenidos para el pozo A-1 del campo A.

El retraso es el resultado de que la movilidad del fluido es suficientemente baja para que se genere un desfase entre la presión y la fuerza motriz asociada con el potencial, lo que implica que los datos del comportamiento de retardo de fase pueden dar la oportunidad de calcular la movilidad de fluido.

Una vez considerado el desfase de 12 horas, se puede ver la coincidencia entre ambas gráficas. De esta forma se está en condiciones de poder llevar a cabo la estimación de la compresibilidad de la formación.

VII.I.III Estimación de la compresibilidad total de la formación del pozo A-1 del campo A

Para llevar a cabo la estimación de la compresibilidad total de la formación, se usará la ecuación (6.39):

$$c_f = \frac{0.49}{\phi r g} \left(\frac{\Delta V_2}{\Delta p} \right)$$

donde, como ya se ha descrito: ϕ representa la porosidad, r el radio de la Tierra, g la aceleración gravitacional, ΔV_2 es la amplitud pico a pico de las oscilaciones del potencial gravitacional y Δp la amplitud pico a pico de la variación de la presión.

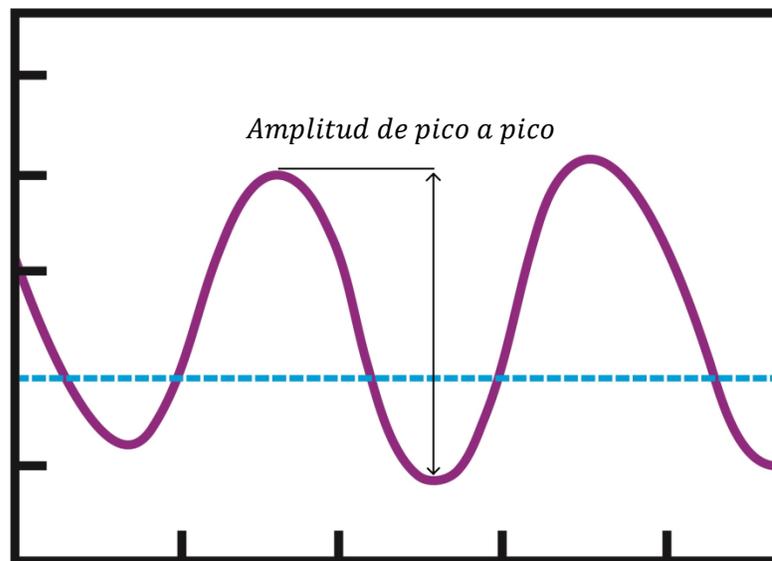


Fig. 7.15 Cálculo de la amplitud pico a pico.

Considerando que en cada día del periodo de la prueba se tiene un ciclo de marea semidiurna (dos mareas altas y dos mareas bajas de diferente tamaño), se calcula la amplitud pico a pico de cada ciclo tanto para el potencial como para el delta de presión, como se observa en la **Fig. 7.15**, para cada día del periodo para los cuales se tienen ambos datos. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 7.5**.

TABLA 7.5 Cálculo de las amplitudes del potencial gravitacional ΔV_2 y de la variación de la presión ΔP para el pozo A-1 del campo A.

CÁLCULO DE ΔP Y ΔV_2		
FECHA	ΔP (psi)	ΔV_2 (m^2/s^2)
10 Feb. 2006	6.3	0.09
11 Feb. 2006	6.7	0.09
12 Feb. 2006	6.9	0.10
13 Feb. 2006	6.8	0.05

El paso a seguir es calcular el producto porosidad-compresibilidad (ϕc_f). Despejando de la ecuación (6.39), la formula a utilizar será:

$$\phi c_f = \frac{0.49}{rg} \left(\frac{\Delta V_2}{\Delta p} \right). \quad (7.1)$$

Tomando en cuenta los valores siguientes para r y para g con sus conversiones respectivas:

- $r = 6373.388 \text{ km}$
- $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

se obtienen los resultados mostrados en la **Tabla 7.6**.

TABLA 7.6 Cálculo del producto porosidad-compresibilidad ϕc_f para el pozo A-1 del campo A.

FECHA	$\phi c_f (\times 10^{-9})$
10 Feb. 2006	549
11 Feb. 2006	584
12 Feb. 2006	541
13 Feb. 2006	522

Como se muestra en la **Tabla 7.1**, la porosidad del campo A, tiene una variación entre el 9% y el 11% entre las diferentes formaciones que lo componen, esto para el año 2008. Al no tener la certeza del tipo de porosidad en los datos que se tienen para este campo y los datos para el año 2006, se hace un cálculo de la c_f para un rango de valores más probables de porosidad para éste yacimiento en la **Tabla 7.7**.

TABLA 7.7 Cálculo de la compresibilidad de la formación c_f con diferentes valores de porosidad ϕ para el pozo A-1 del campo A

COMPRESIBILIDAD DE LA FORMACIÓN $c_f (\times 10^{-6})$		
$\phi = 0.02$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.04$
27.5	18.3	13.7

Aunque lo ideal sería poder comparar los resultados obtenidos con los calculados en el laboratorio, los resultados obtenidos, para los valores de porosidad dados, se pueden considerar físicamente correctos.

VII.II Pozo B-1 del Campo B

El campo B, al igual que el campo A, se encuentra ubicado al sureste del país. Se descubrió en 1980, teniendo su producción máxima de aceite en 1983, con 158.7 MBD.

TABLA 7.8 Características petrofísicas del campo B

CARACTERÍSTICAS PETROFÍSICAS DEL CAMPO B	
AREA	82.7 Km ² (JSK - KI),
TIPO DE YACIMIENTO	Naturalmente Fracturado
ROCA	Dolomía
POROSIDAD (%)	3-4
PERMEABILIDAD (mD)	10
ESPESOR BRUTO (m)	--
ESPESOR NETO (m)	--
PROFUNDIDAD (m)	6000 (JSK) y 5335 (KI)

TABLA 7.9 Tipos de fluido y condiciones del campo B

TIPO DE FLUIDO Y CONDICIONES DEL CAMPO B	
TIPO DE FLUIDO	Aceite volátil
DENSIDAD DE ACEITE	39° API
PRESIONES (Kg/cm²)	
• Inicial	629
• Actual	--
• Saturación	--
TEMPERATURA (°C)	159
VISCOSIDAD (Cp)	0.39

Como se observa en las tablas 7.8 y 7.9 no se cuenta con mucha información de este yacimiento, pero se tiene la necesaria para llevar a cabo el análisis de datos, el cálculo del potencial gravitacional y de la compresibilidad del yacimiento (datos obtenidos de: *PEP, Diseño de producción del Campo B, 2015*).

VII.II.I Analisis de los datos de la presión del Pozo B-1 del Campo B

En el caso del pozo B-1 se tienen alrededor de 6000 datos en el intervalo considerado del 9/11/2004 11:57:00 al 17/11/2004 14:13:00. Las fechas en que se realizó la prueba, facilitaran en análisis debido a que el 12 de noviembre se presentó una luna nueva, lo cual permitirá una mejor visualización del efecto sinusoidal (Ver **Fig. 7.16**).

Fases Lunares Noviembre de 2004



Fig. 7.16 Fases lunares en el mes de noviembre de 2004.

Siguiendo los mismos pasos que para el pozo A-1, se cargaron los datos originales del resultado de la prueba de presión, obteniendo la gráfica que se muestra en la **Fig. 7.17**. Se observa que al igual que en el pozo A-1, es muy notoria la influencia del sensor, por lo cual es necesario aplicar un primer filtro.

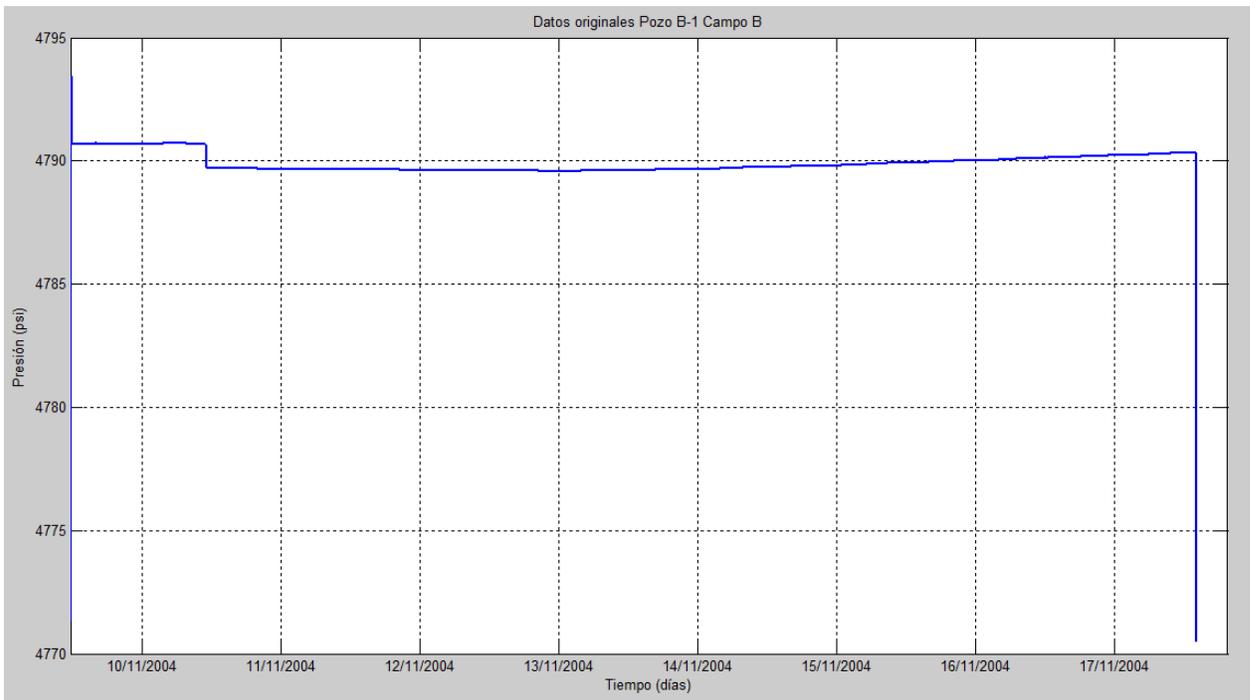


Fig. 7.17 Gráfica de los datos originales del pozo B-1 del campo B.

Al reconsiderar los datos afectados por el sensor (**Fig. 7.18**), se aprecian perfectamente dos intervalos, donde se observa el efecto sinusoidal de la presión. El análisis subsecuente toma en cuenta estos intervalos por separado.

El primer intervalo considera los datos cercanos al 10 de Nov de 2004. La gráfica de la **Fig. 7.19**, muestra claramente dos picos de presión.

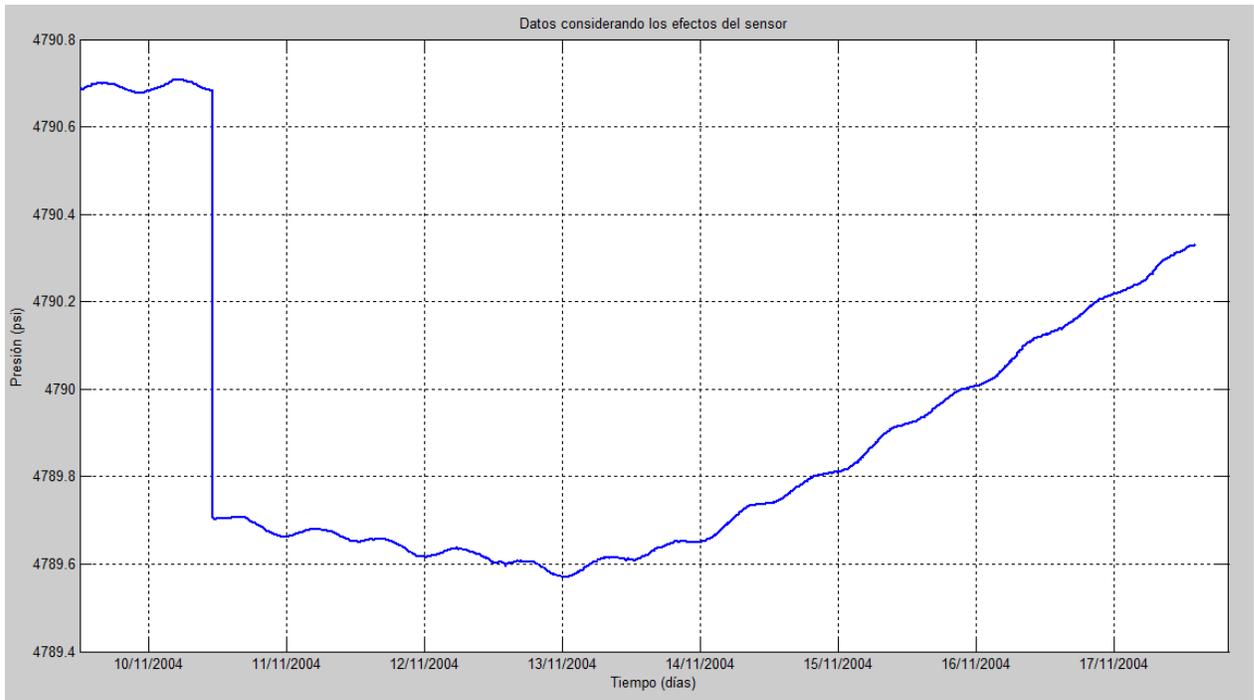


Fig. 7.18 Datos considerando los efectos del sensor (pozo B-1 del campo B).

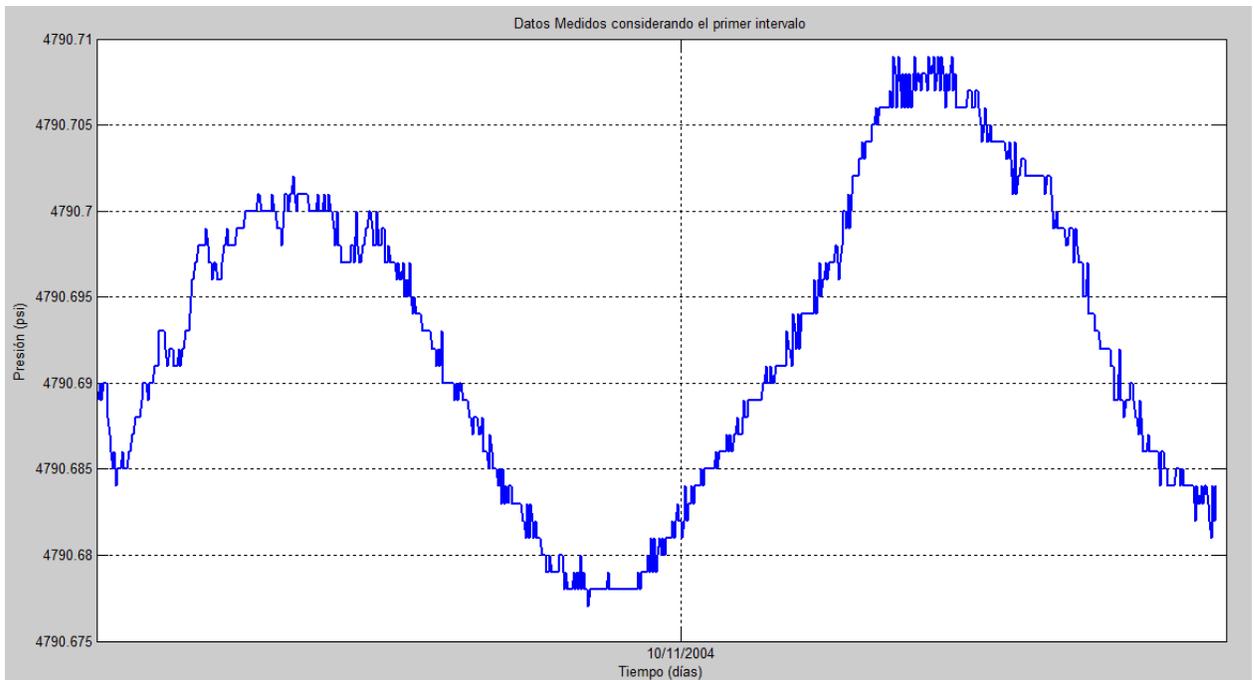


Fig. 7.19 Primer intervalo de datos de presión del pozo B-1 que presenta el efecto sinusoidal: 9-10 de Noviembre de 2004.

En el caso del segundo intervalo, considerado entre el 11 y el 18 de Noviembre de 2004 (**Fig. 7.20**), de igual manera que en el primero es notorio el efecto sinusoidal. Los datos de presión para esta prueba se obtuvieron uno por minuto, por lo tanto no fue necesario llevar a cabo otro filtro. Los datos de las gráficas 7.19 y 7.20 se consideran como los *Datos Medidos*.

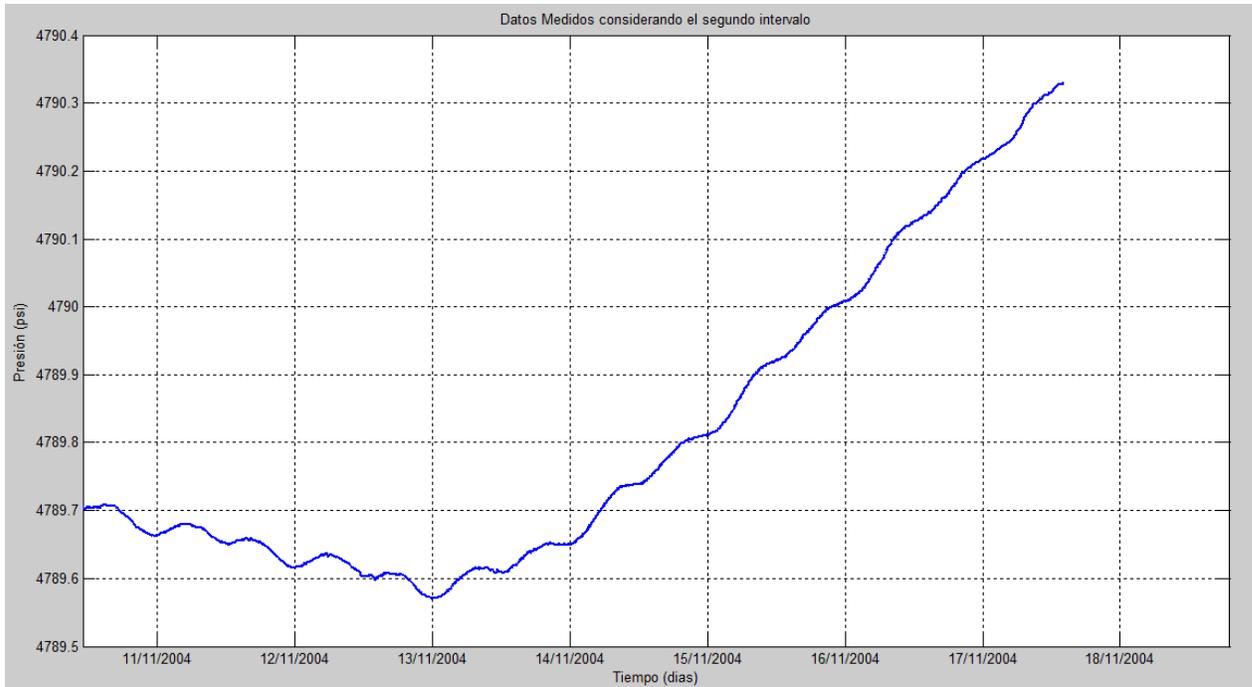


Fig. 7.20 Segundo intervalo de datos de presión que presentan el efecto sinusoidal: 10-17 de Noviembre de 2004 (pozo B-1 campo B).

El paso siguiente del análisis sería obtener el promedio móvil de 24 horas, pero como claramente se observó el efecto sinusoidal en ambos intervalos, con los datos medidos, se llevó a cabo el ajuste mediante una regresión polinomial; el resultado de este proceso se observa para cada intervalo en las gráficas **7.21** y **7.22** respectivamente, obteniendo así los *Datos Calculados*.

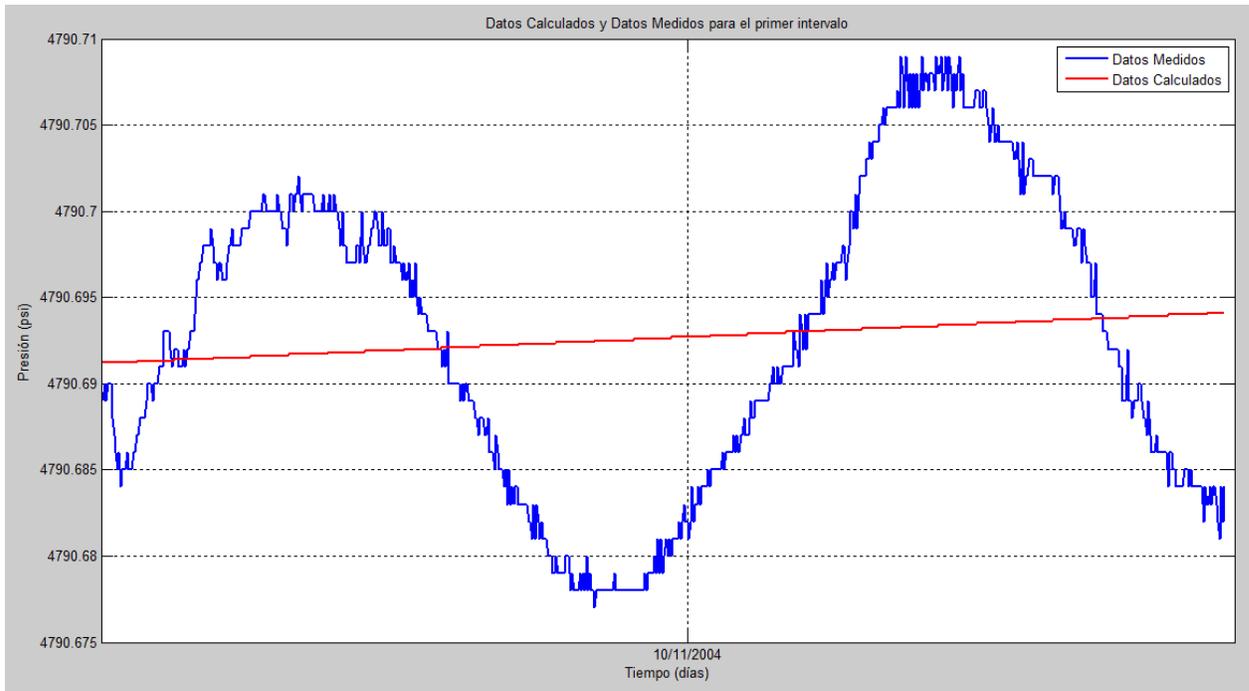


Fig. 7.21 Datos Calculados y Datos medidos para el primer intervalo (pozo B-1 del campo B).

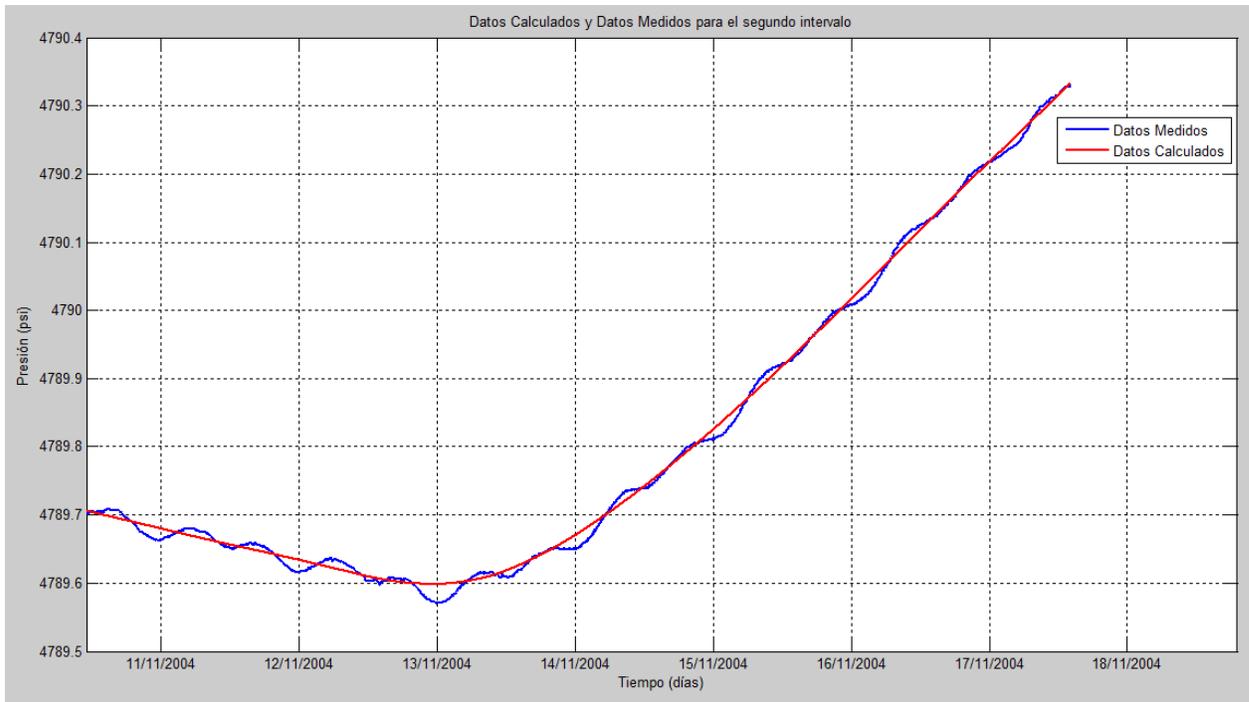


Fig. 7.22 Datos Calculados y Datos medidos para el segundo intervalo (pozo B-1 del campo B).

Una vez obtenidos los datos medidos y los datos calculados, se obtuvo el efecto periódico de la presión mediante la diferencia de estos datos. Los resultados para cada intervalo se muestran en las graficas 7.23 y 7.24, donde se aprecian en cada caso los datos medidos, los datos calculados y el efecto periodico.

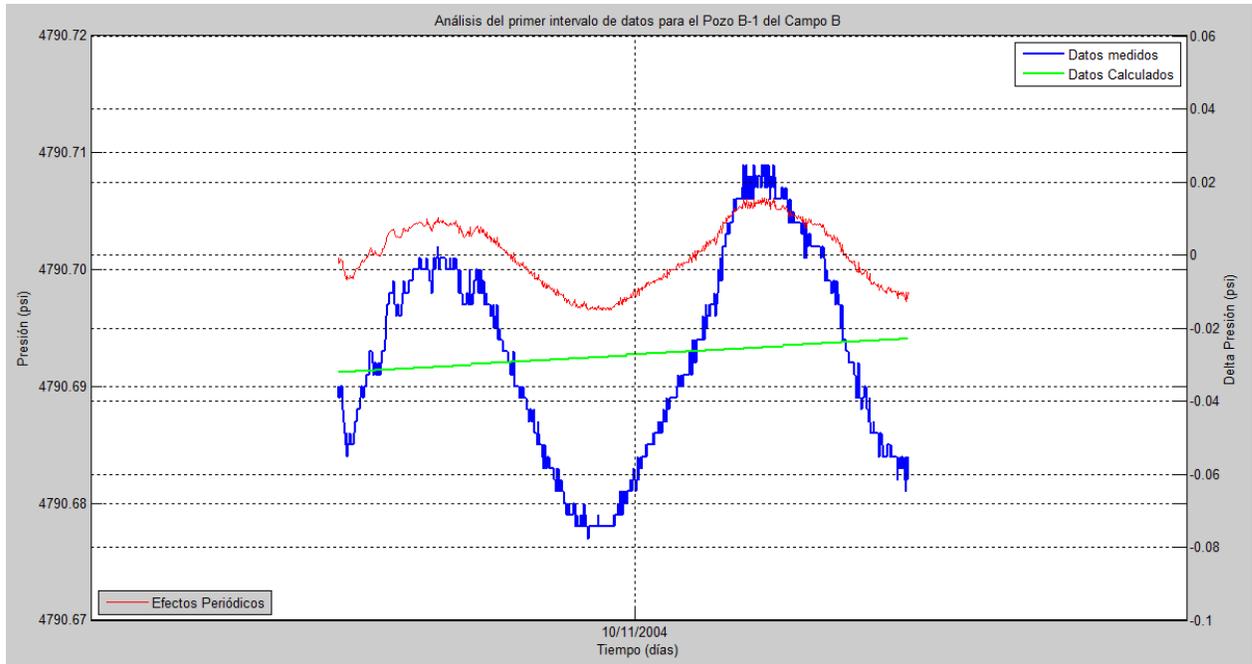


Fig. 7.23 Efecto periódico de la presión, datos medidos y datos calculados para el primer intervalo (pozo B-1 del campo B).

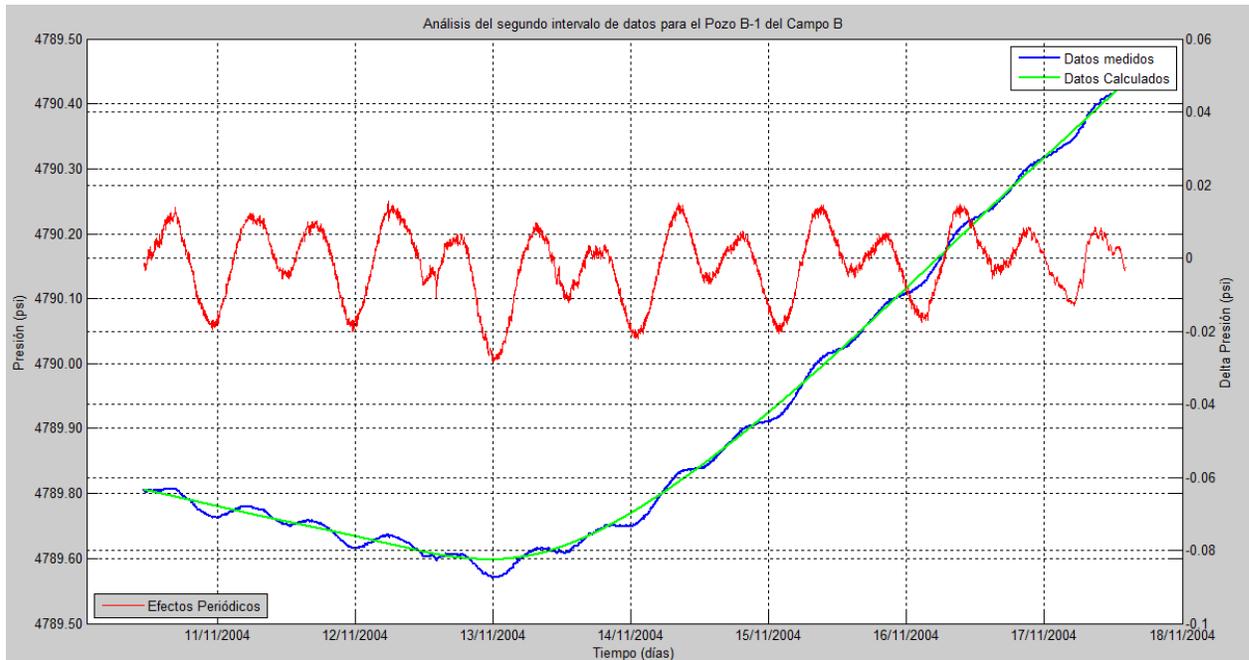


Fig. 7.24 Efecto periódico de la presión, datos medidos y datos calculados para el segundo intervalo (pozo B-1 del campo B).

VII.II.II Calculo del Potencial Gravitacional para el Pozo B-1 del Campo B

En el caso del campo B, los datos necesarios para el cálculo del potencial gravitacional se muestran en la **Tabla 7.10**.

Tabla 7.10 Datos necesarios para calcular el potencial gravitacional para el campo B.

DATOS DE ENTRADA PARA EL CALCULO DEL POTENCIAL GRAVITACIONAL DEL CAMPO B	
Intervalo de Fecha en que se llevó a cabo la prueba (D/M/A HH:MM)	9/11/2004 11:59 – 17/11/2004 14:13
Latitud (°)	17° 59' 00" N
Longitud(°)	93° 22' 00" W
Huso horario	GMT- 6

Siguiendo el procedimiento anterior, se ingresan los datos de entrada al programa **Alcyone Ephemeris**, para validar los valores de los parámetros astronómicos obtenidos con **EstComp**.

Region	Location	Longitude	Latitude
Mexico	Ecatepec	99° 03' 00" W	19° 36' 00" N
Mexico	Tonala	103° 14' 00" W	20° 37' 00" N
Mexico	Tlalnepantla	99° 13' 00" W	19° 32' 00" N
Mexico	Tijuana	117° 01' 00" W	32° 32' 00" N
México	Cardenas 2	17° 59' 00" W	0° 00' 00" N
México	Puerto Ceiba N	93° 13' 47" W	18° 27' 00" N
México	Zona B	93° 22' 00" W	17° 59' 00" N
Micronesia	Weno	151° 51' 00" E	7° 27' 00" N
Moldova	Chisinau	28° 51' 00" E	47° 00' 00" N
Monaco	Monte-Carlo	7° 25' 00" E	43° 44' 00" N
Mongolia	Ulaanbaatar	106° 55' 00" E	47° 55' 00" N
Morocco	Meknes	5° 33' 00" W	33° 54' 00" N
Morocco	Tetouan	5° 22' 00" W	35° 34' 00" N



Fig. 7.25 Carga de datos del campo B al programa **Alcyone Ephemeris**.

La comparación entre los resultados de cada uno de ellos, se muestran en la **Tabla 7.11** y la **Fig. 7.26**.

Las diferencias entre los resultados de los dos programas son pequeñas, lo cual corrobora que los resultados de **EstComp** son correctos. Teniendo esta certeza, se calculó el potencial Solar, Lunar y Total, mostrados en la **Fig. 7.27**, donde nuevamente se observa que el mayor aporte al potencial total, es de parte del potencial lunar.

TABLA 7.11 Diferencias máxima y mínima entre el programa *EstComp* y *Alcyone Ephemeris* al comparar los resultados obtenidos para los parámetros astronómicos principales para el campo B.

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL CALCULO DE LOS PARAMETROS ASTRONOMICOS ENTRE <i>EstComp</i> Y <i>Alcyone Ephemeris</i>		
PARAMETROS	MAXIMA DIFERENCIA	MINIMA DIFERENCIA
Fecha Juliana (JD)	0.005555	0.005555
Delta-T (ΔT)	0.000000	0.000000
GMST	0.005570	0.005570
LMST	0.000000	0.000000
Ascensión recta (α)		
• SOL	0.003381	0.000312
• LUNA	0.278944	0.176560
Declinación (δ)		
• SOL	0.000992	0.000256
• LUNA	0.138603	0.000003

UT-6h	SOL			SOL			LUNA			LUNA		
	Ascensión Recta (grad)			Declinación (grad)			Ascensión Recta (grad)			Declinación (grad)		
	Alcyone	Est. Compres.	Dif.	Alcyone	Est. Compres.	Dif.	Alcyone	Est. Compres.	Dif.	Alcyone	Est. Compres.	Dif.
2004-11-09 23:41	225.455232	225.4549193	0.00031288	-17.1720112	-17.17300325	0.000992	193.155242	192.8931874	0.26205482	-3.81383991	-3.698213231	0.115626677
2004-11-09 23:43	225.456636	225.4563222	0.00031335	-17.1724009	-17.17339277	0.00099185	193.172081	192.9100862	0.26199458	-3.82269499	-3.707083107	0.115611885
2004-11-09 23:45	225.458039	225.4577252	0.00031382	-17.1727906	-17.17378228	0.0009917	193.18892	192.9269861	0.26193432	-3.83155013	-3.715953032	0.115597101
2004-11-09 23:47	225.459442	225.4591281	0.00031429	-17.1731802	-17.17417178	0.00099155	193.205761	192.943887	0.26187407	-3.84040534	-3.724822997	0.11558234
2004-11-09 23:49	225.460846	225.4605311	0.00031476	-17.1735699	-17.17456128	0.0009914	193.222603	192.9607891	0.26181338	-3.8492606	-3.733693005	0.11556759
2004-11-09 23:51	225.462249	225.4619341	0.00031523	-17.1739595	-17.17495076	0.00099125	193.239446	192.9776922	0.26175351	-3.85811591	-3.742563056	0.11555285
2004-11-09 23:53	225.463653	225.463337	0.0003157	-17.1743491	-17.17534024	0.0009911	193.25629	192.9945965	0.26169322	-3.86697128	-3.751433148	0.115538128
2004-11-09 23:55	225.465056	225.46474	0.00031617	-17.1747388	-17.1757297	0.00099095	193.273135	193.0115019	0.26163291	-3.8758267	-3.760303283	0.115523416
2004-11-09 23:57	225.46646	225.466143	0.00031664	-17.1751284	-17.17611916	0.0009908	193.289981	193.0284083	0.26157259	-3.88468217	-3.769173455	0.115508718
2004-11-09 23:59	225.467863	225.467546	0.00031712	-17.175518	-17.17650861	0.00099065	193.306828	193.0453159	0.26151226	-3.89353771	-3.778043666	0.115494041
2004-11-10 00:01	225.469267	225.468949	0.00031759	-17.1759075	-17.17689804	0.0009905	193.323677	193.0622246	0.26145193	-3.90239329	-3.786913914	0.115479374
2004-11-17 13:25	233.208394	233.2050202	0.00337374	-19.148301	-19.1485832	0.0002573	307.107486	306.8534432	0.25404263	-24.4681867	-24.52336051	0.055173788
2004-11-17 13:27	233.209834	233.2064601	0.00337407	-19.1486348	-19.14889206	0.00025725	307.12867	306.8746829	0.25398733	-24.4633469	-24.51861373	0.05526681
2004-11-17 13:29	233.211275	233.2079001	0.0033744	-19.1489686	-19.14922579	0.00025721	307.149852	306.8959205	0.25393199	-24.4585043	-24.51386409	0.055359798
2004-11-17 13:31	233.212715	233.2093401	0.00337472	-19.1493023	-19.1495595	0.00025717	307.171033	306.9171559	0.25387659	-24.4536588	-24.50911159	0.055452744
2004-11-17 13:33	233.214155	233.2107801	0.00337505	-19.1496361	-19.1498932	0.00025713	307.19221	306.9383892	0.25382115	-24.4488106	-24.50435624	0.055545654
2004-11-17 13:35	233.215595	233.2122201	0.00337537	-19.1499698	-19.1502269	0.00025709	307.213386	306.9596203	0.25376567	-24.4439595	-24.49959803	0.055638527
2004-11-17 13:37	233.217036	233.2136601	0.0033757	-19.1503035	-19.15056058	0.00025706	307.234559	306.9808493	0.25371013	-24.4391056	-24.49483696	0.055731358
2004-11-17 13:39	233.218476	233.2151001	0.00337602	-19.1506372	-19.15089425	0.00025702	307.255731	307.0020761	0.25365455	-24.4342489	-24.49007304	0.055824155
2004-11-17 13:41	233.219916	233.2165401	0.00337635	-19.1509709	-19.15122791	0.00025698	307.2769	307.0233007	0.25359893	-24.4293894	-24.48530628	0.055916914
2004-11-17 13:43	233.221357	233.2179801	0.00337667	-19.1513046	-19.15156156	0.00025694	307.298066	307.0445231	0.25354327	-24.424527	-24.48053666	0.056009635
2004-11-17 13:45	233.222797	233.2194202	0.003377	-19.1516383	-19.1518952	0.0002569	307.319231	307.0657434	0.25348755	-24.4196619	-24.47576419	0.056102319

Fig. 7.26 Comparación de resultados de los parámetros astronómicos para el campo B entre *Alcyone Ephemeris* y *EstComp*.

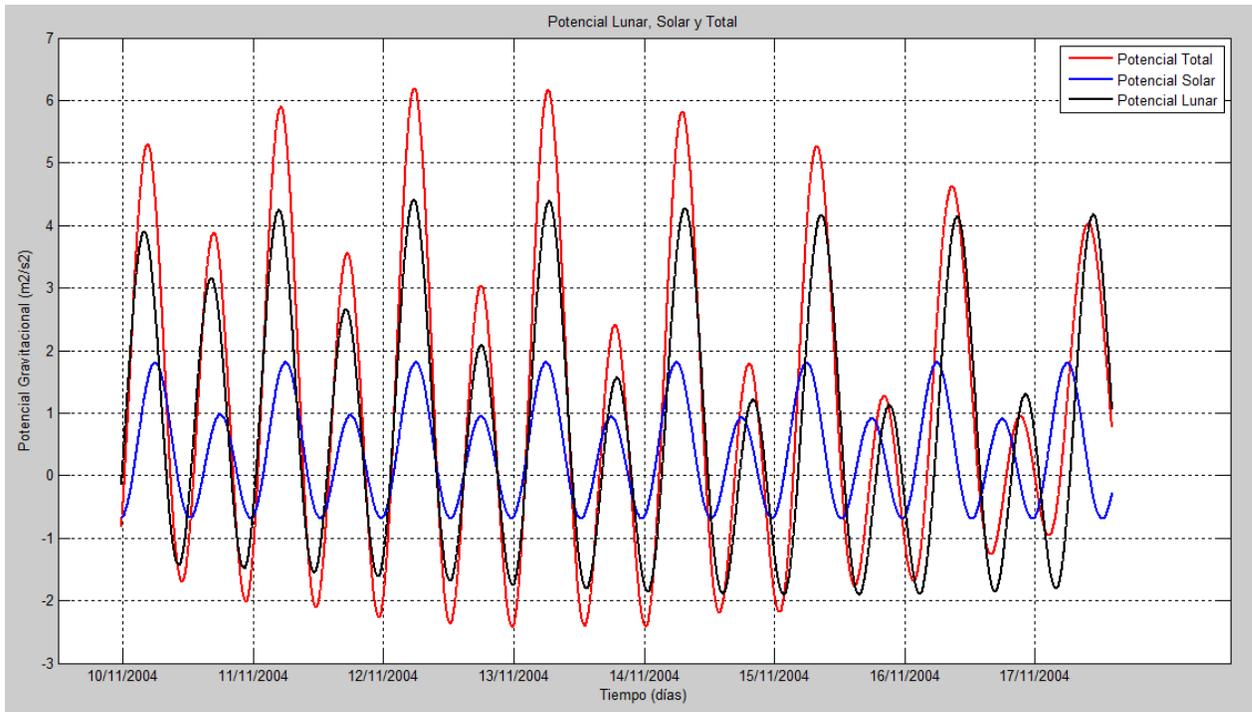


Fig. 7.27 Potencial Solar, Lunar y Total para el pozo B-1 del campo B.

Finalmente se compara el potencial gravitacional total y el efecto periódico de la presión en una sola gráfica (**Fig. 7.28**). Cabe mencionar que para esta comparación solo se utilizó el efecto de presión del segundo intervalo, ya que en el primer intervalo no se tienen datos para un día entero.

En la Fig. 7.28, nuevamente existe un desfase de 12 horas entre el potencial gravitacional total y el efecto periódico de la presión, el cual se ha considerado en la **Fig. 7.29**, pudiendo apreciarse la coincidencia de ambos efectos.

De esta manera, se está en condiciones de realizar la estimación de la compresibilidad total de la formación, incluida en el siguiente apartado.

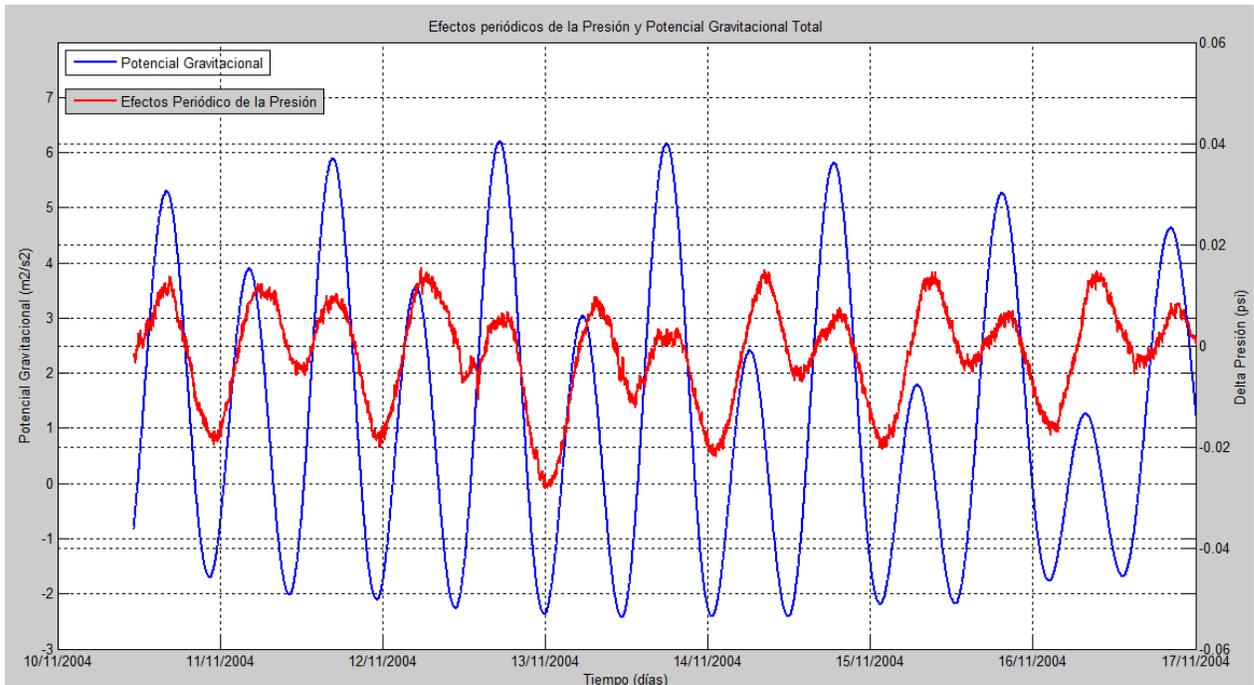


Fig. 7.28 Comparación entre el Potencial Gravitacional Total y los Efectos Periódicos de la presión obtenidos para el pozo B-1 del campo B.

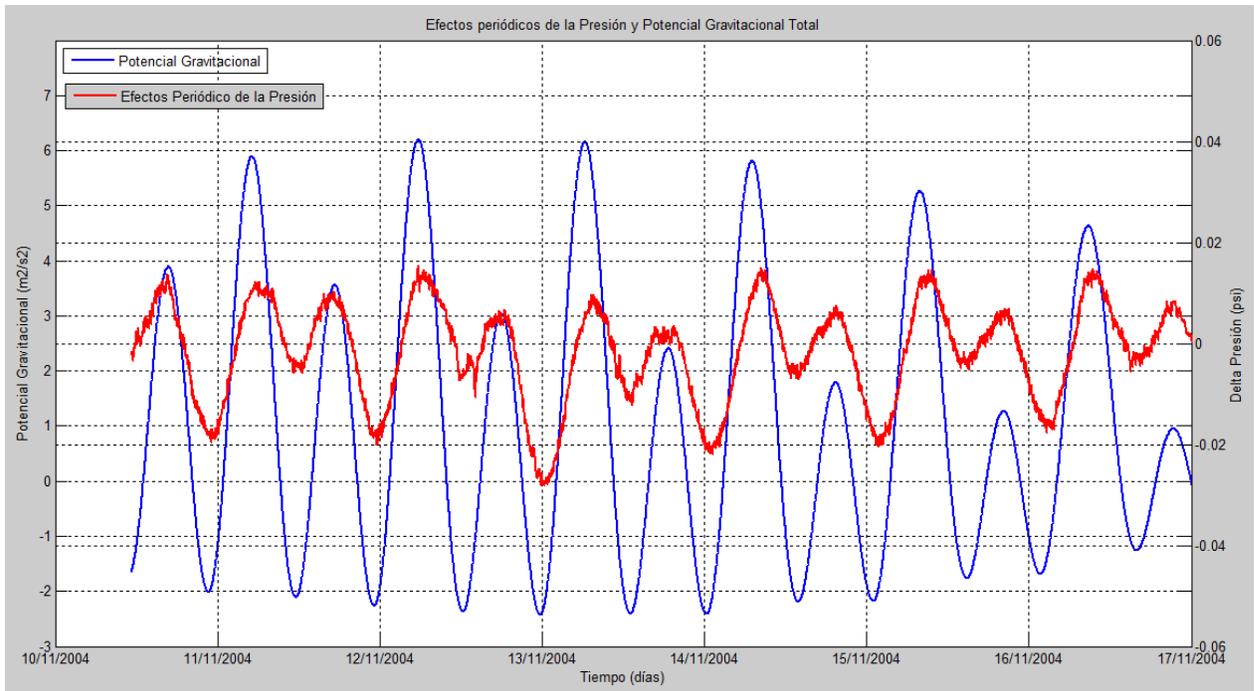


Fig. 7.29 Comparación entre el Potencial Gravitacional Total y los Efectos Periódicos considerando el desfase de 12 horas para el pozo B-1 del campo B.

VII.II.III Estimación de la Compresibilidad Total de la Formación del Pozo B-1 del Campo B

Para hacer uso de la ecuación (6.39):

$$C_f = \frac{0.49}{\phi r g} \left(\frac{\Delta V_2}{\Delta p} \right),$$

se comienza con el cálculo de las diferencias pico a pico del potencial gravitacional y de la variación de la presión. Los resultados se muestran en la **Tabla 7.12**.

Este cálculo se realiza para cada uno de los días que integran el intervalo en el que se tienen datos para el potencial gravitación y para la variación de la presión.

TABLA 7.12 Cálculo de las diferencias pico a pico del potencial gravitacional ΔV_2 y de la variación de la presión ΔP para el pozo B-1 del campo B.

CALCULO DE ΔP Y ΔV_2		
FECHA	ΔP (psi)	ΔV_2 (m ² /s ²)
11 Nov. 2004	0.030	8.00
12 Nov. 2004	0.029	8.56
13 Nov. 2004	0.021	8.56
14 Nov. 2004	0.022	8.00
15 Nov. 2004	0.031	7.03
16 Nov. 2004	0.023	5.89

A continuación, se calculó el producto porosidad-compresibilidad para cada día del intervalo de datos. Los resultados se muestran en la **Tabla 7.13**

TABLA 7.13 Cálculo del producto porosidad-compresibilidad ϕc_f .

FECHA	ϕc_f (10^{-9})
11 Nov. 2004	2094
12 Nov. 2004	2316
13 Nov. 2004	3198
14 Nov. 2004	2855
15 Nov. 2004	1780
16 Nov. 2004	2009

Debido a la falta de información, nuevamente no se tiene la certeza de las condiciones del campo para el año 2004, por lo cual, de la misma forma que para el caso del pozo A-1 del campo A, se hizo un cálculo de la c_f para un rango representativo de los valores de porosidad para este yacimiento en la **Tabla 7.14**.

TABLA 7.14 Cálculo de la compresibilidad de la formación c_f con valores representativos de porosidad ϕ para el pozo B-1 del campo B.

COMPRESIBILIDAD DE LA FORMACIÓN c_f ($\times 10^{-6}$)		
$\phi = 0.05$	$\phi = 0.06$	$\phi = 0.07$
41.6	39.6	33.9

En general, los valores de la compresibilidad de la formación obtenidos en ambos campos, son físicamente correctos, sin embargo, lo ideal sería hacer un análisis más profundo sobre los resultados obtenidos, para lo cual son necesarios tener conocimientos específicos de los campos. Lamentablemente, por la poca información que se tienen de ambos campos, no es posible discutir con más amplitud los resultados.

CAPITULO VIII CONCLUSIONES

El análisis de los datos de presión realizado en este trabajo, demuestra que es posible hacer buenas estimaciones de la compresibilidad de la formación si las mediciones de la presión de fondo son de suficiente calidad. En el caso de ambos pozos analizados, la calidad de los datos era lo suficientemente buena como para que las variaciones sinusoidales fueran claramente visibles. De la misma forma, como se mostró en las gráficas obtenidas en ambos casos, el ruido de los datos fue siempre perceptible y fácil de remover. Estas características, sumadas a la posición geográfica de los campos, jugaron un papel importante para lograr una apropiada comparación entre las variaciones sinusoidales de la presión y el potencial gravitacional.

El realizar una planeación de las fechas apropiadas para llevar a cabo las pruebas de presión es de importancia ya como en el caso de los pozos analizados, fechas cercanas a una luna llena o a una luna nueva dará las mayores amplitudes a los ciclos lo que conlleva a un mejor y más fácil cálculo de la compresibilidad (**J. L. Basbush, comunicación personal, 06 de septiembre de 2016**).

En las gráficas obtenidas, es clara la presencia de un retardo de fase en los datos de presión con respecto a los del potencial, el cual tiene un efecto secundario en la estimación de la compresibilidad de la formación, ya que esto hace que la respuesta de presión no sea sólo una función de los valores del potencial actual, sino también de aquellos inmediatamente precedentes, por tal motivo, las relaciones entre los picos grandes y los pequeños adyacentes entre la presión y el potencial no se corresponden, lo que en lugar de ser un obstáculo para el cálculo de compresibilidad, el retardo de fase en los datos de presión muestran una prometedora vía para la estimación de parámetros de flujo, tales como la movilidad media del fluido en el yacimiento $\left(\frac{k}{\mu}\right)$.

Por lo dicho anteriormente, lejos de llegar a conclusiones definitivas, el trabajo realizado plantea y deja abiertas posibilidades, trabajo por investigar, realizar y mejorar, con el propósito de que en un futuro, la herramienta computacional elaborada pueda ofrecer una herramienta adicional para realizar una caracterización de yacimientos más completa.

NOMENCLATURA

c = distancia media a partir del centro de la Tierra al centro del cuerpo perturbador (cm)

c_f = compresibilidad total de la formación (psi^{-1})

c_t = compresibilidad total del sistema (psi^{-1})

g = aceleración de la gravedad (cm/s^2)

G = constante de gravitación universal ($cm^3/(g \cdot s^2)$)

l = distancia a partir de un punto de observación sobre la Tierra al centro del cuerpo perturbador (cm)

m = masa del cuerpo perturbador (Sol o Luna) (g)

N_D = Número de Doodson (cm^2/s^2)

p = presión (psi)

r = radio de la Tierra (cm)

R = distancia a partir del centro de la Tierra al centro del cuerpo perturbador (cm)

u = desplazamiento (cm)

V = potencial gravitacional ($g \cdot cm^2/s^2$)

Subíndices

o = aceite

w = agua

g = gas

m = matriz

f = fractura

Letras griegas

α = ascensión recta ($grados$)

δ = declinación ($grados$)

ε = tensor de deformaciones ($g/(cm \cdot s^2)$)

σ = tensión ($g/(cm \cdot s^2)$)

τ_1 = ángulo horario suplementario (*grados*)

ϕ = porosidad (*fracción*)

latitud (*grados*)

Θ = dilatación (*adimensional*)

GLOSARIO ASTRONÓMICO

Fecha Juliana (JD). La fecha juliana, día juliano o DJ (JD, por sus siglas en inglés) es el número de días y fracción transcurridos desde el 1º de enero del año 4713 a. C. a las 12 del mediodía (puesto que en esa época los días empezaban al mediodía), hasta una fecha y hora determinada de interés. Con él podemos representar una época astronómica en forma de fecha juliana con 1 milisegundo de precisión.

Fecha Juliana Modificada (JDM). Forma más conveniente de la Fecha Juliana, en la que el punto cero se fija en el 17 de noviembre de 1858. Por lo tanto, Fecha Juliana Modificada = Fecha Juliana -2400000.5 días. En la Fecha Juliana Modificada, el día comienza a la medianoche. Los datos orbitales de los satélites artificiales de la Tierra son a menudo expresados en números de la Fecha Juliana Modificada.

Tiempo Universal (UT). Es el sistema de tiempo usado para medir eventos astronómicos. También es conocido como Tiempo Universal Coordinado (UTC) o Tiempo Civil de Greenwich. En esencia esta es la hora civil usada en Greenwich; corregida para las zonas horarias, también es usado en todo el mundo. Para convertir el UT a una zona horaria local se debe restar en cada país la diferencia horaria con Greenwich.

Tiempo Dinámico (TD). El Tiempo Dinámico, o TD, es el sistema de tiempo usado en la mayoría de los cálculos astronómicos. El problema que existe al usar el Tiempo Universal (UT) es que éste coincide con la rotación de la Tierra, la cual no es enteramente regular; su velocidad aumenta o disminuye de manera errática, y a veces un salto de un segundo tiene que ser insertado al final de un mes para corregirlo. El Tiempo Dinámico, por el otro lado, es un sistema de tiempo uniforme basado en relojes atómicos; es el sucesor del Tiempo de efemérides, un sistema anterior basado en los movimientos planetarios que servía para el mismo propósito, aunque no era tan preciso.

La diferencia TD-TU, también conocido como Delta-T, es normalmente del orden de un minuto; esta no puede ser predicha adecuadamente a futuro por los cambios irregulares en la rotación terrestre.

Delta-T (ΔT). Es la diferencia entre el Tiempo Dinámico (TD); el sistema de tiempo uniforme basado en relojes atómicos, y el Tiempo Universal (UT), el levemente variable sistema de tiempo basado en la rotación de la Tierra.

GMST(θ_0). El Tiempo Sideral es la medida de la rotación de la Tierra con respecto a los objetos celestes distantes. El día sideral de Greenwich comienza cuando el equinoccio de primavera está en el meridiano de Greenwich. GMST (Greenwich Mean Sidereal Time) es el ángulo horario de la posición media del equinoccio de primavera, dejando de lado los movimientos a corto plazo del equinoccio debido a la nutación.

LMST. El LMST (Local Mean Sidereal Time) es el GMST más la longitud del observador medida positiva al este de Greenwich. Este es el tiempo que comúnmente aparece en el reloj sideral de un observatorio. Así: $LMST = GMST + (\text{longitud este del observador})$.

Número de Doodson. Parámetro astronómico que depende de la distancia media de separación entre la Luna (o el Sol) y la Tierra, así como de sus masas. Tiene unidades de $\text{Longitud}^2 / \text{Tiempo}^2$.

Ascensión recta (α). La ascensión recta es una de las coordenadas astronómicas que se utilizan para localizar los astros sobre la esfera celeste, es equivalente a la longitud terrestre (coordenada geográfica). Esta cantidad es generalmente expresada en horas, minutos y segundos de tiempo.

Declinación (δ). En astronomía, la declinación es el ángulo que forma un astro con el ecuador celeste. Es una de las dos coordenadas del sistema de coordenadas

ecuatoriales, la otra coordenada es la ascensión recta. La declinación se mide en grados y es positiva si está al norte del ecuador celeste y negativa si está al sur. La declinación es comparable a la latitud geográfica (que se mide sobre el ecuador terrestre).

Eclíptica. Es la línea curva por donde «transcurre» el Sol alrededor de la Tierra , en su «movimiento aparente» visto desde la Tierra.

Oblicuidad de la eclíptica (ϵ). Algunas veces llamada también simplemente oblicuidad, es el ángulo de inclinación que presenta el eje de rotación de la Tierra con respecto a una perpendicular al plano de la eclíptica. Es el responsable de las estaciones del año.

Latitud Celeste. Latitud eclíptica o simplemente Latitud. Es medida (de 0° a $+90^\circ$ o 0° a -90°) a partir de la eclíptica, positiva al norte, negativa al sur.

Longitud Celeste. Longitud eclíptica, o Longitud. Es medida (de 0° a 360°) a partir del equinoccio de verano, positiva al este, a lo largo de la eclíptica.

Excentricidad. Es una medida del aplanamiento de una cónica. Cuanto más se separa la órbita de un cuerpo celeste de la circunferencia para adquirir la forma ovalada, mayor es su excentricidad. Se mide con un número comprendido entre 0 y 1, tanto más alargada sea la cónica.

APÉNDICE A

Consideraciones realizadas al llevar a cabo los cálculos

Al llevar a cabo los cálculos de los parámetros astronómicos, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- **FUNCIONES TRIGONOMÉTRICAS PARA ÁNGULOS GRANDES**

En los cálculos astronómicos frecuentemente aparecen ángulos grandes. En estos casos, es necesario reducir los ángulos al intervalo 0-360 grados, ya que algunas calculadoras de bolsillo o algunos programas proporcionan valores incorrectos para las funciones trigonométricas de ángulos grandes. Por ejemplo si tratamos de calcular el seno de 36 000 030 grados, el resultado debe ser exactamente 0.5.

Las calculadoras no obtienen directamente las funciones trigonométricas las cuales están dadas en grados, minutos y segundos. Antes de realizar las funciones trigonométricas, el ángulo debe ser convertido a grados y decimales. Entonces, por ejemplo, al calcular el coseno de $23^{\circ}26'49''$, primero se convierte este ángulo a 23.44694444 grados y entonces se usa la función coseno. También se debe tomar en cuenta que algunas de las calculadoras sólo pueden calcular en radianes, por lo cual el ángulo deberá ser convertido a radianes antes de aplicar la función trigonométrica.

- **ASCENCIÓN RECTA**

Las ascensiones rectas son generalmente expresadas en horas, minutos y segundos de tiempo. Si la función trigonométrica de una ascensión recta debe ser calculada, es necesario convertir el valor a grados (y a radianes, en caso de ser necesario). Recuerde que una hora corresponde a 15 grados.

Ejemplo: Calcular la $\tan \alpha$, donde $\alpha=9\text{h } 14\text{m } 55\text{s}.8$.

Primero convertimos α a horas y decimales:

$$\alpha=9\text{h } 14\text{m } 55\text{s}.8 = 9 + 14/60 + 55.8/3600 = 9.248833333 \text{ horas}$$

Entonces multiplicamos por 15

$$\alpha = 138^\circ.73250$$

Dividiendo este valor por $180/\pi = 57.295779513$ obtenemos el valor de α en radianes. Así encontramos que $\tan \alpha = -0.877517$.

• CUADRANTE CORRECTO

Cuando el seno, el coseno o la tangente de un ángulo son conocidos, el ángulo por sí mismo puede ser obtenido utilizando la función 'inversa'. Sin embargo, las funciones trigonométricas inversas no son de un solo valor. Por ejemplo, si $\sin \alpha = 0.5$ entonces $\alpha=30^\circ, 150^\circ, 390^\circ$, etc. Por esta razón, los equipos electrónicos regresan funciones trigonométricas inversas correctamente sobre sólo la mitad de la gama de 0 a 360 grados: arcoseno y arcotangente dan un ángulo comprendido entre -90 y +90 grados, mientras que arcoseno da un valor entre 0 y +180 grados.

Por ejemplo, al calcular $\cos 147^\circ$. La respuesta es -0.8387, que revierte a 147° cuando se calcula la función inversa. Pero si se calcula $\cos 213^\circ$, la respuesta es otra vez -0.8387 que, cuando se toma su arcoseno da 147° . Por lo tanto, cada vez que se toma la función inversa de sin, cos o tan, surge una ambigüedad que tiene que ser aclarado por uno u otro medio, cuando es necesario.

Por ejemplo, al calcular el seno de la declinación de un cuerpo celeste, la función arcoseno siempre dará esta declinación en el cuadrante correcto, porque todas las declinaciones se sitúan entre -90 y 90 grados. Este es también el caso del coseno de la separación angular. De hecho, cualquier separación angular está en el intervalo de 0° a $+180^\circ$, que coincide con el rango de la función coseno inversa.

Ahora, al considerar la conversión a partir de la ascensión recta y la declinación a la longitud y la latitud celestes mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}\cos \beta \sin \lambda &= \sin \delta \sin \varepsilon + \cos \delta \cos \varepsilon \sin \alpha \\ \cos \beta \cos \lambda &= \cos \delta \cos \alpha\end{aligned}$$

nombrando A y B los segundos miembros, y dividiendo la primera ecuación por la segunda, se obtiene $\tan \lambda = A/B$. Aplicando la función arcotangente para el cociente A/B se obtendrá el ángulo λ entre -90° y $+90^\circ$, con una ambigüedad de $\pm 180^\circ$. Esta ambigüedad puede ser removida con el siguiente análisis:

Si $B < 0$, se agregan 180° al resultado. Sin embargo, algunos lenguajes informáticos contienen la segunda función arcotangente importante, ATN2 o ATAN2, que utiliza los dos argumentos A y B por separado y devuelve el ángulo en el cuadrante correcto.

- **ÁNGULOS NEGATIVOS**

Los ángulos son expresados en grados (D), minutos (M) y segundos (S). Para hacer uso de ellos en los cálculos es necesario transformarlos a grados decimales, entonces, por ejemplo, el ángulo H se calculará de la siguiente manera:

$$H = D + M/60 + S/3600$$

En tal caso, se debe tener cuidado al trabajar con ángulos negativos. Si el ángulo es, por ejemplo: $-13^\circ 47' 22''$, entonces esto significa: -13° , $-47'$ y $-22''$. En este caso, los tres números tienen el mismo signo.

- **POTENCIAS DE TIEMPO**

Algunas cantidades se calculan por medio de una fórmula que contiene potencias de tiempo (T, T^2, T^3, \dots). Es importante señalar que este tipo de expresiones polinómicas

son válidas sólo para valores de T que no son demasiado grandes. Por ejemplo, en la fórmula para calcular la excentricidad de la órbita de Urano:

$$e = 0.046\,295\,90 - 0.000027337T + 0.000\,000\,0790 T^2$$

donde T es el tiempo medido en siglos julianos desde el comienzo del año 2000. Es evidente que esta fórmula es válida sólo para un número limitado de siglos antes y después del año 2000. Por ejemplo para T comprendida entre -30 y +30.

Para $|T|$ mucho más grande que 30, la expresión anterior ya no es válida. Para $T = -3305.8$ la fórmula daría $e = 1$, y una persona no experta, pensando que el equipo no puede cometer errores, deduciría que en el año -328580 la órbita de Urano era parabólica y, por tanto, que este planeta procede del exterior de nuestro Sistema Solar.

De hecho, la excentricidad e de la órbita de un planeta varía irregularmente en el curso del tiempo, aunque no puede exceder de un límite superior bien definido. Sin embargo, para un intervalo de tiempo de unos pocos milenios la excentricidad se puede representar con precisión por un polinomio de segundo grado.

APÉNDICE B

Estructura del programa

Como se ha mencionado el programa está dividido en tres secciones o módulos principales:

- Análisis de datos de presión
- Calculo del potencial gravitacional
- Estimación de la compresibilidad total del yacimiento

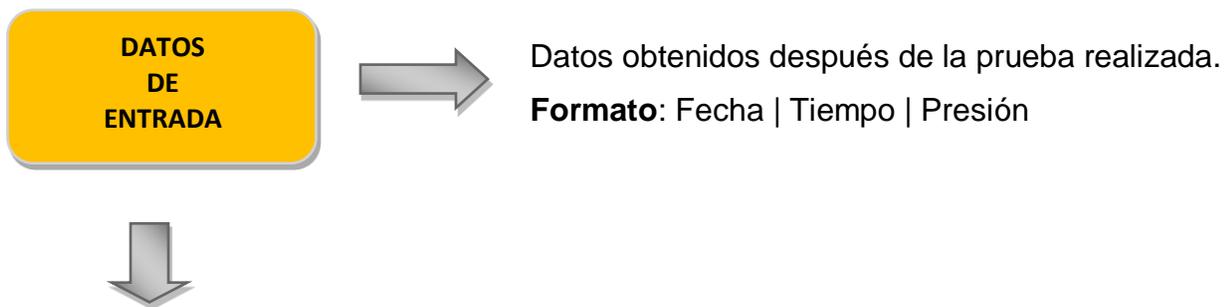
A continuación se presenta la estructura básica y general de programación que se siguió para cada uno de estos módulos.



Fig. B.1 Pantalla principal del programa *EstComp*.

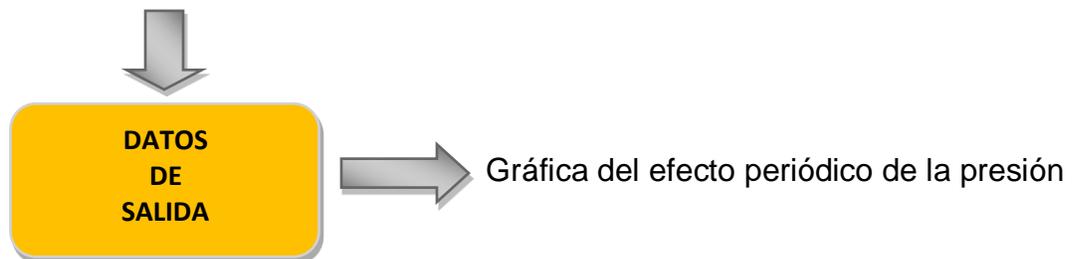
B.I Análisis de datos de presión

En la sección del análisis de datos de presión, se ha hecho el comentario de que el procedimiento es 100% visual, por lo que los pasos para llegar al resultado deseado dependerán de los filtros que cada usuario crea pertinentes llevar a cabo, así como las veces que sea necesario aplicar cada uno de ellos.

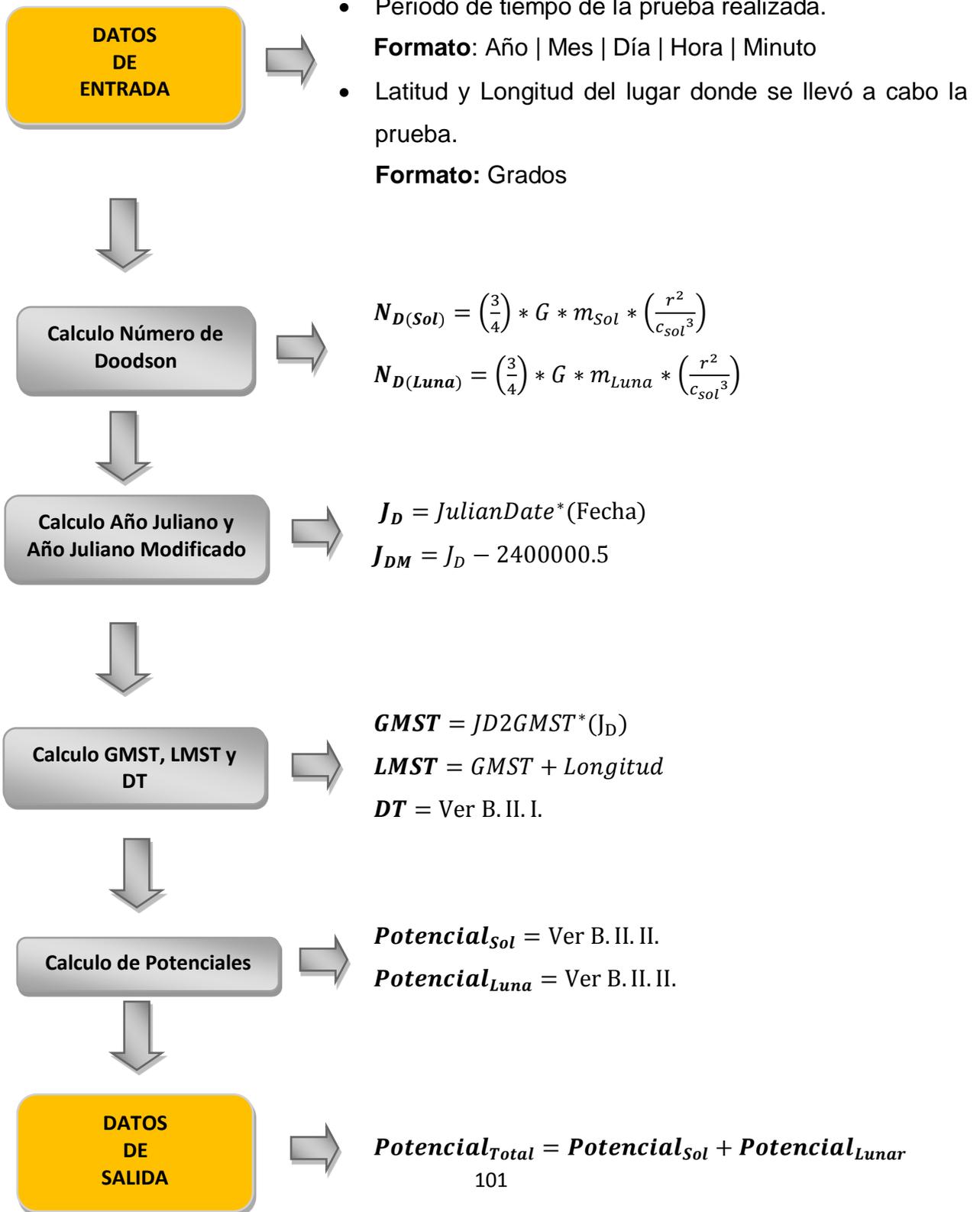


FILTROS OPCIONALES

- Gráfica de datos originales
- Gráfica de datos considerando los efectos causados por el sensor
- Gráfica de datos medidos (se considera un dato por minuto)
- Gráfica de datos considerando promedio móvil
- Gráfica de datos considerando promedio móvil y su regresión polinomial
- Gráfica de Datos Medidos y Datos Calculados



B.II Cálculo del potencial gravitacional



B.II.I Cálculo de ΔT

1. Se define el año decimal de la siguiente manera:

$$y = \text{año} + (\text{mes} - 0.5)/12$$

2. Dependiendo del año en el que se quiera realizar la estimación, se aplican diferentes polinomios, por ejemplo para los años entre 2005 y 2050, el polinomio será :

$$\Delta T = 62.92 + 0.32217 \cdot u + 0.005589 \cdot u^2$$

$$u = y - 2000$$

Para el cálculo de ΔT para años distintos al presentado, se recomienda consultar **(Meeus, J., 1991)**.

B.II.II Cálculo Potencial

Se presenta el proceso para el cálculo del potencial lunar, en el caso del potencial solar, se seguirán los mismos pasos, considerando los parámetros correspondientes al Sol. En ambos casos para un mayor detalle se recomienda consultar **(Meeus, J., 1991)**.

1. Se calculan los siguientes ángulos, reduciéndolos a su ángulo equivalente entre 0° y 360° para evitar trabajar con grandes números.

$$*L' = 218.31 + 481267.88 \cdot T - 0.0013 \cdot T^2 + \frac{T^3}{538841} - \frac{T^4}{65194000}$$

$$*D = 297.85 + 445267.11 \cdot T - 0.0016 \cdot T^2 + \frac{T^3}{545868} - \frac{T^4}{113065000}$$

$$*M = 357.52 + 35\,999.05 \cdot T - 0.0015 \cdot T^2 + \frac{T^3}{24490000}$$

$$*M' = 134.96 + 477198.86 \cdot T - 0.0089 \cdot T^2 + \frac{T^3}{69699} - \frac{T^4}{14712000}$$

$$*F = 93.27 + 483202.01 \cdot T - 0.0034 \cdot T^2 - \frac{T^3}{3526000} + \frac{T^4}{863310000}$$

$$*A_1 = 119.75 + 131.84 \cdot T$$

$$*A_2 = 53.09 + 479264.29 \cdot T$$

$$*A_3 = 313.45 + 481266.48 \cdot T$$

donde $T = \frac{JD-2451545}{36525}$.

2. Se calculan las siguientes sumas:

$$*\sum l = 62.88774 \cdot \sin M' + 1274027 \cdot \sin(2D - M') + 658314 \cdot \sin(2D)$$

$$*\sum r = -20905355 \cdot \cos M' - 3699111 \cdot \cos(2D - M') - 2955968 \cdot \cos(2D)$$

$$*\sum b = 5128122 \cdot \sin F + 280602 \cdot \sin(F + M') + 277693 \cdot \sin(M' - F)$$

3. Se debe tener en cuenta que los argumentos que contienen el ángulo M dependen de la excentricidad de la órbita de la Tierra, la cual actualmente decrece con el tiempo. Para tener en cuenta este efecto se deberá multiplicar los términos cuyo argumento tenga M o $-M$ por E , y aquellos que contengan $2M$ ó $-2M$ por E^2 , siendo E la excentricidad de la órbita terrestre en función del tiempo.

$$E = 1 - 0.002516 \cdot T - 0.0000074 \cdot T^4$$

4. Se obtienen las coordenadas lunares

$$\text{Longitud eclíptica} = L' + \frac{\sum l}{1000000}$$

$$\text{Latitud eclíptica} = \frac{\sum b}{1000000}$$

$$\text{Distancia} = 385000.5 + \frac{\sum r}{1000}$$

5. Se lleva a cabo el cambio de coordenadas eclípticas a ecuatoriales, para obtener la ascensión recta (α) y la declinación (δ).

$$\tan \alpha = \frac{\sin \lambda \cdot \cos \varepsilon - \tan \beta \cdot \sin \varepsilon}{\cos \lambda}$$

$$\sin \delta = \sin \beta \cdot \cos \varepsilon + \cos \beta \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \lambda$$

Donde β es la latitud eclíptica, λ es la longitud eclíptica y ε representa el valor de la oblicuidad de la eclíptica.

6. Se calcula el ángulo horario suplementario (τ_1).

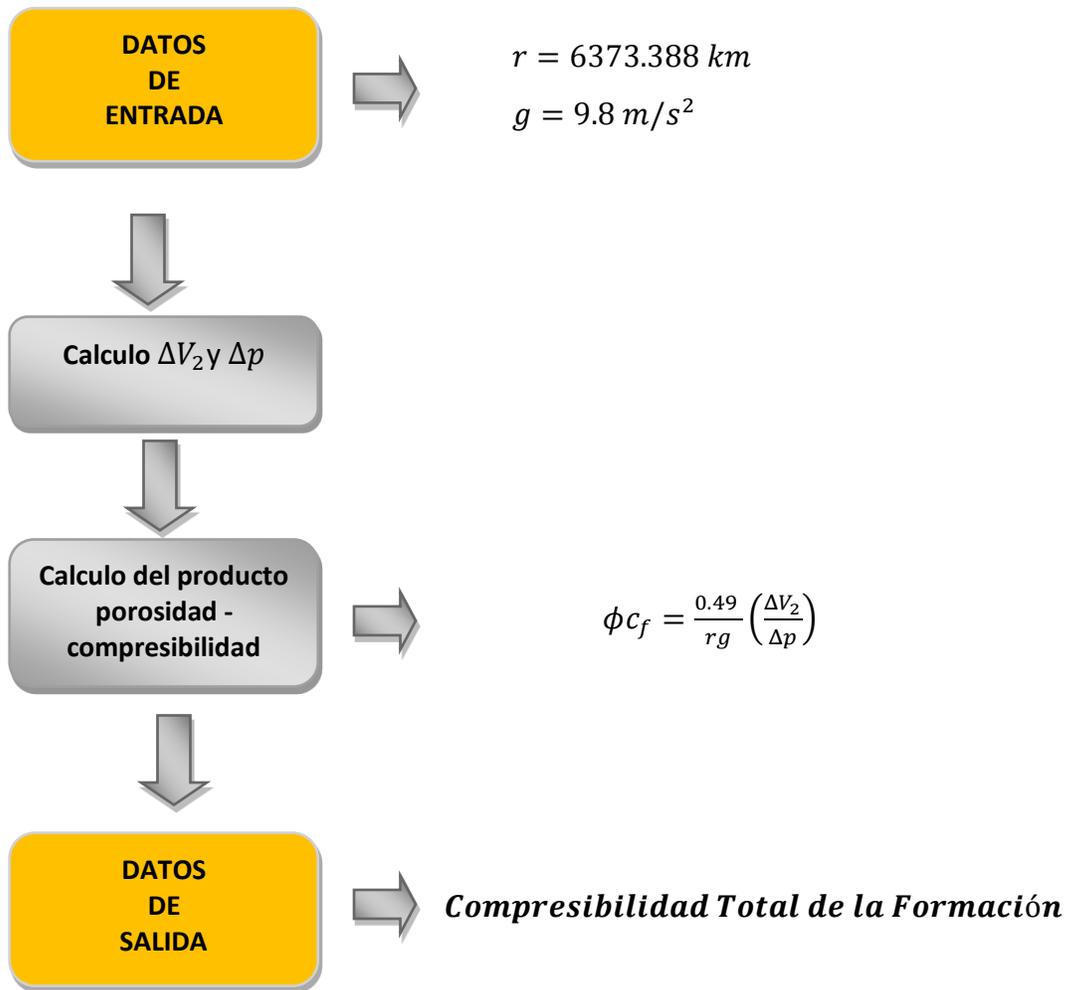
$$\tau = LMST + 180 - \alpha$$

7. Finalmente se calcula el potencial lunar con la ecuación:

$$V_2 = N_D \left(\frac{c}{R}\right)^3 \left[3 \left(\frac{1}{3} - \sin^2 \delta\right) \left(\frac{1}{3} - \sin^2 \phi\right) - \sin 2\phi \sin 2\delta \cos \tau_1 + \cos^2 \phi \cos^2 \delta \cos 2\tau_1 \right]$$

donde ϕ , en este caso, representa la latitud del punto a calcular.

B.II.III Estimación de la compresibilidad total del yacimiento



REFERENCIAS

- [1] Ascencio, F. Aplicación del fenómeno de la marea terrestre para la determinación de la compresibilidad total en YNF's [diapositivas PDF]. Querétaro. 2015
- [2] Arditty, P. and Ramey, H. 1978. Response of a closed well-reservoir system to stress induced by earth tides. *SPE* 7484.
- [3] Bidner, M. 2001. *Propiedades de la roca y los fluidos en reservorios de petróleo*. EUDEBA. Buenos Aires, Argentina.
- [4] Bodvarsson, G. 1970. Confined fluids as strain meters. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 75, No. 14.
- [5] Bredehoeft, J. 1967. Response of well-aquifer systems to Earth tides. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 72, No. 12.
- [6] Chang, E. and Firoozabadi, A. 2000. Gravitational potential variations of the Sun and Moon for estimation of reservoir compressibility. *SPE* 67952.
- [7] Dean, G., Hardy, R. and Eltvik, P. 1994. Monitoring compaction and compressibility changes in offshore chalk reservoirs. *SPE* 23142.
- [8] Deskin, R., Tinker, G. and Crawford, G. 1991. Using a pulse test to determine pore volume compressibility in a Gulf of Mexico unconsolidated reservoir. *SPE* 22700.
- [9] Geertsma, J. 1957. The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks. *SPE* 728.
- [10] Hall, H. 1953. *Compressibility of reservoir rocks*, *Trans. AIME*
- [11] Hemala, M. and Balnaves, C. 1986. Tidal effect in petroleum well testing, *SPE* 14607.
- [12] Johnson, A. 1973. Pore pressure changes associated with creep events on the San Andreas Fault. Ph. D. Thesis. Stanford University.
- [13] Jonathan M. and Lawrence B. 1982. Fracture orientation analysis by the solid Earth tidal strain method. *SPE* 11070.
- [14] Khurana, A. 1976. Influence of tidal phenomena on interpretation of pressure buildup and pulse test. *Aust. Pet. Expl. Journal*. Vol. 16. No. 1.

- [15] Langaas, K., Nilsen, K., and Skjaeveland, S. 2006. Tidal pressure response and surveillance of water encroachment. *SPE* 95763.
- [16] Levitan M. and Phan V. 2003. Identification of tidal signal in well test pressure data. *SPE* 84376.
- [17] Longman, I. 1959. Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 64. No. 12.
- [18] Longman, I. 1960. The interpolation of Earth-tide records. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 65. No. 11.
- [19] Machín, C. (1969). Mareas terrestres. *Seminario de Astronomía y Geodesia*. No. 62. 1-12.
- [20] McKee, R., Bumb, A. and Horner, D. 1990. Use a barometric response to obtain in-situ compressibility of a coalbed methane reservoir. *SPE* 17725.
- [21] Meeus, J. 1998. *Astronomical algorithms*. 2nd Edition. Willmann-Bell.
- [22] Melchior, P. 1966. *The earth tides*. Pergamon Press, Oxford.
- [23] Melchior, P. 1974. Earth tides. *Geophysical Surveys*. No. 1. 275-303.
- [24] Morland, L. and Donaldson, E. 1984. Correlation of porosity and permeability of reservoirs with well oscillations induced by earth tides. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 79.
- [25] Netland, S., Knapstad, B., and Holt, R. 1996. Estimation of in situ compaction modulus from tidal response in well test data. *SPE* 36821.
- [26] Newman, G. 1973. *Pore-volume compressibility*. JPT
- [27] PEP. Diseño de producción Campo B [diapositivas PDF]. 2015.
- [28] PEP. Proyecto integral del Campo A [diapositivas PDF]. 2008.
- [29] Pinilla, J., Trevisan, O. and Tinoco, F. 1997. Coupling reservoir and geomechanics to interpret tidal effects in a well test. *SPE* 38939.
- [30] Robinson, E. and Bell, R. 1971. Tides in confined well-aquifer system. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 76, No. 8.
- [31] Samaniego, F. Influencia de la compresibilidad de la formación c_f en los estudios de ingeniería de yacimientos [diapositivas PDF]. Tabasco. 2005.

- [32] Smit, D. and Sayers, C. 2005. Can tidal-driven pressure changes reveal reservoir properties for use in 4D monitoring. *Geology and geophysics World Oil*
- [33] Sumich, J.L. 1996. *An Introduction to the Biology of Marine Life*. Sixth edition. Dubuque, IA: Wm. C. Brown.
- [34] Takeuchi, H. 1950. On the Earth Tide of the Compressible Earth of Variable Density and Elasticity. *Trans., Am. Geophys.* No. 31.
- [35] Tarek, A. 2010. *Working guide of reservoir rock properties and fluid flow*. 2nd Edition. Elsevier
- [36] Ursin, J. and Zolotukhin, A. 1997. *Reservoir Engineering Notes*.
- [37] Van Golf-Racht. 1982. *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Elsevier.
- [38] Wannell, M. and Morrison S. 1990. Vertical permeability measurement in new reservoirs using tidal pressure changes. *SPE* 20532.
- [39] Xingru W. Ling, K. and Liu D., 2013. Deepwater reservoir characterization using tidal signal extracted from permanent dowhole pressure gauge. *IPTC* 16711.