

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EFFECTOS DE LAS VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE
LAS PRESIONES DE LOS FLUÍDOS EN EL POZO GUN 1X Y EN
CUENCAS PETROLÍFERAS DE VENEZUELA**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela para
Optar al título de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Hugo J. Bello L.

Caracas, Noviembre de 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EFFECTOS DE LAS VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LAS PRESIONES DE LOS FLUÍDOS EN EL POZO GUN 1X Y EN CUENCAS PETROLÍFERAS DE VENEZUELA

Tutor académico: Prof. Franklin Ruiz

Tutor industrial: Ing. Freddy Fernández

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela para
Optar al título de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Bello L. Hugo J.

Caracas, Noviembre de 2004

DEDICATORIA

A mi querida madre, Magallys Josefina

A todos mis familiares

Al valeroso pueblo de Petare

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de Venezuela ya que a través de su Universidad Central me ha apoyado en el desarrollo de mi carrera universitaria sepa ese pueblo que su ayuda será recompensada y no será desperdiciada.

Nuevamente a mi gloriosa madre sin ella este esfuerzo no hubiese rendido sus frutos su entrañable fe y confianza en que yo alcanzaría esta meta se convirtieron en frutos de esperanza y fuerza para enfrentar las dificultades, de nuevo muchas gracias mami.

A mi padre por ser mi mentor ideológico y a pesar de las dificultades, siempre me enseñó a mirar la senda del camino, así esta no se observara claramente. Gracias papa

A mi tutor industrial Ing. Freddy Fernández amigo y gran persona, excelente profesional, sin su ayuda hubiese sido imposible la culminación de este proyecto, en las trincheras de la gravimetría, Freddy combate armado de su gran cumulo de conocimientos y ayudado por su lanza de esperanzas cabalga como quijote por los difíciles caminos de la gravimetría en Venezuela, por su gran ayuda muchísimas gracias Profesor.

Al Ing. Miguel Marquina, el cual me ayudo con su apoyo y soporte en la realización de este trabajo especial de grado que empezó como una idea y se concreto en un emocionante proyecto innovativo. También muchas gracias Al Ing. Hector Pineda por su ayuda y colaboración

A mi tutor académico Lic. Franklin Ruiz por brindarme el apoyo necesario cuando nadie quiso hacerlo, su conocimiento y habilidad para explicar conceptos de difícil entendimiento hizo de este trabajo una escuela de aprendizaje donde todos los conocimientos básicos y teóricos adquiridos durante la carrera fueron aplicados a

plenitud, de una u otra manera siempre me presto la ayuda necesaria a pesar de nuestras diferencias ideológicas, realmente le agradezco su ayuda.

A mi querida amiga María Alejandra con su aporte clave, encendió la chispa necesaria para la ignición de esta tesis con lo cual pude culminar mi carrera venciendo los obstáculos a lo largo del camino. María se que eres muy capaz de superar obstáculos tanto así que me ayudaste a vencer los míos y si estas leyendo esto espero transmitirte la misma fuerza que tu me transmitiste a lo largo del desarrollo de este trabajo especial de grado. Gracias María, Arriba siempre!

“Al pana de los geofísicos” Ing. Eduardo Olivero por su valiosa colaboración durante buena parte del desarrollo de esta tesis, su valioso aporte contribuyo con el mejoramiento de algunos contenidos de la tesis, además de la sugerencia de aplicar crosscorrelación a las señales obtenidas en la última parte de la tesis. Su traspie durante la presentación de la tesis fue algo memorable y me sirvió de catarsis para enfrentar aquel momento de tensión, por tu colaboración Eduardo muchas gracias y por tu traspie 20 puntos

A la gente del Intevep, la Sra. Libia mi madre putativa siempre pendiente de lo que pasa a todo el grupo, a los panas “lacayos”, a la Misión, a mis amigas no las nombro pero ellas saben quienes son por que si se me olvida alguna puedo herir sentimientos, muchas gracias a todos.

Se me olvidaba agradecer a mis enemigos por que ellos te obligan a no dormirte en los laureles y nunca desfallecer en tu cometido (hay que estar alerta). Solo me queda decirles que NO lo lograron y si estas leyendo esto enemigo mío igual te lo agradezco

A todos aquellos que han hecho posible este proyecto principalmente gracias a Dios que me dio a mis padres y mi familia y es el responsable de que todas las cosas pasen bajo el Sol.

RESUMEN

Los cambios en la distribución de los campos de esfuerzos debido a las deformaciones en el globo terrestre, alteran las presiones de poro en los distintos yacimientos petrolíferos del mundo.

En este proyecto se estudia el comportamiento de esos cambios producto de las variaciones que ocurren en el campo gravitatorio con la latitud, la profundidad y el tiempo pero de manera local, es decir en Venezuela.

Con la latitud se estudian las variaciones provocadas en las presiones de poros y el esfuerzo vertical por los cambios de gravedad, esto es, la gravedad crece en lugares como el polo, donde la distancia de la superficie al centro de la Tierra disminuye con el consiguiente aumento de la misma, en comparación a los valores de ella observados en latitudes ecuatoriales donde la separación entre superficie y Tierra es mayor, esto se debe a la forma elipsoidal de la Tierra. Estas alteraciones del campo gravitatorio con la latitud se estudian como gradientes gravitatorios, en este trabajo se muestra y se sugieren 3 zonas de comparación del gradiente en Venezuela con un valor promedio de 0.432 psi/ft con variaciones en la cuarta cifra decimal, este valor no se usa correctamente aquí en Venezuela, debido a que se suele utilizar un valor correspondiente a latitudes foráneas mas específicamente las correspondientes al golfo de México. Esto provoca errores en las estimaciones de la geomecánica de los pozos cuando son utilizados estos gradientes.

Con respecto a las alteraciones del campo gravitatorio debidas a la profundidad, se hizo un estudio para observar el efecto en las presiones de poros y en los esfuerzos verticales a medida que se variaba la profundidad, también los parámetros densidad y gravedad. Se pudo inferir, que para un pozo no importa la profundidad a la cual se esté, se puede utilizar un valor constante del gradiente gravitatorio obtenido en superficie y extrapolarlo en profundidad, 0.432 psi/ft (para Venezuela).

En cuanto a las alteraciones del campo gravitatorio debidas al tiempo, la investigación se dividió en dos partes la primera estudia los programas utilizados para el modelaje de mareas terrestres, los resultados arrojados por los mismos describen un cálculo preciso de los períodos del fenómeno, evento éste que no se podía predecir con la utilización de algunos programas adquiridos por universidades del país. La segunda parte es una aplicación del análisis armónico de mareas en un pozo, con la obtención de una metodología para la extracción de la señal debida a la marea obtenida a partir de un registro de presiones dentro del pozo y su comparación en fase con un modelo teórico de mareas generado en la primera parte, se deja el problema abierto a posteriori para la estimación de la permeabilidad vertical de un yacimiento en la Sierra de Perijá a partir del desfase entre las dos señales.

LISTA DE CUADROS Y GRAFICOS

Lista de Figuras

	Pág
Fig. N° 1.1 Cuencas Petrolíferas de Venezuela, basadas en la distribución de sus Provincias	9
Fig. N° 1.2 Mapa de ubicación del pozo Gun 1x	11
Fig. N° 2.1 Sección estructural NW-SE a través de la Cuenca de Maracaibo desde los Andes Merideños hasta la Serranía de Perijá	17
Fig. N° 2.2 Columna estratigráfica regional	18
Fig. N° 2.3 Columna estratigráfica del pozo	25
Fig. N° 3.1 Esquema del cambio en profundidad de la gravedad	31
Fig. N° 3.2 Cubo de esfuerzos	34
Fig. N° 3.3 Giro en torno al centro común de gravedad	38
Fig. N° 3.4 Movimiento esquemático de la rotación del sistema	39
Fig. N° 3.5 Rotación sistema Tierra - Luna alrededor del Sol	40
Fig. N° 3.6 Ciclo lunar alrededor del Sol en un año	41
Fig. N° 3.7 Configuración vectorial de las fuerzas de mareas	42
Fig. N° 3.8 Fuerzas generadoras de mareas	43
Fig. N° 3.9 Bulbo de mareas de acuerdo con la teoría del equilibrio	44
Fig. N° 3.10 Efecto de la declinación de las orbitas	47
Fig. N° 3.11 Afelio, perihelio, perigeo y apogeo	49
Fig. N° 3.12 Explicación de la marea diaria	50
Fig. N° 3.13 Marea diurna en Pensacola Florida	51
Fig. N° 3.14 Marea semidiurna	52
Fig. N° 3.15 Marea mixta	53
Fig. N° 3.16 Desigualdad diurna	54
Fig. N° 3.17 Mareas muertas	55
Fig. N° 3.18 Mareas vivas	56
Fig. N° 3.19 Registro de variación mensual	57

	Pág
Fig. N° 3.20 Espectro de Fourier para las componentes de mareas	60
Fig. N° 3.21 Variación en latitud de la gravedad en mareas terrestres	65
Fig. N° 3.22 Efecto de la variación en longitud de la gravedad en mareas terrestres	66
Fig. N° 3.23 Curva que representa un mes de mareas a diferentes longitudes	67
Fig. N° 3.24 Variación anual de marea terrestre, modelo sintético	68
Fig. N° 3.25 Ejemplo de marea oceánica o dinámica en el puerto de Amuay	72
Fig. N° 3.26 Curva de restauración de la presión (Build Up)	73
Fig. N° 3.27 Representación física de la prueba de restauración	74
Fig. N° 4.1 Gravedad teórica vs. latitud, entre el Polo y el Ecuador	77
Fig. N° 4.2 Curva de la variación del gradiente vs. presión normal en latitudes comprendidas entre 0° y 90°	82
Fig. N° 4.3 Mapa de las variaciones de la gravedad teórica para diversas latitudes en Venezuela	84
Fig. N° 4.4 Mapa de gravedades observadas en Venezuela	86
Fig. N° 4.5 Mapa de gradientes de presión de poros para Venezuela	88
Fig. N° 4.6 Zonificación de gradientes de presión de poros en Cuencas Petrolíferas de Venezuela	91
Fig. N° 5.1 Variación de la gravedad con la profundidad	93
Fig. N° 5.2 Régimen de esfuerzos a lo largo del pozo	98
Fig. N° 5.3 Gráfica de la variación de la gravedad a medida que se profundiza en un pozo	99
Fig. N° 5.4 Diferencia entre el esfuerzo vertical usando gravedad variable, $g(z)$, menos el esfuerzo vertical usando gravedad constante	100
Fig. N° 5.5 Variación del gradiente de presión hidrostática con la profundidad	101
Fig. N° 6.1 Comparación de mareas terrestres sintéticas, utilizando dos programas diferentes	103
Fig. N° 6.2 Marea sintética generada con el programa ETGTAB para distintas longitudes.	104

	Pág
Fig. N° 6.3 Componente de marea terrestre M3	105
Fig. N° 6.4 Diagrama de la curva de la gravedad observada	107
Fig. N° 6.5 Gravedad real y gravedad teórica en función del tiempo	108
Fig. N° 6.6. Detalles de la gravitación teórica y sintética en función del tiempo	109
Fig. N° 6.7 Curva de predicción de mareas oceánicas Puerto de Amuay	110
Fig. N° 6.8 Comparación de datos de marea en unidades de gravedad y presión	111
Fig. N° 6.9 Comparación de marea sintética ETGTAB obtenidas con el programa Anno Domini	113
Fig. N° 7.1 Desviación del pozo Gun 1.x en tres vistas	116
Fig. N° 7.2 Evaluación petrofísica tope de la formación la Luna	117
Fig. N° 7.3 Evaluación petrofísica de la base de la formación la Luna	118
Fig. N° 7.4 Evaluación formación Maraca y tope de la formación Lisure	119
Fig. N° 7.5 Evaluación de la formación Lisure	120
Fig. N° 7.6 Estado mecánico del pozo Gun 1x para el momento de la prueba de restauración de la presión (Build up)	121
Fig. N° 7.7 Gráfico de prueba de restauración de Temperatura vs. Tiempo	123
Fig. N° 7.8 Intervalo de la prueba correspondiente entre la hora 0 y la 120	124
Fig. N° 7.9 Onda de rebote debida a la prueba de producción	126
Fig. N° 7.10 Curva que muestra la caída de presión en el yacimiento causado por falla mecánica	127
Fig. N° 7.11 Segmento aproximadamente lineal de la señal de presión de ajuste y por mínimos cuadrados	130
Fig. N° 7.12 Señal Real menos la recta de ajuste	131
Fig. N° 7.13 Comparación de la señal de la prueba de restauración con la fase lunar	132
Fig. N° 7.14 Señal real con filtro pasa bajo con ceros a la izquierda y derecha	133
Fig. N° 7.15 Señal sintética sin filtrar con ceros añadidos a la izquierda y a la derecha	134

	Pág
Fig. N° 7.16 Espectro de amplitud de la señal experimental	135
Fig. N° 7.17 Espectro sintético de Fourier	137
Fig. N° 7.18 Intervalo del espectro sintético donde se ve reflejado M_3	138
Fig. N° 7.19 Filtro aplicado a la señal $S(f)$ y su correspondiente imagen en el espejo	141
Fig. N° 7.20 Señal real filtrada y normalizada en el dominio del tiempo	142
Fig. N° 7.21 Señal sintética filtrada y normalizada	143
Fig. N° 7.22 Comparación visual de las inversas de la señal experimental y sintéticas	146
Fig. N° 7.23 Crosscorrelación de la señal experimental y sintética	147

Lista de tablas

	Pág.
Tabla N° 3.1 Análisis armónico, componentes de la marea en la parte oceánica	61
Tabla N° 4.1 Variaciones de la gravedad con la latitud	76
Tabla N° 4.2 Gradiente y presión normal	81
Tabla N° 4.3 Clasificación del gradiente por cuencas	90
Tabla N° 7.1 Componentes de mareas presentes en el experimento	139

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	iv
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
LISTA DE GRÁFICOS	vii
LISTA DE CUADROS	xi
INDICE GENERAL	xii
CAPÍTULO I	
I.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivo General	4
1.1.2 Objetivos específicos	4
1.2 Planteamiento del problema	5
1.3 Investigaciones Previas	6
1.4 Ubicación de las zonas en estudio	9
1.4.1.- Ubicación del pozo en estudio	10
1.5 Metodología	12
1.5.1 Diagrama de Flujo	14
CAPÍTULO II	
2.- MARCO GEOLÓGICO	15
2.1 Geología Regional. Cuenca de Maracaibo	19
2.1.1 Sistema petrolero	19
2.2.- Geología Local	19
2.2.1.- Litofacies de Perija Central a nivel Cretácico	19
2.2.2.- Descripción de las formaciones encontradas en el pozo	20
CAPÍTULO III	
3.- MARCO TEÓRICO	26
3.1.- Teoría gravitatoria	26
3.1.1.- Diferencias entre el elipsoide de referencia y el geoide	26

	Pág
3.1.1.1.- El Geoide	26
3.1.1.2.- El Elipsoide de referencia	26
3.1.2.- Gravedad observada y gravedad teórica	27
3.1.3.- Reducción de la gravedad a un nivel de referencia	29
3.1.3.1.- Anomalía de Bouguer	29
3.1.3.2.- Anomalía gravimétrica	30
3.1.3.3.- Corrección Aire Libre	30
3.1.3.4.- Corrección de Bouguer	30
3.1.3.5.-Corrección Topográfica	30
3.1.3.6.- Mediciones de densidad en pozos	31
3.2.- Presión de poros	32
3.2.1.- Condiciones normales de compactación	32
3.2.2.-.Presión Anormal	33
3.2.3.-. Diferencia entre esfuerzos y presiones de poro	33
3.3.- Esfuerzos “In Situ”	34
3.4.- Teoría de mareas	36
3.4.1.- Consideraciones históricas	36
3.4.2.- Diferencia entre mareas “oceánicas” y “terrestres”	36
3.4.3.- Mareas en Venezuela	37
3.4.4.- Fuerzas generadoras de mareas	38
3.4.5.- Mareas vs. Rotación terrestre	43
3.4.6.- Teoría del Equilibrio (mareas oceánicas)	44
3.4.7.- La Teoría Dinámica (mareas oceánicas)	45
3.4.7.1 Diferencias entre la teoría del equilibrio y la dinámica	46
3.4.8.- Efectos de la declinación y la distancia	46
3.4.9.- Tipos de mareas (Mareas oceánicas)	50
3.4.9.1.- Mareas diarias (concepto)	50
3.4.9.2.- Mareas diurnas (respuesta oceánica)	51
3.4.9.3.- Mareas semidiurnas (respuestas a los océanos)	52

	Pág
3.4.9.4.- Mareas mixtas	53
3.4.10.- La desigualdad diurna	54
3.4.11.- Variación mensual de la marea	55
3.4.12.- Mareas de la corteza terrestre sólida	52
3.4.13.- Respuesta ideal en latitud del modelo de mareas terrestres	66
3.4.14.- Respuesta ideal en longitud del modelo de mareas terrestres	66
3.4.15.- Respuesta mensual de la marea	67
3.4.16.- Respuesta Anual de la marea	68
3.4.17.- Otros períodos de tiempo de la marea	69
3.4.18.-El Análisis Armónico	69
3.4.19.- Teoría espectral de las mareas	70
3.5.- Pruebas de restauración de la presión	73
3.5.1.- Concepto	73
3.5.2.- Corrección por mareas	75
CAPÍTULO IV	
4.- VARIACIONES DE LA GRAVEDAD CON LA LATITUD	76
4.1.- Evaluación y comparación de formulas teóricas de la gravedad	76
4.2.- Variación en el gradiente de presión de poros	77
4.3.- Variación del gradiente de presión de poros y el esfuerzo vertical con la latitud a nivel global	80
4.4.- Variación de la gravedad teórica con la latitud en Venezuela	83
4.5.- Mapa de gravedades observadas en Venezuela	85
4.6.- Gradientes de presión de poros en Venezuela	87
4.7.- Variación del gradiente de presión de poros en cuencas de Venezuela	90
CAPÍTULO V	
5.- EFECTOS DE LAS VARIACIONES DE LA GRAVEDAD CON LA PROFUNDIDAD	92
5.1.- Variación de la gravedad con la profundidad	92

	Pág
Construcción de un registro de densidad y de velocidades de ondas P y S desde la superficie	93
.-	
5.3.- Variación de la densidad “In Situ” con la profundidad	94
5.4.- Determinación de esfuerzos y presión de poros	98
5.5.- Gradientes de presión de poros contra profundidad	101
CAPÍTULO VI	
6.- EFECTO DE LAS VARIACIONES DE LA GRAVEDAD CON EL TIEMPO	102
6.1 Programas simuladores de mareas terrestres	102
6.1.1.- Comparación entre los algoritmos del ETGTAB y MT80	103
6.1.2.-Componentes de marea consideradas en el ETGTAB	105
6.1.3.- Comparación de datos reales con datos sintéticos	106
6.2.- Ejemplo de predicción de mareas oceánicas observadas y sintéticas	110
6.3.- Variación de la presión por el efecto de las mareas	111
6.4.- Programa Año Domini generador del Calendario Lunar	112
CAPÍTULO VII	
7.- ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE GRAVEDAD EN EL TIEMPO OBSERVADAS EN LAS PRUEBAS DE RESTAURACIÓN DE LA PRESIÓN (BUILD - UP)	114
7.1.- Historial de producción del pozo (Evaluación en 1997 y Reevaluación en el año 2000)	114
7.1.1.- Desviación del pozo GUN IX	116
7.1.2.- Característica Petrofísica de los intervalos en estudio	117
7.1.3.- Estado mecánico del pozo durante la prueba de restauración	121
7.2.- Prueba de restauración de la presión	122
7.2.1.- Análisis de la prueba	124
7.2.2.- Selección del intervalo de la señal de presión para el análisis de marea	128

	Pág
7.2.3.- Preparación de las señales para la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier	129
7.2.4.- Espectro de amplitud de las señales real y sintética	135
7.2.5.- Filtrado de las señales en el dominio de la frecuencia	140
7.2.6.- Transformada Inversa de Fourier. De la señal real y sintética	140
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	148
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
APÉNDICES	156

CAPÍTULO I

1.- INTRODUCCIÓN.

Desde los comienzos de la civilización el hombre siempre se ha interesado en predecir los efectos de ciertos fenómenos naturales ya sea por necesidad, misticismo o simple curiosidad, ha logrado descifrar muchos de ellos. Entre estos, está la gravedad, responsable de que no salgamos disparados al espacio debido a la rotación terrestre o de que las cosas sean atraídas hacia el centro de la Tierra.

Newton en 1687 describe la fuerza de gravedad en su tratado titulado “Filosofía Natural y Principios Matemáticos”, entre otras profundidades matemáticas, publicaba “La Ley de atracción gravitacional”, la cual establece lo siguiente: “La magnitud de la fuerza gravitatoria entre dos masas, es proporcional a cada una de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de su separación” (Blakely R., 1990). En este trabajo de investigación se utiliza esta ley como punto de partida.

Se estudian en detalle los diversos efectos que tienen las variaciones de la gravedad con la latitud, la profundidad y el tiempo, sobre las presiones de poro y los esfuerzos in situ en el subsuelo. Esto es con la finalidad de poder estimar, en futuras investigaciones, las propiedades mecánicas de las rocas, tales como la compresibilidad volumétrica y la permeabilidad.

En el Capítulo I se plantea el problema y los objetivos de este Trabajo Especial de Grado, investigaciones previas, la importancia de realizar este tipo de estudio en Venezuela, la ubicación y la Metodología.

En el Capítulo II se realiza un breve resumen geológico de las cuencas de Venezuela y se hace énfasis en la geología local del área de Perijá, donde se encuentra uno de los pozos en estudio.

En el Capítulo III se explican brevemente los fundamentos teóricos del estudio. Se analiza la diferencia entre mareas oceánicas y terrestres, la reducción de la marea a un nivel de referencia, esfuerzos y presión de poros “In Situ” y pruebas de presión en pozos.

En el Capítulo IV, se estudian fórmulas de la gravedad teórica que dependen de la variación en latitud y a su vez se estudia el efecto que producen estas en la constante de gradiente de presión de poros. Por lo general en Venezuela, se suele utilizar un gradiente de presión de poros de 0.433 (psi/ft), el cual difiere del valor asociado a la gravedad teórica en las latitudes de Venezuela. El valor de 0.433 (psi/ft) corresponde a latitudes en el Golfo de México. Por esto, en este trabajo se determina el valor de esa constante para latitudes entre 6° y 11°, específicamente en cada una de las Cuencas petroleras de Venezuela.

La variación de la gravedad con la latitud, ha sido bien estudiada gracias a los avances en tecnología de satélites y los aportes hechos por la geodesia entre otras ramas de la ciencia que se abocan a resolver el problema que representa modelar la forma de la tierra en sus diversas latitudes. Mediante estudios del geoide y el elipsoide de referencia se han elaborado diversos modelos teóricos de la gravedad y entre ellos, los más aceptados internacionalmente, han sido los elipsoides de referencia de 1930, 1967 y 1980, con sus parámetros asociados. (Blakely R., 1990).

Además de estudiar como varía la gravedad con la latitud, es necesario estudiar como varía esta con la profundidad y analizar la importancia que tiene esta variación para estudios posteriores. El valor correcto de la gravedad puede ser usado en estudios geomecánicos, los cuales a su vez son útiles en el análisis de la estabilidad del hoyo, problemas de arenamiento y estimulación mediante fracturamiento hidráulico. Por estas razones, en el Capítulo V, se estudia la magnitud del efecto de la variación de la gravedad con la profundidad sobre las estimaciones de esfuerzos verticales, de la

misma manera se estudia el comportamiento de la presión de poros, aunado a los cambios de densidad en el pozo y al gradiente gravitatorio.

En el Capítulo VI de la tesis se hace un estudio comparativo de dos programas generadores de mareas sintéticas terrestres con el objeto de calibrar las respuestas en tiempo de ambos y así verificar la confiabilidad de ambos programas. También se estudia la respuesta en latitud y longitud arrojada por los modelos y la respuesta obtenida para un modelaje oceánico en la bahía de Amuay, Venezuela.

Finalmente en el Capítulo VII se estudian las presiones de poros observadas en un yacimiento entre 7.000 y 8000 pies de profundidad, en el área de Perijá, Estado Zulia, Se aplica un método que estudia las variaciones en la curva de presión de poros a través de un análisis espectral de la misma, usando Transformada de Fourier. De este análisis, se determinó que el efecto de algunas componentes de la marea terrestre se pueden detectar con un sensor de presión de una sensibilidad igual o menor a 0.01 PSI. Además el Análisis de Fourier se puede aplicar en pruebas de restauración de la presión aun cuando en estas se hayan presentado fallas mecánicas (fugas) y así ser reutilizadas para estudios posteriores dentro del yacimiento.

1.1.- OBJETIVOS

1.1.1.- OBJETIVO GENERAL.

Elaborar una caracterización de los efectos de las variaciones de la gravedad en la presión de poros en diferentes regiones petroleras de Venezuela y localmente en un pozo perforado en el área de Perijá.

1.1.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS.

Estudiar los diversos efectos provocados por los cambios en latitud, profundidad y tiempo en la gravedad.

Zonificar las cuencas de Venezuela por gradientes de presión de poros para facilidad de cálculos Ingenieriles de yacimientos calculando las constantes en función de la gravedad teórica.

Mostrar la variación del gradiente de presión de poros con la profundidad y también cuando la gravedad es variable.

Mostrar la variación del esfuerzo vertical con la profundidad cuando la gravedad y la densidad son variables, también cuando sólo varía la densidad.

Comparar los programas de predicción de mareas terrestres con datos experimentales para verificar cuan confiables son estos programas.

Mostrar una metodología que aproveche un fenómeno natural como lo son las mareas terrestres, para extraer a partir de la prueba de restauración de la presión (Build Up), del pozo Gun 1-x, las componentes armónicas necesarias para poder medir el desfase entre la señal teórica y la experimental.

1.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los cambios en la distribución de los campos de esfuerzos debido a las deformaciones en el globo terrestre, alteran las presiones de poro en los distintos yacimientos petrolíferos de Venezuela.

En este proyecto se estudia el comportamiento de esos cambios producto de las variaciones que ocurren en el campo gravitatorio con la latitud, la profundidad y el tiempo.

Las variaciones en los esfuerzos “in situ” con el tiempo pueden ser monitoreadas y también estimadas teóricamente. Estas variaciones de $\sigma(t)$ y $P(t)$ con los cambios provocados por las mareas terrestres y oceánicas debido al movimiento de los astros, pueden ser útiles para la estimación de propiedades “in Situ” del yacimiento petrolero. Las propiedades estimadas de esta manera serían de mucho interés por que representan un valor promedio para todo el yacimiento, el cual sería casi imposible determinarlo a través de métodos convencionales. Pocos trabajos se han realizado en esta dirección y quizás se ha debido a la ausencia de datos de presión, básicos para la realización de un estudio como éste. En el área de Périja, donde es muy difícil estimar una permeabilidad promedio de todo un yacimiento, debido a la complejidad geológica de la zona, el estudio de presiones es fundamental.

1.3.- INVESTIGACIONES PREVIAS.

Las variaciones de la gravedad debidas a tres parámetros físicos, como lo son: la latitud, el tiempo y la profundidad, han sido ampliamente reseñadas a lo largo de todo el siglo anterior, en cuanto a la variación de la gravedad con la latitud, se han efectuado muchas investigaciones a nivel global, estudios del geoide y el elipsoide de referencia realizados por la Asociación Internacional de la Geodesia (AIG), donde se arrojaron fórmulas conocidas para los años 1930, 1967 y 1980 utilizadas en esta tesis. Las fórmulas aplicadas para esos años correspondían a los Congresos Mundiales en Geodesia, de allí que la Comunidad Internacional adoptó la de 1930 por ser la primera propuesta a nivel internacional; la de 1967, arrojó precisión en los cálculos para nuevos parámetros del elipsoide de referencia, también utilizada frecuentemente en la exploración geofísica y la de 1980, la mas reciente estudiada.

En Venezuela se han efectuado estudios del geoide local (Liberal L., 1989), En ese estudio se calculan los parámetros del mismo, recientemente ya ha sido presentado el mapa geoidal de Venezuela por parte de la universidad del Zulia. Sin embargo no se ha elaborado con anterioridad un mapa regional con valores de gradientes de presión de poros para el País.

En cuanto a la variación en profundidad los estudios realizados por Ruiz (1990) acerca de la geomecánica del pozo Gun-1x y estudios de la variación en profundidad hechos por Schultz (1989), son tomados como referencia en esta tesis entre otros aportes.

Al hablar de trabajos previos hechos con mareas debemos clasificarlos de la siguiente manera:

- 1.-Los llevados a cabo con mareas terrestres, los cuales son estudios que consideran la parte rígida de la Tierra.

2.-Los efectuados con mareas marinas, los cuales consideran los movimientos de las masas de agua en los océanos y mares.

Así, en los albores de la carrera espacial y en pleno auge de la guerra fría era necesario predecir la posición exacta de la Luna en el tiempo, para poder atinarle con un misil lanzado desde la Tierra (en este caso un cohete tripulado). Por ende muchos científicos se abocaron a resolver ese problema y otros fenómenos relacionados, entre estos el estudio de las mareas terrestres. Longman (1960) publica una ecuación computacional de predicción de mareas terrestres, ya que antiguamente se hacían a través de métodos mecánicos, posteriormente los estudios de Bredehoeft (1967) y Melchior (1966) fueron pioneros en el uso de la marea terrestre como una herramienta útil para la predicción de propiedades físicas de los acuíferos, unos años después Robinson y Bell (1971) implementaron una aplicación de los trabajos.

Así, la ingeniería de yacimientos hizo uso de todas estas ideas prestadas de la hidrología ya que esta 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 los objetivos petroleros. Entre estos estudios tenemos los de Wannell M. y Morrison S., (1990) llevados a cabo en el mar de Inglaterra usando mareas marinas. Ellos desarrollan un nuevo método para estimar la permeabilidad vertical a partir de la marea, inspirador de esta tesis.

El trabajo de Wannell M. y Morrison S., (1990) expresa lo siguiente: “La atracción gravitatoria debida al Sol y a la Luna causa la caída y levantamiento de los océanos. A una extensión mucho menor la corteza de la Tierra también se deforma causando una marea terrestre. Según Wannell M. y Morrison (1990) 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 partes, esto

produce un cambio en la presión de yacimiento. El cual induce movilidad a su vez en los fluidos contenidos en el interior del yacimiento y que muestran un desfase con la respuesta teórica esperada y este desfase es a su vez usado para el cálculo de la permeabilidad vertical del yacimiento”.

También en el mismo trabajo se expresa: “Las mareas de los océanos cambian la presión litoestática por reducción o incremento de la columna de agua sobre el yacimiento, esto afecta directamente la presión del yacimiento, como la compresibilidad del gas es mucho más grande que aquella del petróleo o el agua, la profundidad de una interfase gas líquido en un yacimiento de gas oscilará con los cambios de presión de poros, producidos por las mareas, formando así una zona de transición de líquido y gas, según Wannell y Morrison (1990). La amplitud del movimiento de oscilación, es gobernada principalmente por la permeabilidad vertical en el yacimiento”.

Entre los trabajos de vanguardia, también se encuentran el de Jonathan M. y Lawrence B. (1982), quienes proponen una metodología para el análisis y orientación de fracturas en yacimientos, a través del análisis de la deformación que producen las mareas terrestres en los yacimientos.

1.4.- Ubicación de las zonas en estudio.

Las zonas en estudio, de la primera parte de la tesis, comprenden las latitudes venezolanas, ubicadas entre 6.5° y 11.5° donde se encuentran las principales Cuencas Petrolíferas de Venezuela.

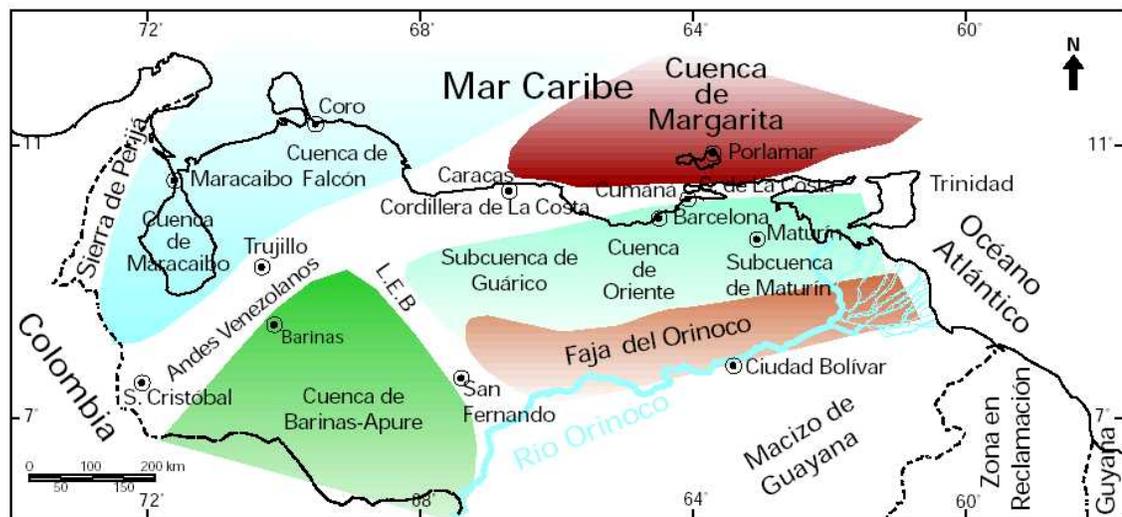


Figura 1.1 Cuencas Petrolíferas de Venezuela, basadas en la distribución de sus Provincias (Tomado de Schlumberger, 1997).

En la Figura 1.1 se muestra la ubicación de las principales Cuencas del País. Obsérvese que en el caso de la Cuenca de Maracaibo - Falcón, el límite Norte, lo constituye la plataforma caribeña entre la Península de la Guajira al Oeste y Golfo Triste al Este. Al Sur y Sureste limita con la Cordillera de los Andes y la Cordillera de la Costa y al Oeste con la Serranía de Perijá. Dentro de ella están incluidas las Cuencas de Maracaibo y de Falcón.

En la segunda y tercera parte de la tesis se estudia la variación de la gravedad con la profundidad y el tiempo, en un pozo en la Cuenca de Maracaibo, cerca del Piedemonte Perijanero.

La Cuenca Oriental, se encuentra ubicada al Sur de la Cordillera de la Costa y de la Serranía del interior, hasta el Escudo de Guayana; hacia el Este se extiende hacia la plataforma continental del Atlántico y al Oeste hasta el Arco de El Baúl. Comprende la subcuenca de Guárico al Oeste y la subcuenca de Maturín al Este.

La Cuenca de Los Llanos Barinas-Apure, esta limitada al Norte por las estribaciones Occidentales de la Cordillera de la Costa, al Este por el Arco de El Baúl que la separa de la Provincia Oriental. Al Sur y Sur-Este se continúa en los Llanos de Colombia y al Oeste la Cordillera Andina la separa de la Provincia de Maracaibo - Falcón.

La Cuenca de Margarita, en el área costa afuera, está ubicada en la parte Nor-Oriental de Venezuela, donde existe un área de sedimentación para la cual se propone utilizar el nombre de “Provincia de Margarita”. En el centro de esta provincia, hay una cadena de islas que comprende: La Tortuga, Margarita, Los Frailes y Los Testigos. La provincia se puede dividir en cuatro regiones: Cariaco y Carúpano al lado Sur del “Horst”, y la Blanquilla y los Testigos al Norte.

1.4.1.- Ubicación del pozo en estudio.

Este pozo se encuentra ubicado en la Cuenca de Maracaibo, Piedemonte Perijanero. Se perforó en 1999 y alcanzó una profundidad de 11.000 ft, atravesando así roca cretácica, la cual incluye las formaciones La Luna, Maraca, Lisure y Apón.

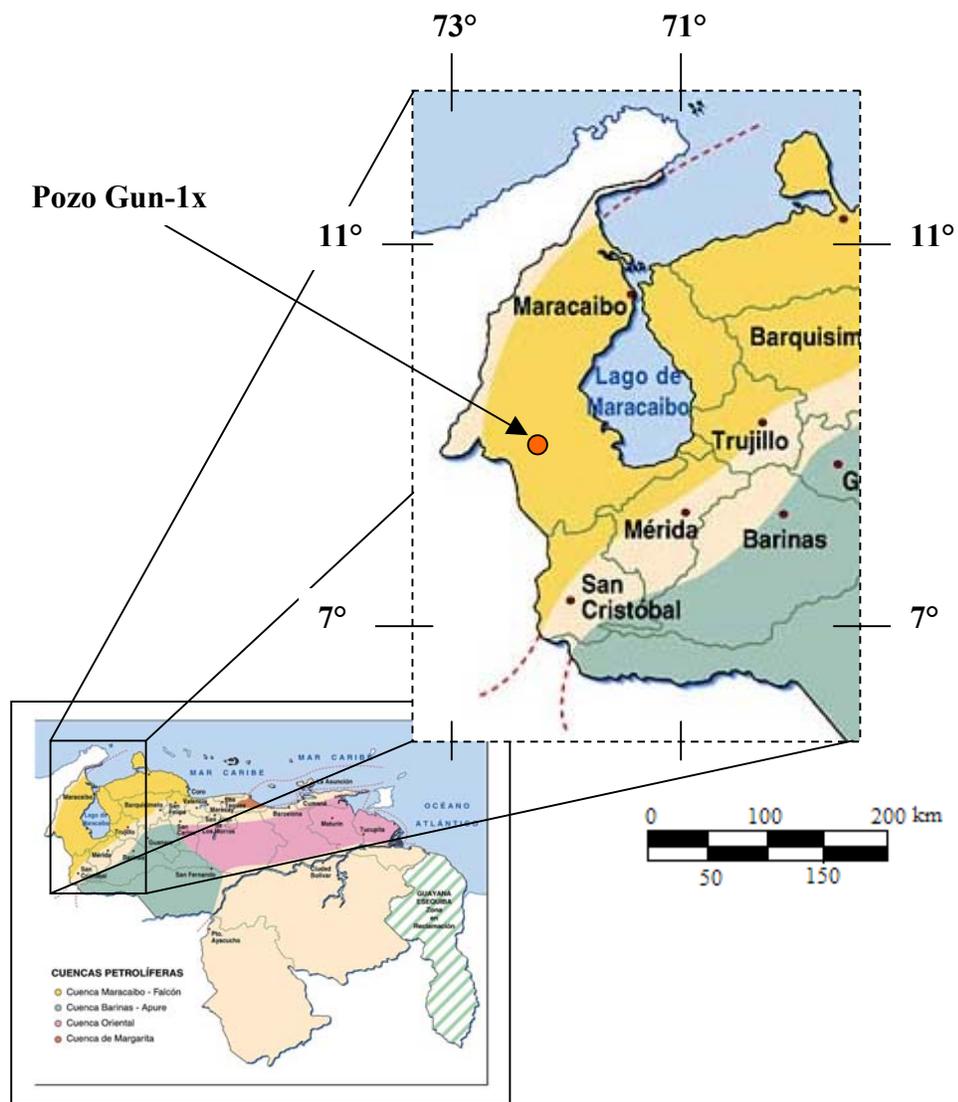


Figura 1.2 Mapa de ubicación del Pozo Gun 1x.

1.5.- METODOLOGÍA.

Entre los pasos a seguir para la elaboración de esta tesis se encuentran:

I.- Variación de la gravedad con la latitud

Construcción de curvas de gradientes para presiones de poros en distintas áreas de Venezuela que muestren las variaciones de los mismos, para distintas latitudes. Esto se hizo a través del estudio de los distintos valores para gradientes de presión de poros realizando una zonificación de los mismos en un mapa del país.

II.- Variación de la gravedad con la profundidad y su efecto en los esfuerzos

Con datos provenientes de un pozo en el estado Anzoátegui se varía la densidad y la gravedad junto con la profundidad para el estudio de curvas de pozos producidas a partir de la estimación de la presión de poros y el esfuerzo vertical.

Primero cuando la gravedad cambia con la profundidad para la presión de poros, ya que $\rho=1$ g/cc. Segundo cuando varían estas mismas variables pero para el cálculo de esfuerzo vertical.

III.- Variación de la gravedad en el tiempo

De manera Independiente se evalúa la variación de la gravedad en el espacio temporal, primero correlacionando los programas sintéticos generadores de mareas para un mismo día, luego se tomó el mas adecuado y ese fue el programa que admitía mas muestreo el cual es el ETGTAB para luego amarrar con los máximos de la fase Lunar para esas fechas.

IV.- Análisis de Fourier de una prueba de presión

Se tiene una señal de presión proveniente de una prueba de restauración de 45 días. Aplicando el Análisis de Fourier a esta señal en el pozo Gun 1-X, se obtiene la respuesta que da el yacimiento a través del análisis espectral de las componentes de mareas.

Esto se logra de la siguiente manera:

Se acota el intervalo en el cual será aplicado el análisis de Fourier, este intervalo abarca desde el día 06/06/2000, hora 400 hasta el 05/07/2000, hora 1100, luego en ese intervalo se aplica un filtro a través de una regresión lineal, obteniéndose así la señal filtrada experimental.

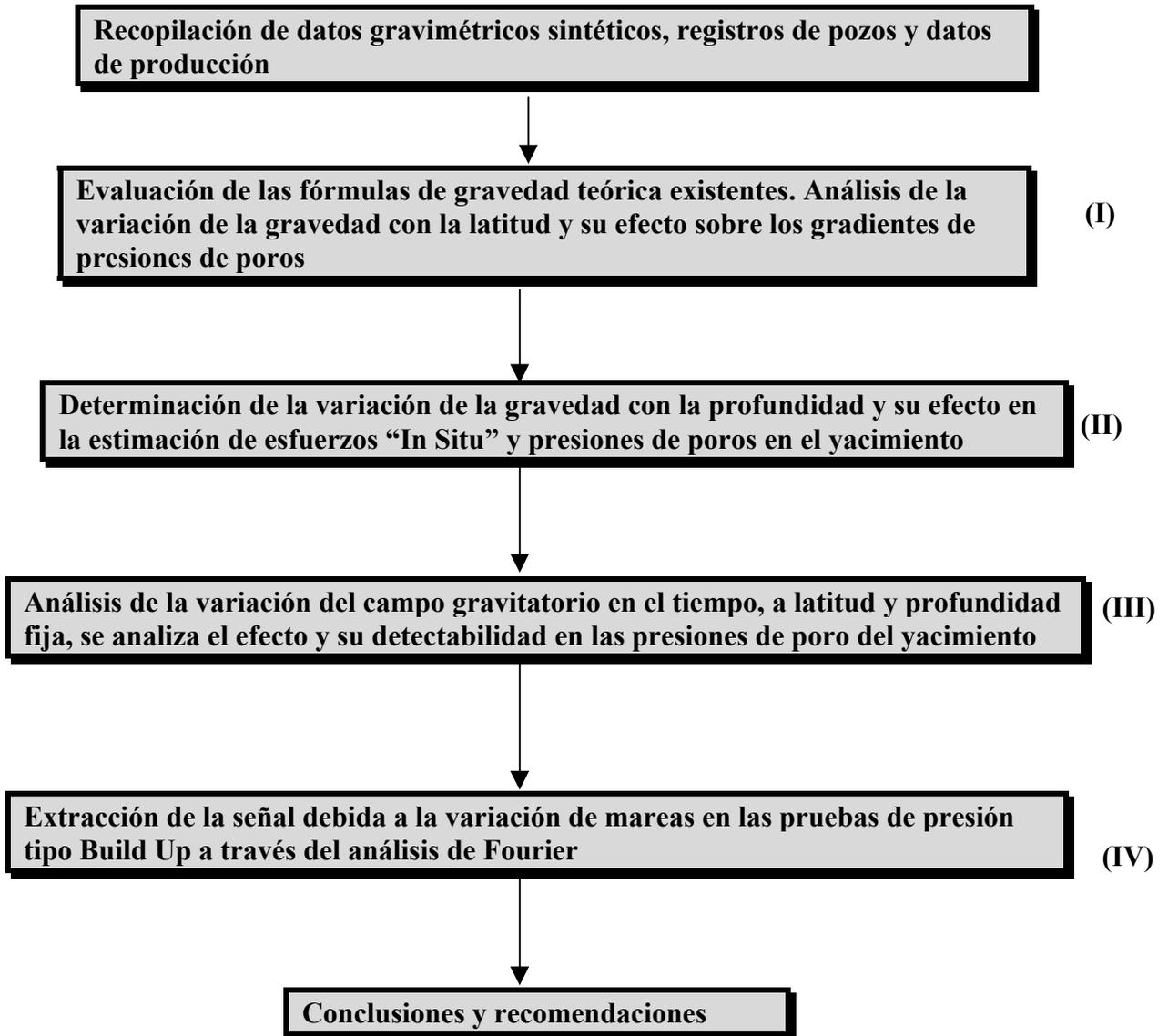
Seguidamente con el programa de mareas ETGTAB se genera el modelo de mareas correspondiente al intervalo estudiado anteriormente, esto es la señal sintética.

A esta señal se le aplica transformada de Fourier, para obtener su espectro. Luego se aplica transformada de Fourier, generando el espectro de amplitud de la señal sintética.

Una vez obtenidos ambos espectros se procede a aplicarles la transformada inversa de Fourier para regresar ambas señales al dominio del tiempo y poder calcular el tiempo de desfase que hay entre la señal real filtrada y la sintética.

Por último, se comparan visualmente ambas señales inversas en el dominio del tiempo y se aplican tres autocorrelaciones de las señales, dos para los intervalos donde se observan sus máximos y una a toda la prueba, para obtener el tiempo de desfase que existe entre ambas.

1.5.1.- Diagrama de flujo de la metodología.



CAPÍTULO II

2.- MARCO GEOLÓGICO.

En los Capítulos IV, y V de la Tesis se hace un enfoque general de la geología, básicamente se hacen estudios en las Cuencas de Venezuela, (Figura 1.1) ya que se describen propiedades físicas en cada una de ellas, pero específicamente en el Capítulo IV donde la geología comprende a toda Venezuela. Mientras que en el Capítulo V se describe la variación en un pozo de Anzoátegui donde no se necesita conocer la geología a detalle del mismo.

Para el estudio del efecto de las variaciones en tiempo donde se hace más importante conocer la geología, se tiene la Cuenca de Maracaibo la cual es descrita en este Capítulo.

2.1.- Geología Regional. Cuenca de Maracaibo.

La Cuenca Petrolífera de Maracaibo (Figura 1.1) es la más importante de Venezuela. A su vez la Formación La Luna de edad cretácico tardío Schlumberger, (1997), es la roca madre por excelencia (Figura 2.2), sus facies se extendieron por toda Venezuela Occidental hasta Colombia. También se han encontrado rocas madre, pero de importancia secundaria en los Grupos Cogollo (Miembro Machiques de la Formación Apón) y Orocué (Formación Los Cuervos). El petróleo fue generado, migrado y acumulado en diversos pulsos, siendo el más importante el ocurrido durante el levantamiento andino. (Schlumberger, 1997).

Las principales rocas yacimiento clásticas son las Formaciones Río Negro y Aguardiente (Cretácico), grupo Orocué (Paleoceno), Mirador-Misoa (Eoceno), Lagunillas y La Rosa (Mioceno) (Figura. 2.2). Las calizas (fracturadas) del Grupo Cogollo (Apón, Lisure, Maraca, Cretácico Temprano) constituyen los yacimientos carbonáticos más relevantes (estudiados en esta tesis), mientras que los sellos

regionales más importantes son las Formaciones Colón (Cretácico Tardío) y Paují (Eoceno). Localmente, constituyen sellos importantes el Miembro Machiques (Formación Apón) y las lutitas espesas dentro de las Formaciones ubicadas hacia el centro del Lago de Maracaibo, como Misoa, Lagunillas y La Rosa (Figura. 2.1), e incluso secuencias cercanas a los frentes de deformación, como la Formación León y los Grupos Guayabo (Andes) y El Fausto (Perijá).

Los principales Campos Petroleros se encuentran en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, los que producen principalmente de yacimientos terciarios, como por ejemplo: Cabimas, Tía Juana, Lagunillas, Bachaquero, Mene Grande y Motatán (Figura. 2.1). En la Costa Oeste se encuentran campos con producción importante en el Cretácico, además del Terciario; entre los que se encuentran el Campo de Urdaneta (Lago de Maracaibo) y los del Flanco Perijanero, que son, de Norte a Sur: La Concepción, Mara, La Paz, Boscán y Alturitas.

La gravedad de los crudos es bastante diversa; en general los crudos más livianos ocurren en yacimientos cretácicos profundos y se van haciendo más pesados a medida que se acercan a los yacimientos terciarios más someros. Algunos crudos de la Costa Oriental del Lago, por ejemplo, llegan a tener menos de 13°API. (Schlumberger, 1997).

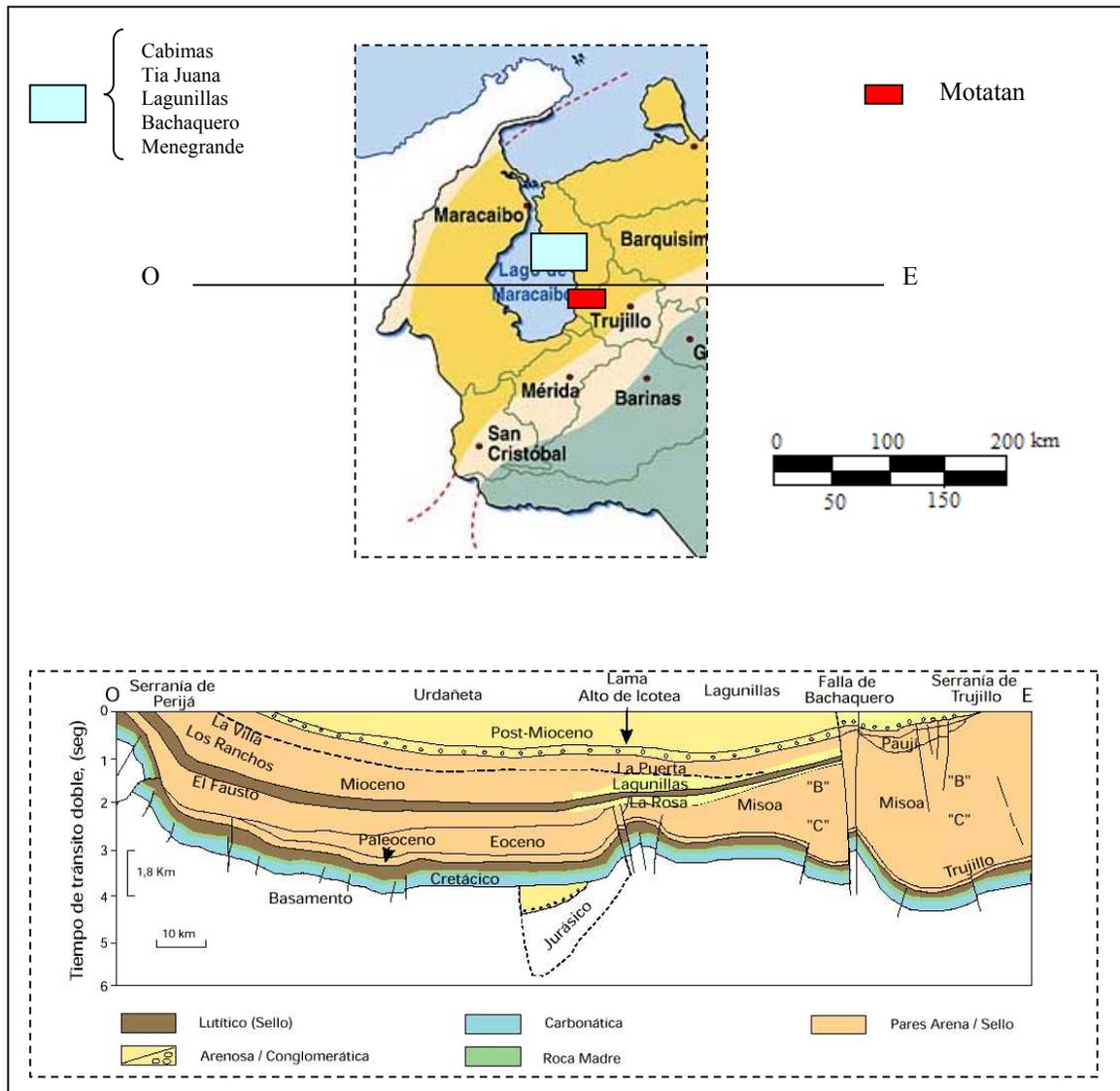


Figura 2.1 Sección estructural NW-SE a través de la Cuenca de Maracaibo desde los Andes Merideños hasta la Serranía de Perijá (Tomado y modificado de los autores (1997) en WEC).

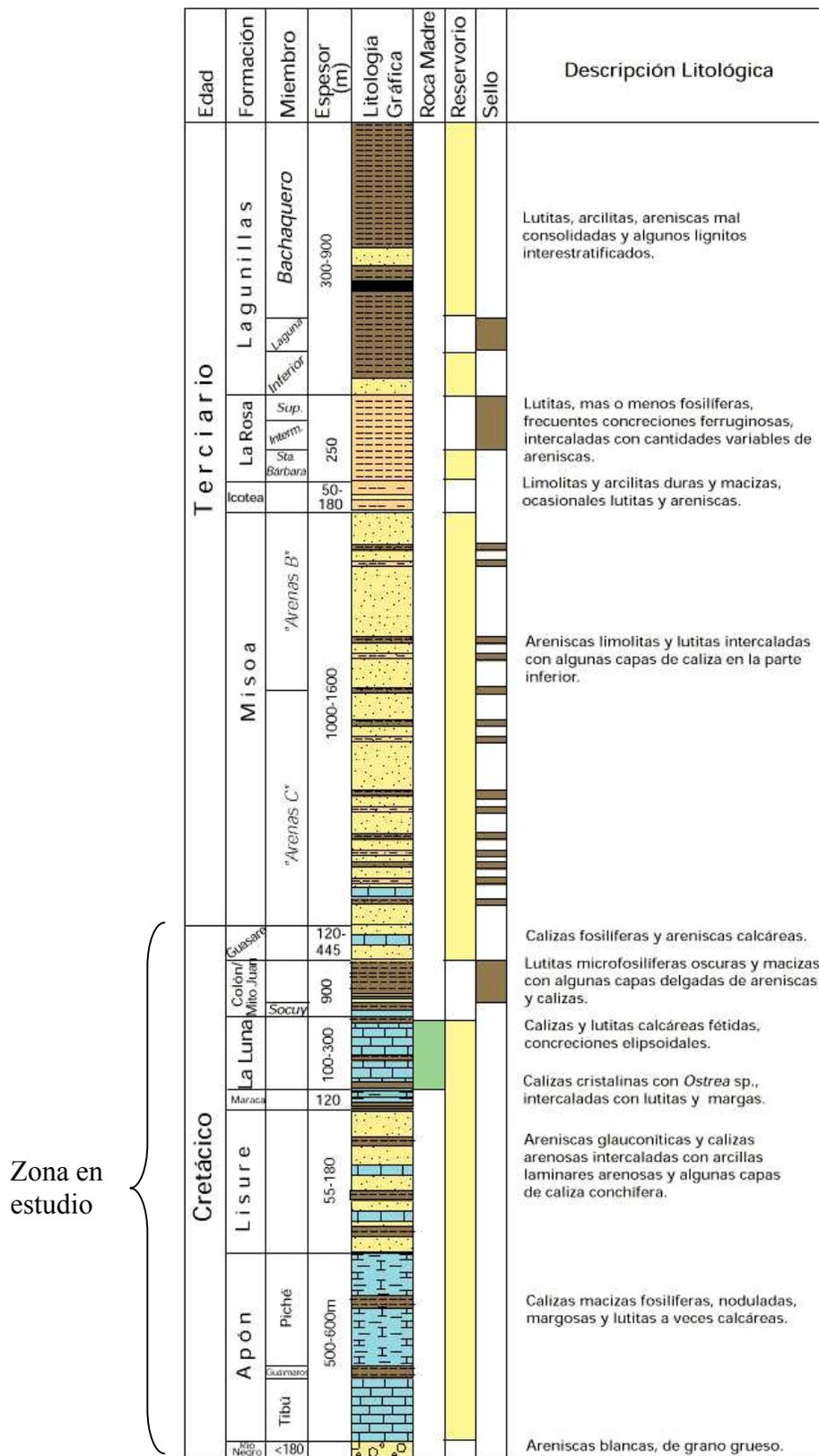


Figura 2.2 Columna Estratigráfica Regional, (Tomado de Schlumberger, 1997).

2.1.1.- Sistema petrolero.

En la Cuenca se desarrollan tres Sistemas Petroleros generados a partir de la formación La Luna en el Cretácico, de los tres sistemas el más directo en Perijá es el llamado de fase 2 o segundo sistema petrolero según el WEC 1997, constituido principalmente por la Formación La Luna en la mayor parte de la actual cuenca hidrográfica del Lago de Maracaibo (Fig. 2.1) que en algunas áreas alcanza condiciones de sobre madurez (Schlumberger, 1997).

2.2.- Geología local.

2.2.1.- Litofacies de Perijá Central a nivel Cretácico.

Un pozo exploratorio en la Sierra de Perijá, Gun-1x, fue el descubridor de un nuevo Campo con crudo liviano (45-48 °Api) a nivel de las calizas cretáceas del Grupo Cogollo. Según Andara (1990), el llenado de la trampa, se realizó con hidrocarburos generados y expulsados desde las rocas madres cretácicas del área formación la Luna y quizás el Mbro. Machiques de la Formación Apón. De acuerdo al resultado del modelado geoquímico realizado por Andara (1990), la expulsión de los hidrocarburos se inicio antes del Oligógeno en un foco de expulsión ubicado al Oeste del pozo, migrando los mismos hacia esta área llenando incipientes trampas presentes desde el Eoceno. Proponen además, que este mismo foco de expulsión se desplazo hacia el Este, expulsando hidrocarburos en el área del pozo hasta poco después del Mioceno temprano y que finalmente para el Mioceno medio se había desplazado 70 km. hacia el Este, donde expulsó hidrocarburos que eventualmente alcanzaron la trampa de Guaraní. Proponen además la existencia de un 30%, trampa para el Eoceno medio y el resto se forma desde el Mioceno medio hasta el presente, como resultado del levantamiento de la Sierra de Perijá. Esto supone un riesgo, al ser la sincronización entre la carga y el entrapamiento de los hidrocarburos (muy ajustado en el tiempo del pozo).

2.2.2.- Descripción de las formaciones encontradas en el pozo.

Formación Apón.

Consideraciones históricas:

La Formación Apón, cuyo nombre deriva del Río Apón, fué definida “como la división basal del Grupo Cogollo en la región de Perijá” (Léxico estratigráfico Internet, 1946, p 1642).

La formación Apón esta constituida por dos intervalos lodosos (Mb. Tibú a la base y Piché al tope), separados por el Mbro. Machiques.

Miembro Tibú.

Facies:

Este miembro consta de dos partes bien diferenciables. Una secuencia calcárea grano decreciente en la base, intercalaciones de lutitas y areniscas lodosas calcáreas bioturbadas llegando a verse facies evaporíticas. En el tope grano creciente hacia el tope de mas alta energía, grainstone de moluscos y bivalvos con ocurrencia de niveles nodulares e intervalos delgados dolomíticos (PDD Guaraní, presentación sedimentología, 2002).

Ambiente depositacional:

Se observa un paso de llanuras próximas costeras a rampa interna submareal (lagunas, pequeños bancos). También se observa sedimentación de áreas restringidas con alto contenido orgánico e intervalo dolomitizado, con influjos de eventos de tormentas.

Mbro. Machiques (Roca Madre Secundaria).

Facies.

Su litología es lutítica en la base, pasando hacia el tope a caliza, las lutitas son orgánicas con intervalos delgados de dolomita.

Parasecuencias:

Evolución granocreciente en contexto regresivo progradante.

Ambiente depositacional:

Deposición de pelágicos en la base con depósitos transgresivos rápidos, en el tope sedimentación más somera y de carácter más restringido.

Mbro. Piché. (Roca Yaricampo).

Facies:

Posee alto contenido de caliza bioclástica de alta energía alternando con calizas lodosas de algas.

Parasecuencia:

Secuencia granodecreciente de carbonatos.

Ambiente depositacional:

En ambientes restringidos dentro de una plataforma interna a media (bioestromos, niveles de desmantelamiento, lagunas, barras).

Formación Lisure.

Consideraciones históricas:

Código Geológico de Venezuela, Rod y Maync, (1954), introdujeron por primera vez este nombre, para denominar una secuencia glauconítica en la sección del río Cogollo que Sutton (1946), previamente, había llamado Formación Aguardiente, perteneciente a la parte media del Grupo Cogollo.

Facies:

Son areniscas calcáreas, con pequeños intervalos de packstone wackstone de moluscos y bivalvos, grainstones de bivalvos.

Parasecuencia:

En el tope Se observan varios ciclos de somerización y engrosamiento. Hacia la base se observa el desarrollo de dos niveles lutíticos.

Ambiente Depositacional:

A excepción de su parte basal de carácter prodeltaico, el ambiente observado es de barras mareales progradantes.

Fm. Maraca.

Consideraciones históricas:

Código Geológico de Venezuela Rod y Maync (1954), publicaron el nombre de Maraca, para designar la parte superior del Grupo Cogollo, en reemplazo del término Capacho de Sutton (1946). Renz (1959) le dio al intervalo calcáreo, equivalente en los Andes suprayacente a la Formación Aguardiente, el nombre de Caliza de La Puya con el rango de formación, invalidado en el Léxico Estratigráfico II (1970), por considerarlo un sinónimo innecesario de Maraca.

Facies:

Se caracteriza por tener calizas bioclásticas de tipo Wackpackstone, hasta Grainstone.

Análisis de Secuencia:

Se compone de 3 parasecuencias granocrecientes.

Ambiente Depositacional.

Se depositó en ambiente puramente transgresivo. Son bancos muy extensos a lo largo de una plataforma abierta dentro de un contexto retrogradante.

Formación La Luna (Roca Madre Principal).

Consideraciones históricas:

Garner (1926) publicó originalmente el nombre de caliza de La Luna, posteriormente descrita en detalle por Hedberg y Sass (1937) con rango de formación. Renz (1959) reconoce los cambios litológicos de la Formación La Luna en los Estados Trujillo y Lara y la divide en tres miembros, que son en orden estratigráfico: 1.-La Aguada,

2.- Chejendé y 3.- Timbetes. En el Estado Táchira el mismo autor introduce formalmente el Miembro Ftanita del Táchira.

La unidad es litológicamente característica, por lo cual la literatura se refiere a ella con uniformidad. Algunos autores han empleado términos compuestos (La Luna-Cogollo, La Luna-Urumales, etc.) cuyo significado se sobreentiende. Renz (1959) y Ford y Houbolt (1963) suministraron descripciones adicionales. El término "Rubio", empleado por Gerhardt (1897-98) y otros autores, es sinónimo en desuso de La Luna. Ocasionalmente se ha publicado la forma incorrecta "Luna".

Facies.

La Luna está dominada por lutitas orgánicas y calizas de tipo packstone de foraminíferos, y/o calizas recristalizadas.

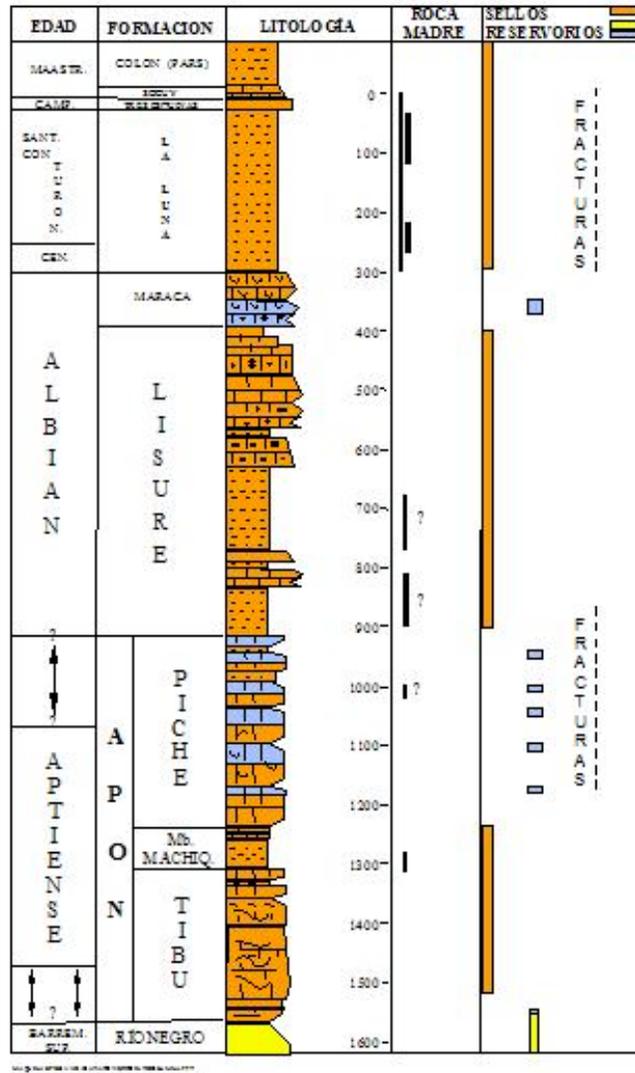


Figura 2.3 Columna estratigráfica del pozo (Tomado de Meza, 1999).

CAPÍTULO III

3.- MARCO TEORICO.

3.1.- Teoría gravitatoria.

3.1.1.- Diferencias entre el elipsoide de referencia y el geoide.

3.1.1.1.- El Geoide.

El geoide es la superficie equipotencial de la Tierra que coincide con el nivel medio del mar (extendido continuamente a través de todos los continentes). En cada punto del geoide, la gravedad es perpendicular y dirigida hacia el centro de la Tierra. El Geoide está en realidad achatado en los polos y abultado en el Ecuador (Bracho, 1988).

3.1.1.2.- El Elipsoide de referencia.

Es un esferoide cuya forma es muy cercana a un elipse de revolución. Esto es debido a la interacción de las fuerzas de gravedad y de rotación. El esferoide es simétrico a través de su centro y simétrico alrededor de su eje de rotación. Su forma es descrita por sólo dos parámetros el radio ecuatorial “a” y el radio polar “c” (Figura 3.2) y frecuentemente es expresado a través del parámetro de aplanamiento.

$$F = \frac{a - c}{a} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

El elipsoide de referencia es la superficie equipotencial de una tierra uniforme mientras el geoide es la superficie equipotencial actual del nivel promedio del mar (Blakely, 1990).

Unidades de gravedad.

La aceleración de gravedad en la superficie de la Tierra es aproximadamente de 9.8 m/seg^2 (980gales), mientras anomalías causadas por variaciones de densidad en la corteza son típicamente menores que 10^{-3} m/seg^2 (100 mgales), menos de 0.01 % de la gravedad observada. Los gravímetros portátiles son capaces de medir gravedades por el orden de los 10^{-7} m/seg^2 (0.01 mgal) o alrededor de una parte en 10^8 .

3.1.2.- Gravedad observada y gravedad teórica.

Gravedad observada (concepto).

Si se mide la gravedad en un punto de la Tierra, esta gravedad observada es consecuencia de varios efectos.

Se podría decir que la gravedad observada es el producto de los siguientes efectos según Blakely (1990):

Gravedad observada = atracción del elipsoide de referencia + efecto de aire libre + efecto de Bouguer + efecto de mareas + efecto topográfico.

Gravedad teórica (Modelos).

La forma de la Tierra es uno de los problemas fundamentales de la Geodesia y de muchas otras ramas de las Ciencias de la Tierra. Se ha intentado darle una solución pero hasta ahora sólo se han obtenido aproximaciones, algunas usadas en la actualidad como el WGS84 son calculadas en base a estimaciones satelitales y un volumen elipsoidal.

Si la forma de la Tierra fuese una esfera ideal totalmente homogénea y sin irregularidades de superficie, la gravedad sería la misma en cualquier parte del globo terráqueo, pero esto no es así, la Tierra es un elipsoide no homogéneo con irregularidades de superficie, producto de su forma elipsoidal. La Tierra posee distintos valores de gravedad para distintas latitudes, a medida que nos acercamos a los polos la distancia de la superficie al centro de la Tierra se reduce y esto a su vez incrementa los valores de gravedad para latitudes cercanas al polo y las reduce para cercanas al ecuador. En general la variación de los órdenes de gravedad del ecuador al polo, están aproximadamente en 5 gales, para las consideraciones teóricas, según Dobrin (1976) y su variación con la latitud.

Este cambio en la gravedad causa cambios en la presión de fluidos de poros de la corteza terrestre arrojando un valor numérico específico de gradiente de presión de poros correspondiente al valor de la gravedad, ya que la ecuación que rige la presión de los fluidos en las rocas depende básicamente de los cambios en la gravedad, cuando hablamos de un cambio en superficie o como varia la gravedad con la latitud.

Entonces debemos considerar un cambio en presión de poro. Este estudio permite estimar como son esas variaciones de presión de poro cuando se evalúa la gravedad para distintas latitudes de Venezuela.

Las variaciones debidas a la longitud no son el objeto de este proyecto pero tienden a ser despreciadas ya que en mediciones absolutas no se observan grandes variaciones, esto se debe a que el radio terrestre no varía notablemente alrededor de un mismo paralelo.

El elipsoide ha sido definido y redefinido por acuerdos internacionales a través de la Asociación Internacional de Geodesia (AIG) y sus Organizaciones derivadas, la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG). Las ecuaciones teóricas más comúnmente aceptadas que rigen la variación de la gravedad con la latitud son:

La ecuación de 1930. Sus parámetros asociados proveyeron la fórmula internacional de la gravedad siguiente:

$$g_0 = 9.78049 * (1 + 0.0052884 \text{sen}^2 \theta - 0.0000059 \cdot \text{sen}^2 2\theta) m / s^2 \quad (\text{Ec.3.2})$$

La ecuación de 1967. Trajo precisión en ciertos parámetros geodésicos y la ecuación de la gravedad teórica formulada para el nuevo elipsoide adoptado fue:

$$g_0 = 9.78031846 * (1 + 0.0053024 \text{sen}^2 \theta - 0.0000058 \text{sen}^2 2\theta) m / s^2 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

La ecuación de 1980:

Mas recientemente la AIG ha adoptado el sistema de referencia geodésico de 1980, el cual eventualmente se convirtió en la formula recurrente actual. El sistema mundial geodésico de 1984; el cual viene dado por:

$$g_0 = 9.7803267714 * \frac{(1 + 0.00193185138639 \text{sen}^2 \theta)}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \text{sen}^2 \theta}} m / s^2 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

y de uso común en nuestros días aparentemente una de las aproximaciones más parecidas a la forma del elipsoide.

3.1.3.- Reducción de la gravedad a un nivel de referencia.

3.1.3.1.- Anomalía de Bouguer.

Es una variación gravimétrica que relaciona los contrastes de densidades con los cambios en gravedad observados por el gravímetro

3.1.3.2.- Anomalía gravimétrica.

Es una expresión matemática que evalúa las diferencias entre la gravedad observada y la gravedad teórica en cada una de las estaciones levantadas en la fase de adquisición de datos.

$$A_g = \text{gravedad observada} - \text{gravedad teórica.}$$

A la vez la gravedad observada necesita ser despojada de los efectos anteriormente descritos es por esto que se hacen las siguientes correcciones:

3.1.3.3.- Corrección aire libre.

Es la diferencia de altura (h) entre la estación de medida y el nivel de referencia utilizado en el cálculo teórico.

$$\text{Corrección de aire libre} = 0.3086 * h \text{ (mgal/m).}$$

3.1.3.4.- Corrección de Bouguer.

La diferencia de gravedad, compensada con la ecuación anterior, sólo se puede presentar por la existencia del material rocoso entre la estación de medida y el nivel de referencia asociado.

$$C_B = 2\pi G\rho h$$

3.1.3.5.- Corrección topográfica.

Para la aplicación de esta corrección se estima la alteración ejercida sobre las medidas gravimétricas por los desniveles topográficos que se encuentran alrededor de cada estación.

3.1.3.6.- Mediciones de densidad en pozos.

El gravímetro de pozo consiste en realizar mediciones de la gravedad en la vertical. Esto es a través de la medición en diferentes estaciones a lo largo de un pozo.

El modelo utilizado por el gravímetro de pozo es un modelo terrestre concebido como una laja horizontal infinita.

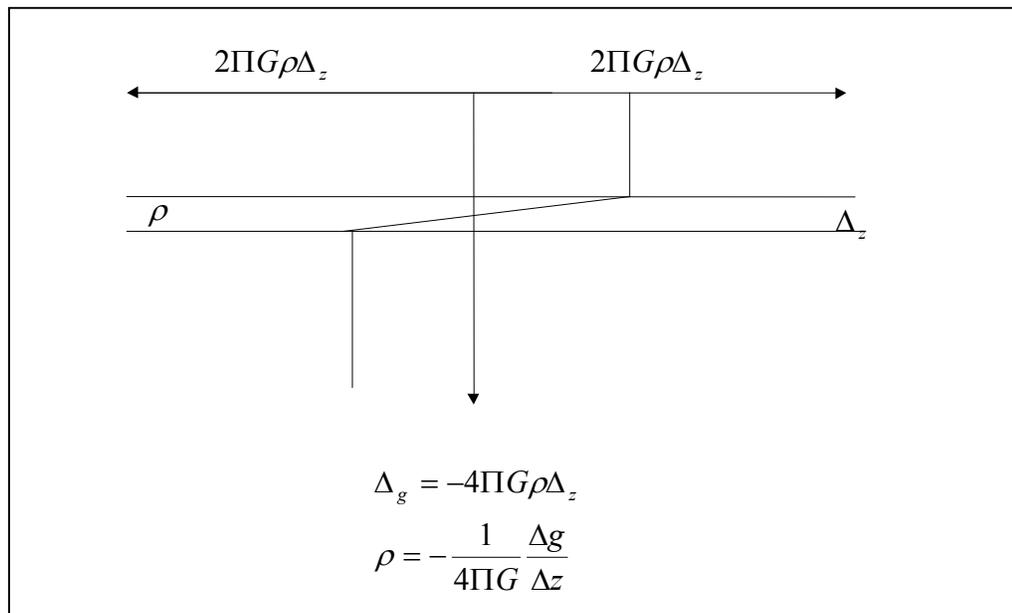


Figura 3.1 Esquema del cambio en profundidad de la gravedad.

Por tal motivo la densidad de cualquier laja está exactamente dada por el gradiente de gravedad a través de la laja. Modelaje de geometrías más complejas pueden también ser usadas en cálculo de correcciones estructurales.

La densidad viene dada por la siguiente relación (aunque existen pequeñas correcciones debidas a la latitud y a la elevación, las correcciones de Bouguer y de altura):

$$\rho = 3.6827 - 0.03913 \frac{\Delta g}{\Delta z} \quad (3.5)$$

Donde ρ es en g/cm^3 , Δz es en pies y Δg es en microgales. La constante 3.686 es la corrección de aire libre y la segunda constante es $\frac{1}{4} \pi G$

3.2.- PRESIÓN DE POROS.

La Presión Hidrostática: Es la presión debida al peso y altura vertical de una columna de fluidos. Es función de la altura de la columna y la densidad del fluido.

$$P_h = \rho_f g z \quad (3.6)$$

Donde P_h es la presión hidrostática, ρ_f es la densidad del fluido, Pp_n , es la presión de poros normal.

También conocida como presión de formación, es la presión soportada por los fluidos dentro de los poros. En condiciones normales de compactación, la presión de poros es igual a la presión hidrostática.

$$Pp_n = P_h \quad (3.7)$$

3.2.1.- Condiciones normales de compactación o tren de compactación normal.

Es un régimen de sedimentación donde la porosidad se reduce con la profundidad de manera exponencial dado que los fluidos son expulsados acorde con la carga litoestática a la que son sometidos y en consecuencia los sedimentos alcanzan el grado de compactación ideal (los sólidos soportan a los sólidos y los fluidos solo a los fluidos).

Bajo un régimen o tren de Compactación Normal la Presión de Poros es igual a la Presión Hidrostática.

3.2.2.- Presión Anormal.

Es cualquier presión que se desvía del tren normal de presiones, es decir, de la presión hidrostática normal.

Gradiente de Presión: el gradiente de presión p es el incremento de presión por unidad de espesor de la forma siguiente:

$$\frac{dp}{dz} = g\rho \quad (3.8)$$

3.2.3.- Diferencia entre esfuerzos y presiones de poro.

El esfuerzo vertical es generado por la columna de sedimentos, es decir por la presión litoestática, mientras que la presión de poros es producida a su vez por una columna de fluido.

Esto es el esfuerzo vertical generado en la roca por una columna de sedimentos es el producto de la densidad ρ_r de la roca por el gradiente gravitatorio y la profundidad.

$$\sigma_v = \rho_r g z \quad (3.9)$$

De manera análoga para la presión de poros.

$$P_p = \rho_f g z \quad (3.10)$$

Donde ρ_f es la densidad del fluido.

3.3.- Esfuerzos “in situ”.

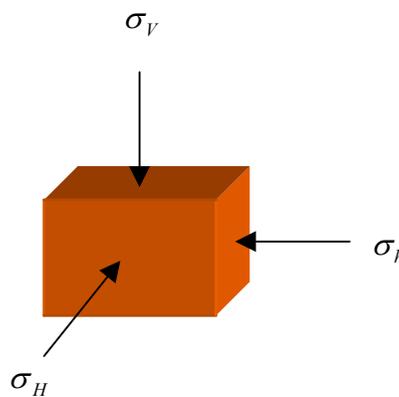


Figura 3.2 Cubo de esfuerzos.

Esfuerzo vertical.

Es la suma de presiones hecha por una columna de fluido en un punto de profundidad (z).

$$\sigma_v = \int_0^z \rho_f(z) g(z) dz \quad (3.11)$$

Esfuerzo Horizontal.

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v \quad (3.12)$$

Esfuerzo Efectivo.

$$\sigma_{ef} = \sigma_t - \alpha P_p \quad (3.13)$$

σ_t = Esfuerzo total aplicado

α = Coeficiente de Biot

P_p = Presión de poros

El coeficiente de Biot este varía entre 0 y 1 y es el parámetro que describe la eficacia de la presión del fluido en contrarrestar el esfuerzo total aplicado.

$$\alpha = 1 - \frac{C_s}{C_b} \quad (3.14)$$

C_s = compresibilidad de los granos

C_b = compresibilidad total

3.4.- TEORÍA DE MAREAS.

3.4.1.- Consideraciones históricas.

La variación en tiempo de la gravedad está principalmente dominada por el efecto de mareas, hay toda una gran área de investigación en torno a este fenómeno, ya que era necesario conocer la posición exacta de la Luna para poder lanzar un cohete y con precisión dar en el blanco, que en este caso sería nuestro satélite natural, por ende muchos científicos se abocaron al estudio de las posiciones lunares y otros efectos provocados en la Tierra como lo son las mareas terrestres.

3.4.2.- Diferencia entre mareas “oceánicas” y “terrestres”.

A pesar de que la literatura en inglés tiene nombres especiales para estos términos, se pretende acuñar dos nuevos términos en español para llamar a las mareas ocurridas en la parte rígida de la Tierra y las ocurridas en el mar.

En principio se deben aclarar las diferencias existentes entre el fenómeno provocado en los océanos (marea oceánica o dinámica) y el provocado en la corteza terrestre (marea terrestre o rígida), ambos tienen un mismo origen, la fuerza gravitacional de la Luna y el giro del Sistema Tierra-Luna en torno a su centro común.

El fenómeno ocurrido en la corteza es menos perceptible que el ocurrido en los océanos, de este último proviene el nombre mareas. El diccionario de las mareas define estas diferencias de la siguiente manera:

“Marea marina”: “Oscilación periódica del nivel del mar que resulta de la atracción gravitacional de la Luna y del Sol que actúa sobre la Tierra en rotación, aunque el movimiento horizontal del agua también es causado por la rotación terrestre”, (algunas veces es llamado marea), es preferible designar esta última como corriente

de marea, reservando el nombre de marea para el movimiento vertical ascendente y descendente del fenómeno. También son aquellas que están relacionadas con la deformación de la parte líquida de la esfera terrestre. Ellas se miden en metros y abarcan mayores extensiones de deformación.

La marea terrestre la definimos como un movimiento periódico de la corteza terrestre debido a las fuerzas del Sol y la Luna, más adelante se extenderá este concepto, y también se puede decir que están en el orden de 0.001mm y provocan una variación anual de la gravedad de 0.2 a 0.3 miligales.

La deformación ocasionada por la rigidez de la corteza impide que las fuerzas generadoras de las mareas la movilizen y deformen de igual manera que lo hacen con las aguas de los océanos, por tanto ocurre deformación pero no a la misma intensidad de los océanos, de hecho, la escala es mucho menor. La deformación de la corteza solo puede ser observada con instrumentos muy sensibles, como sensores de presión y mediciones gravimétricas.

3.4.3.- Mareas en Venezuela.

En Venezuela las mareas suelen ser de poca intensidad y en latitudes de 28.5° hacia el Norte o hacia el Sur las mareas suelen ser máximas, sin embargo no lo son hacia el Sur de Venezuela por su cercanía a la zona ecuatorial, debido a la inclinación del eje terrestre y que la Luna no siempre está directamente sobre el ecuador, de hecho la Luna se mueve de un hemisferio al otro cada 14 días de manera tal que dependiendo de donde se encuentre ubicado el astro tendremos máximos o mínimos de marea.

3.4.4.- Fuerzas generadoras de mareas.

El efecto de marea es provocado principalmente por el giro del sistema Tierra - Luna en torno a su centro común y la atracción mutua entre ambos cuerpos (Figura 3.3).

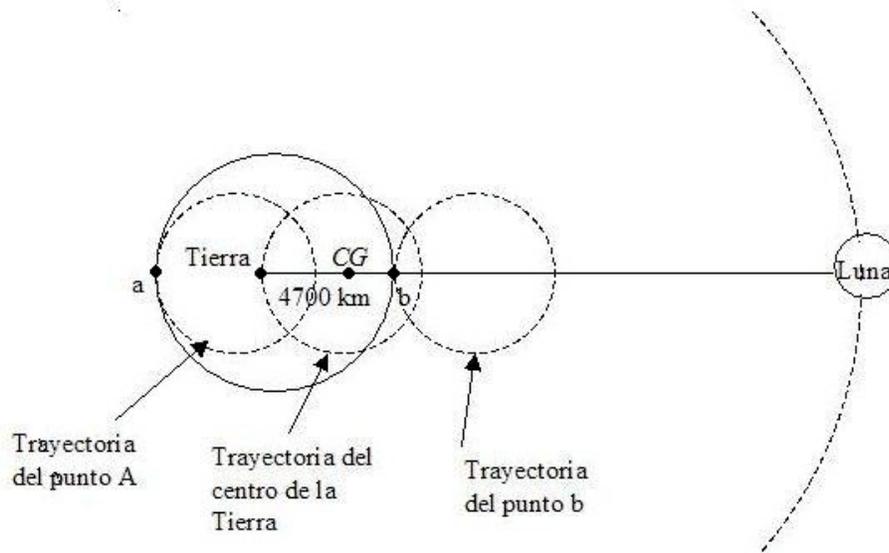


Figura 3.3 Giro en torno al centro común de gravedad. (Tomado y modificado de Thurman, 1994)

El centro de revolución de este sistema está ubicado cercano a la superficie terrestre debido a que la Luna y la Tierra poseen diferentes masas, de ser similares el centro estaría ubicado a la mitad del camino entre la Luna y la Tierra, el punto CG también representa el centro de gravedad de ambos sistemas mientras que los puntos a y b giran en torno al CG al igual que lo hace el centro geométrico de la Tierra (Figura 3.3), Obsérvese que las trayectorias de los puntos a, b y Centro Geométrico de la Tierra son circunferencias concéntricas al CG. Este movimiento se representa mejor en la Figura (3.4).

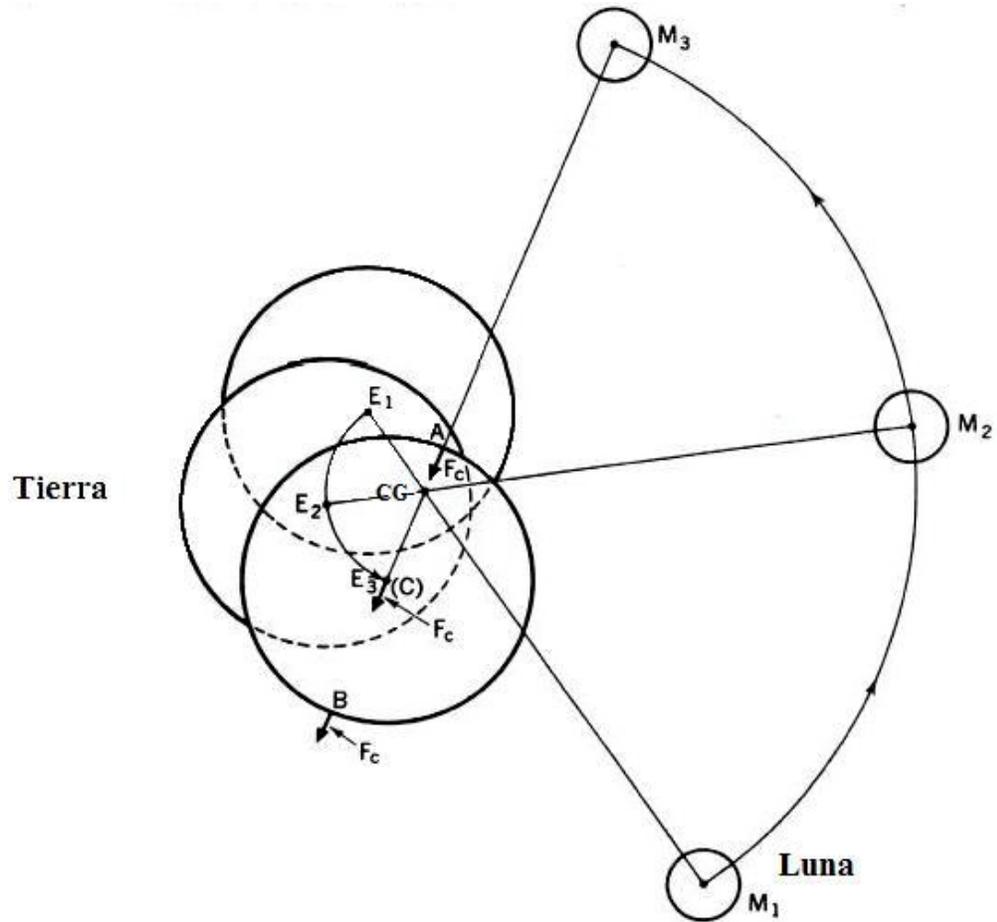


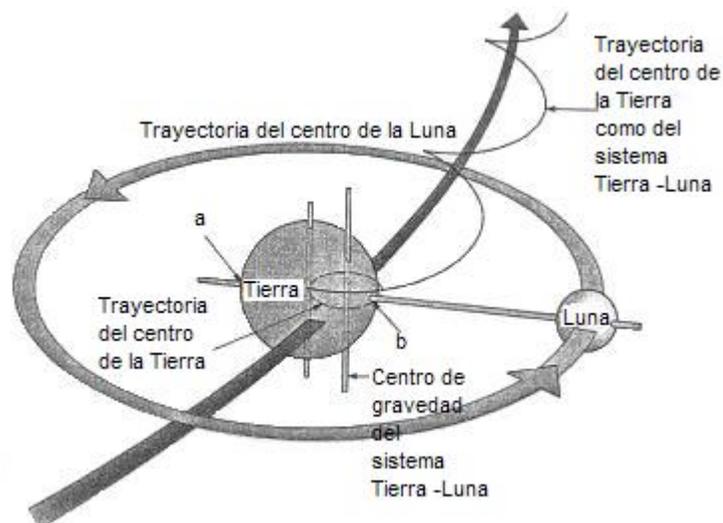
Figura 3.4 Movimiento esquemático de la rotación del sistema, las líneas sólidas e interrumpidas representan planos ecuatoriales de la Luna y la Tierra (Tomado de, Reed, 1990)

La Figura 3.4 muestra la revolución mensual de la Tierra y la Luna alrededor del baricentro del sistema Tierra-Luna o centro instantáneo de rotación (CG).

E1, E2 y E3 y M1, M2, M3 son posiciones correspondientes de los centros de masas de la Tierra y la Luna respectivamente.

El giro del sistema es similar al de un lanzador de martillo donde el centro de gravedad esta hacia el lanzador del martillo, este sería la Tierra y el martillo La Luna, al girar se traslada y al mismo tiempo rota hasta que el martillo es lanzado, en nuestro caso la Luna y la Tierra quedan girando eternamente alrededor del sol atrapados por su enorme fuerza de gravedad.

El Sistema Tierra - Luna visto desde el espacio describe un movimiento de traslación cuya trayectoria es un cicloide (Figura 3.5). Este sigue girando en torno a su centro común, a medida que se traslada por la órbita de la eclíptica, simultáneamente, la Tierra y la Luna giran en torno a ellas mismas. La Luna rota al mismo tiempo que hace su traslación alrededor de la Tierra, por esto siempre da el mismo lado hacia la Tierra. La Tierra gira a una velocidad angular mucho mayor que el de la Luna.



del Sol. (tomado y modificado de Thurman, 1994)

El Sistema Tierra- Luna se traslada en el espacio y describe a lo largo de un año la siguiente trayectoria. En la Figura 3.6 se muestran las posiciones astronómicas que describe el Sistema Tierra – Luna alrededor del Sol.

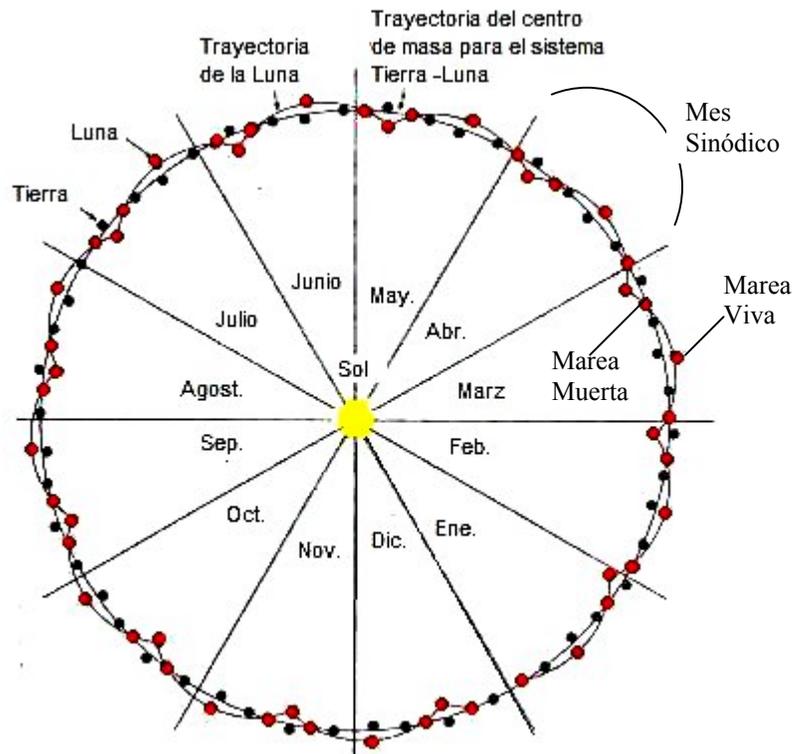


Figura 3.6 Ciclo lunar alrededor del Sol en un año. (tomado y modificado de Thurman, 1994)

Las distintas posiciones astronómicas del Sistema Tierra-Luna, son responsables de generar los ciclos de mareas diarias, mensuales y hasta de un año.

Obsérvese que la configuración dentro del mes sinódico, dependiendo de si la Luna se encuentre en oposición o en conjunción con la Tierra y el Sol, ocasiona un fenómeno a ser explicado más adelante llamado Mareas Vivas y Mareas Muertas, hay

dos ciclos de estas mareas por cada mes (Figura 3.6). Visto desde el espacio la trayectoria de la Luna y de la Tierra son cicloidales.

Los movimientos relativos del sistema Tierra - Luna provocan una configuración de fuerzas vectoriales, las cuales se desarrollan de manera diferencial en lados contrapuestos de la Tierra y de manera similar en los lados de la Luna (Figura 3.4).

Obsérvese que la Figura 3.7 refleja como las mareas son creadas, las fuerzas actuantes pueden ser representadas por los vectores C y G.

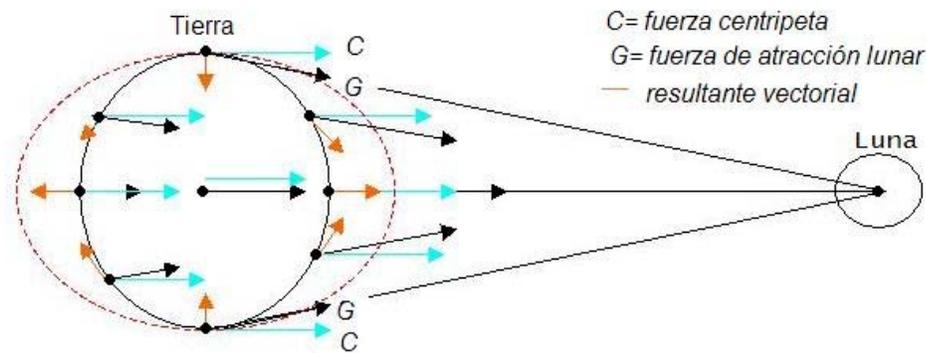


Figura 3.7 Configuración vectorial de la fuerza de mareas.
(tomado y modificado de Thurman, 1994)

Los vectores C representan la fuerza centrípeta mientras que los vectores G representan la atracción gravitacional lunar en la superficie, la resultante de ambos vectores se visualiza con las pequeñas flechas a color señaladas en cada uno de los puntos. Si descomponemos esta resultante en sus componentes horizontal y vertical podemos observar que para el polo, la fuerza resultante solo posee componente vertical, mientras que la horizontal es nula, para los otros puntos, existe una componente horizontal la cual no es anulada y es responsable principal de generar en los océanos los bulbos de mareas, la componente vertical es totalmente contrarrestada por la fuerza de gravedad terrestre ya que es 9 millones de veces más fuerte, las

fuerzas horizontales también son débiles pero ellas son comparables a otras fuerzas actuando en la superficie del océano.

Estas fuerzas son generadas por las componentes horizontales de las resultantes de las fuerzas de mareas, de manera tal que la generación de las mareas es provocada por un sistema a lo largo de la superficie de la tierra y presentan su máximo a 45° de inclinación, debido a que allí la contribución del diferencial de fuerzas es máximo, esto es para el modelo teórico, pero en la realidad las mareas presentan un máximo a 28.5° , el cual es el ángulo de inclinación terrestre (23.5°), mas la inclinación del plano lunar con la eclíptica (5°) (Figura 3.8) y coincide con la máxima declinación lunar sobre la eclíptica.

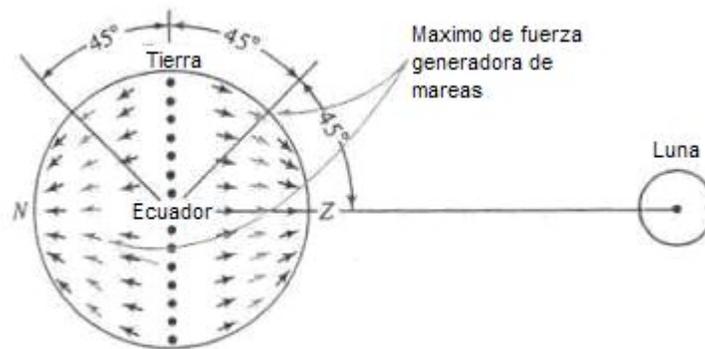


Figura 3.8 Fuerzas generadoras de mareas. (tomado y modificado de Thurman, 1994)

3.4.5.- Mareas vs. rotación terrestre.

Se considera que estos dos fenómenos independientes se afectan el uno con el otro, cuando tomamos en consideración que el giro terrestre provoca una fricción con el abultamiento generado por las mareas haciendo que la tierra se frene un poco debido al choque de los continentes en las masas de agua, hasta que finalmente la Tierra no gire más, esto no pasara pronto. Además el Efecto de Coriolis también involucra cierta frecuencia parásita que se le añade al espectro de frecuencia de las mareas.

3.4.6.- Teoría del equilibrio.

Es la teoría de mareas de Laplace, la cual supone a la Tierra perfectamente esférica y cubierta totalmente de agua. Por la acción de los astros, la superficie del mar toma la forma de un elipsoide. En esta teoría el máximo de marea coincide con el paso del astro por el punto de la bóveda celeste directamente encima de un observador colocado en la superficie terrestre llamado Cenit y el punto en la bóveda celeste directamente debajo de un observador colocado en la superficie terrestre llamado Nadir, y las aguas responden instantáneamente a las fuerzas generadoras de los astros, ignorándose los efectos de fricción e inerciales. La marea teórica producida en estas condiciones recibe el nombre de marea de equilibrio.

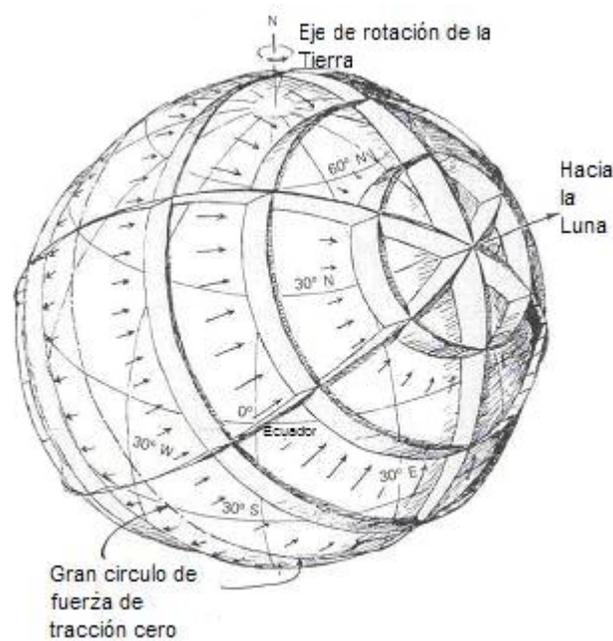


Figura 3.9 Bulbo de mareas de acuerdo con la teoría del equilibrio (Tomado de Gross,1990).

La gráfica es una idealización del sistema de mareas (explicado por la Teoría del Equilibrio), la altura de las rejillas indica la intensidad de la componente vertical de

mareas; como se puede observar el máximo de mareas lo encontramos para latitudes a 30° del ecuador con valor nulo o casi nulo en los polos.

La rotación terrestre tiene su efecto pero para este estudio es despreciada, el único efecto que se aprecia es el cambio periódico de la marea en cualquier punto de la Tierra (debido a que cualquier punto del globo terrestre pasa por esos dos abultamientos cada 12 horas, esto es que la tierra gira dentro del sistema de rejillas de la Figura 3.9; esta ciclicidad provoca el efecto perceptible de mareas aquí en la Tierra.

3.4.7.- La Teoría Dinámica.

Es aquella que considera los efectos producidos por la forma y profundidad de la cuenca en la marea. Además de otros efectos inerciales, se tratan las mareas como ondas, así estas pueden ser resueltas matemáticamente en varias componentes y cada una, tratada separadamente, con la necesidad de predecir la altura del agua en puertos y zonas costeras además de ser útiles para la navegación (Gross, 1970).

También reconoce que las mareas oceánicas envuelven sustanciales movimientos de agua y el efecto Coriolis.

Las fuerzas generadoras de mareas también pueden ser resueltas en componentes de mareas, las más importantes son aquellas debidas a la Luna y al Sol. Debido al cambio de posición de estos cuerpos con respecto a la Tierra muchas de las 62 componentes de mareas, son usadas para realizar predicciones de mareas en los océanos, las cuatro principales usualmente aportan cerca del 70% del rango de mareas (Tabla 3.1). El movimiento provocado por estas ondas de mareas sobre las superficies de los océanos es predicho a través de la Teoría Dinámica más el uso del análisis armónico es general y es también aplicable a la parte rígida de la Tierra.

3.4.7.1.- Diferencias entre la Teoría del Equilibrio y la Teoría Dinámica.

En la Teoría del Equilibrio no se consideran los continentes, explica los bulbos de mareas, considerando una Tierra no rotante cubierta de agua (océano estático) mientras la Teoría dinámica (océano dinámico) toma en cuenta el movimiento de los océanos y otras simplificaciones de la teoría del equilibrio además de considerar el efecto de Coriolis. Lo resaltante de estas teorías es que se aplican sólo a la parte líquida de la Tierra, es decir los océanos, la parte rígida no es considerada con la excepción de la Teoría Dinámica, la cual considera el efecto inercial que producen los continentes.

3.4.8.- Efectos de la declinación y la distancia.

Las órbitas de la Tierra Luna y Sol provocan diversos movimientos en los regímenes de mareas donde hay ciertas configuraciones que provocan máximos y mínimos en los regímenes de mareas, además de provocar las componentes principales del análisis armónico de las mareas.

Hasta ahora nuestra discusión no ha considerado el movimiento basculatorio de la Luna tomando como referencia el Ecuador terrestre. A lo largo del mes sinódico ella se traslada de un hemisferio al otro, basculando entre uno y otro hemisferio, esto ocurre de la siguiente manera:

La Tierra tiene un eje de rotación cuya inclinación es de 23.5° desde la vertical con la eclíptica o plano de trayectoria de la órbita de la Tierra alrededor del Sol (Figura 3.10), es debido a esta inclinación, que se experimentan las estaciones.

El plano de la órbita Lunar no solo intercepta el de la eclíptica en un ángulo de 5° , sino que también precesa o rota mientras mantiene ese ángulo de 5° . Esta precesión

completa un ciclo cada 18.6 años. Considerando todo esto, la declinación relativa de la Luna al plano del Ecuador de la Tierra es bastante complejo.

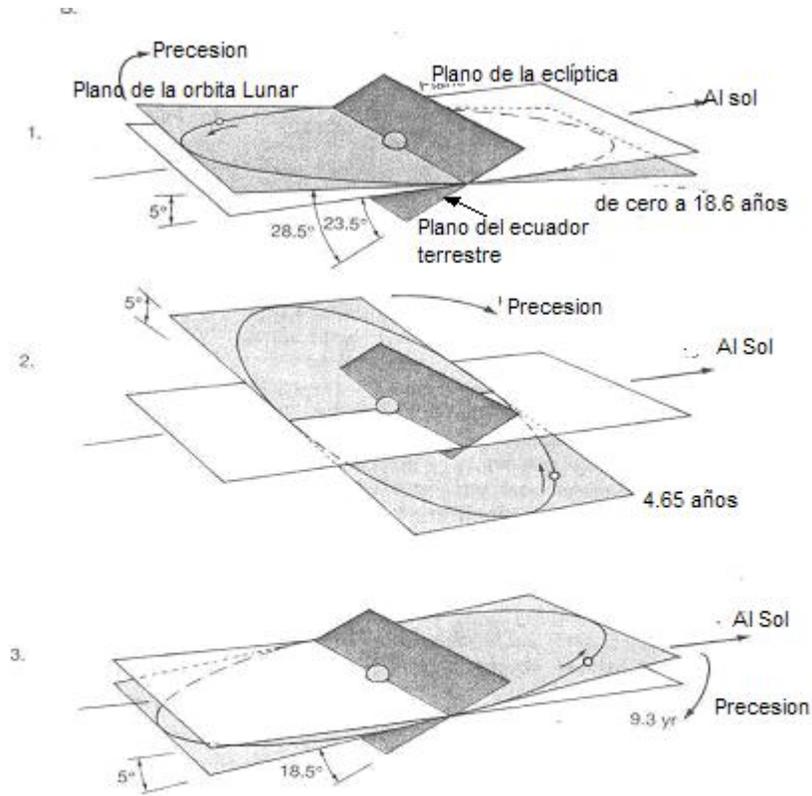


Figura 3.10 Efecto de la declinación de las órbitas (Tomado de Thurman, 1994)

En la parte 1 de la Figura 3.10, la declinación de la órbita relativa de la Luna al Ecuador terrestre es de 28.5°. La declinación cambiara de 28.5° Sur, a 28.5° Norte y regresara a 28.5° Sur del Ecuador en un período de un mes. Esto es el llamado movimiento basculatorio.

La parte 2 de la ilustración muestra la relación de la eclíptica, el plano de la órbita de la Luna y el plano del Ecuador terrestre después de un cuarto de precesión, o 4.65

años más tarde. La máxima declinación de la órbita Lunar relativa al Ecuador de la Tierra todavía se aproxima a 28.5° . Sin embargo en la parte 3 cuando una mitad de precesión es completada, la cual es de 9.3 años después de la condición observada en la parte 1, la máxima declinación de la Luna relativa al Ecuador de la Tierra es de 18.5° (Gross, 1990).

Basados en estas consideraciones, ahora nosotros debemos alterar nuestros conceptos previos de la teoría de predicción de marea de equilibrio, ya que se debe esperar que los bulbos de mareas raramente estén alineados con el Ecuador y ocurrirán la mayoría de las veces al Norte y al Sur del Ecuador, además la Luna es la fuerza dominante, la cual crea todos los efectos de mareas en todos los océanos de la Tierra.

Entonces debemos suponer que los bulbos seguirían a la Luna dependiendo de cómo se muestra está, durante la jornada mensual a través del Ecuador, siendo encontrado un máximo al Norte y Sur del Ecuador.

Efectos de la distancia.

Las órbitas de la Luna y la Tierra están en ciertas posiciones a lo largo del año, estas posiciones tienen puntos de máxima cercanía, cuando los involucrados en esta configuración son la Tierra y el Sol, entonces son llamados Afelio, cuando es la máxima lejanía de la Tierra al Sol y Perihelio cuando es la máxima cercanía, mientras que Perigeo, es la máxima cercanía de la Luna a la Tierra y Apogeo la máxima lejanía de la Luna a la Tierra (Figura 3.11).

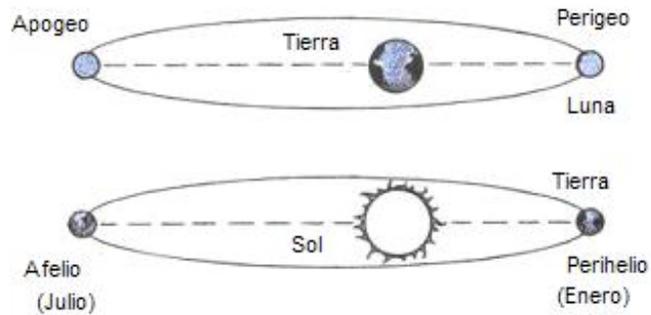


Figura 3.11 Afelio, perihelio, perigeo y apogeo.

3.4.9.- Tipos de Mareas (mareas oceánicas).

3.4.9.1.- Esquema diario de mareas.

De acuerdo con la Teoría del equilibrio, un punto en la tierra al pasar por los bulbos experimenta dos picos de mareas a lo largo del día, ya que hay 12 horas de diferencia entre un bulbo y el otro, esto provoca el efecto que percibimos como mareas diarias; entre las mareas diarias hay diversos tipos:

La Figura 3.12 muestra como es el comportamiento diario de la marea durante las posiciones de conjunción (marea viva) y posiciones de cuadratura (marea muerta).

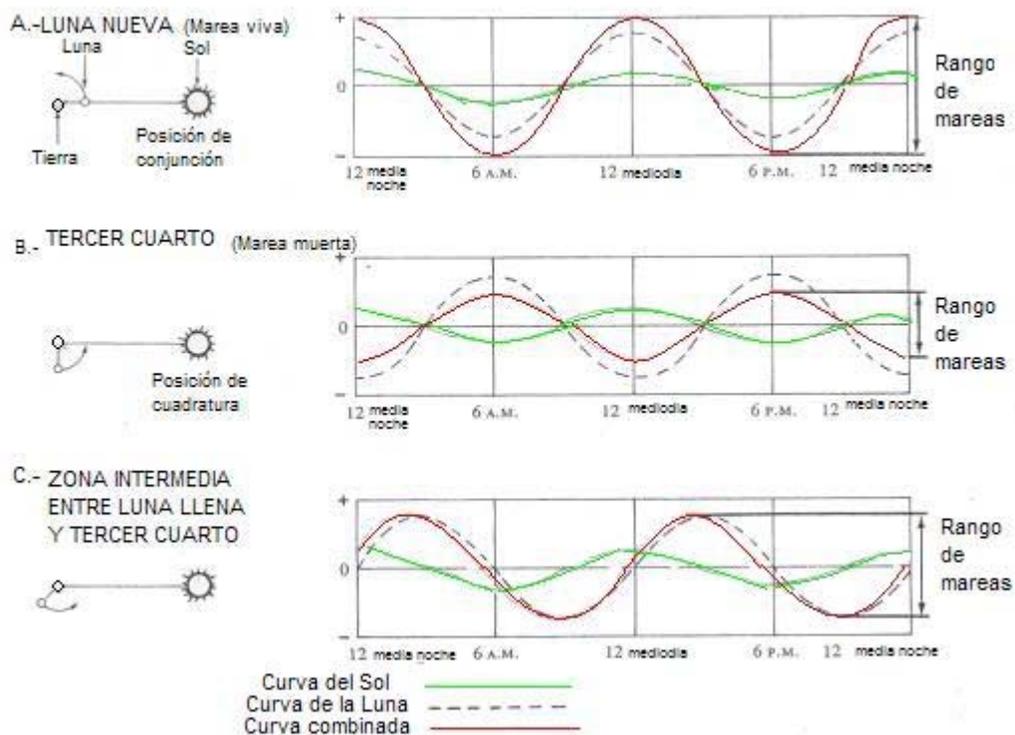


Figura 3.12. Explicación de la marea diaria.

3.4.9.2.- Mareas diurnas (respuesta oceánica).

Su período de recurrencia es de 24 horas, suceden principalmente en las costas no son muy comunes y dependen de la configuración de la cuenca y de la región donde se miden. Se observó la siguiente variación en la altura de las aguas.

En la Figura 3.13, se muestra un ejemplo en el Puerto de Pensacola, Florida. La configuración de la cuenca es importante en este tipo de mareas, suele el periodo natural de la cuenca donde se desarrolla la marea estas mareas son comunes para el Golfo de México (Grossman, 1988)

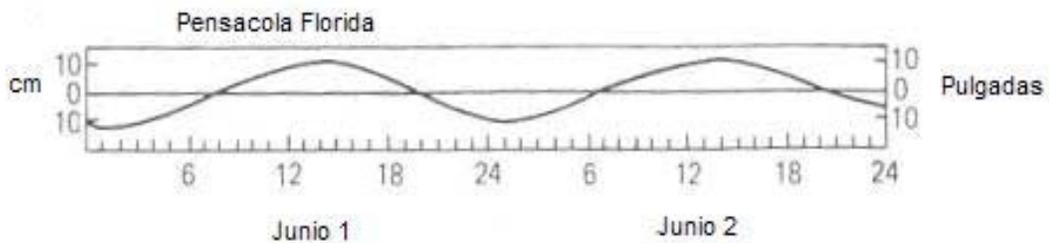


Figura 3.13 Marea diurna. (Grossman,)

Obsérvese la frecuencia de la marea la cual es de un ciclo por día.

3.4.9.3.-Mareas Semidiurnas (respuesta de los océanos).

Su período de recurrencia es de 12 horas, son las más comunes y tienden a suceder dos veces por día, estas mareas también se observan en la parte rígida de la Tierra.

En la Figura 3.14, se muestra un ejemplo. Esta medición efectuada en el Puerto de New York del 22 al 23 de Abril muestra la frecuencia típica, observada de la marea semidiurna, de dos ciclos por día.

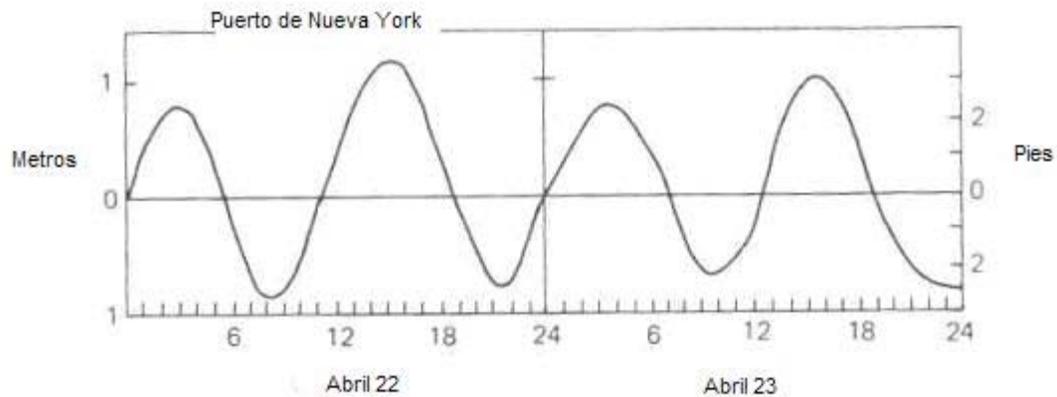


Figura 3.14 Mareas semidiurnas. (Gross, 1988)

3.4.9.4.- Mareas mixtas.

Estas mareas son producto de la adición del efecto diario con el semidiurno en un puerto cualquiera de la Tierra.

En la Figura 3.15 se muestra un ejemplo de marea mixta. En esta gráfica del Puerto de Washington muestra los diversos niveles provocados por la marea mixta observada.

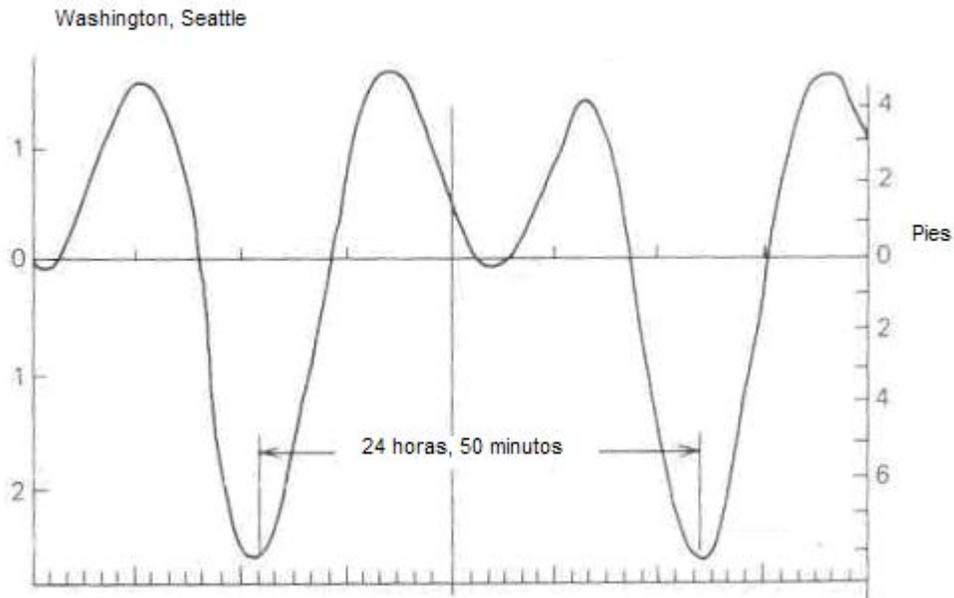


Figura 3.15 Marea mixta. (Gross, 1988)

3.4.10.- La desigualdad diurna.

La Luna no siempre esta sobre el Ecuador, de hecho ella varia su declinación con respecto a la Tierra desde el Ecuador hasta 28.5 grados en declinación, la Luna cambia de un hemisferio a otro cada 14,5 días esto es un movimiento de bascularidad. Este movimiento provoca la desigualdad diurna. (Figura 3.16).

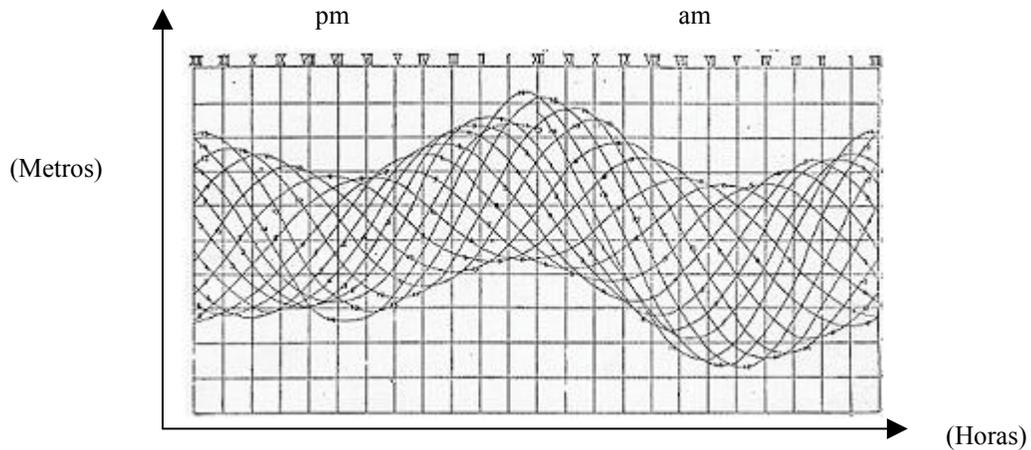


Figura 3.16. Desigualdad diurna. (Internet)

Esta gráfica adquirida en Bombay nos muestra la variación diurna de la altura de mareas para distintos días del mes en un mismo puerto, cada una de las curvas representa un día de medición, de manera tal que se obtuvieron catorce mediciones de altura de mareas o sea 14 días aproximadamente, el máximo de todas las mareas coincide con la salida unas pocas horas después de la fase luna llena (marea viva).

Obsérvese también que ninguna de las curvas se parece a la otra, esto es debido a la desigualdad diurna, el cual es el efecto producido por la Luna, al no salir siempre por el mismo punto de un día al otro, esto es debido a su movimiento de traslación alrededor del globo terráqueo.

3.4.11.- Variación mensual de la marea.

La variación mensual de la marea se ve afectada por alineaciones espaciales de la Luna, el Sol y la Tierra llamadas Mareas Vivas (Spring Tides) y Mareas Muertas (Neap Tides). Las Mareas Vivas se producen cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineados y las Mareas Muertas cuando la Luna y el Sol están en una posición de cuadratura (Figura 3.17).

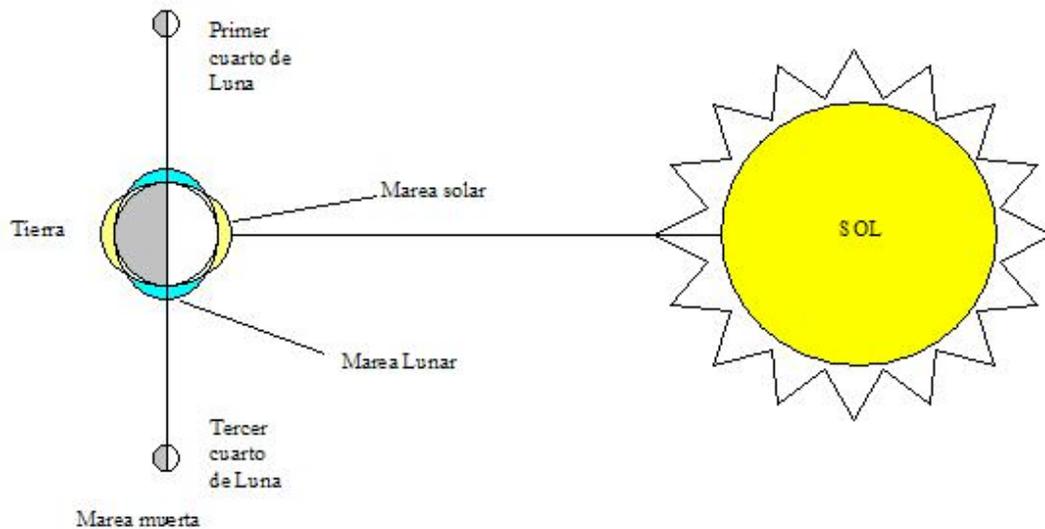


Figura 3.17. Mareas muertas.

La posición del Sol con la Luna está en un ángulo de 90° esto reduce la intensidad de la marea, debido al efecto contrapuesto de un astro con el otro, por esto se alcanza el mínimo nivel de las aguas y de allí su nombre de mareas muertas.

Cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineados, lo cual ocurre dos veces en el mes, se producen las llamadas Mareas vivas, las fuerzas aditivas de estos tres astros provocan el aumento en el nivel de las aguas y las máximas mareas en la parte rígida de la Tierra, estas mareas coinciden con las fases de Luna Nueva y Luna Llena (Figura3.18)

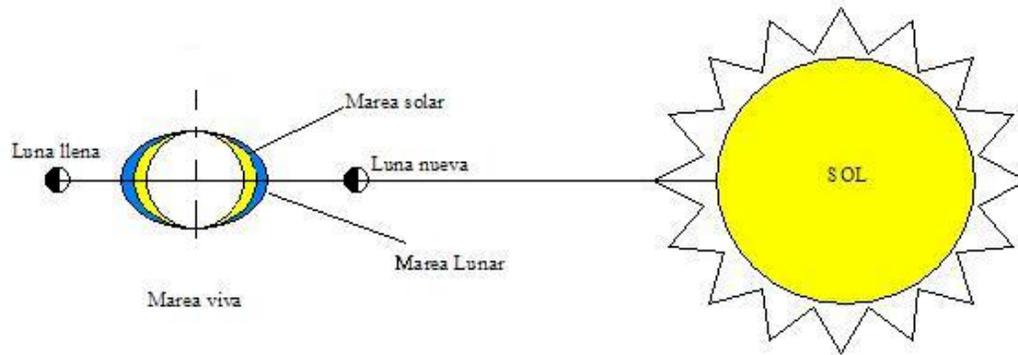


Figura 3.18. Mareas vivas.

Esta alineación astral suele repetirse dos veces por cada mes, es así que durante un mes la separación entre estas mareas es de aproximadamente 14.5 días coincidiendo como ya se dijo antes con los periodos de Luna Llena o Nueva.

Si se quiere ver como seria esto en un registro, observa el máximo de mareas para las distintas fases de la Luna, esta marea es medida en el mar, pero una gráfica similar se puede obtener para la parte rígida de la Tierra con el consecuente cambio de las unidades de distancia a unidades de gravedad.

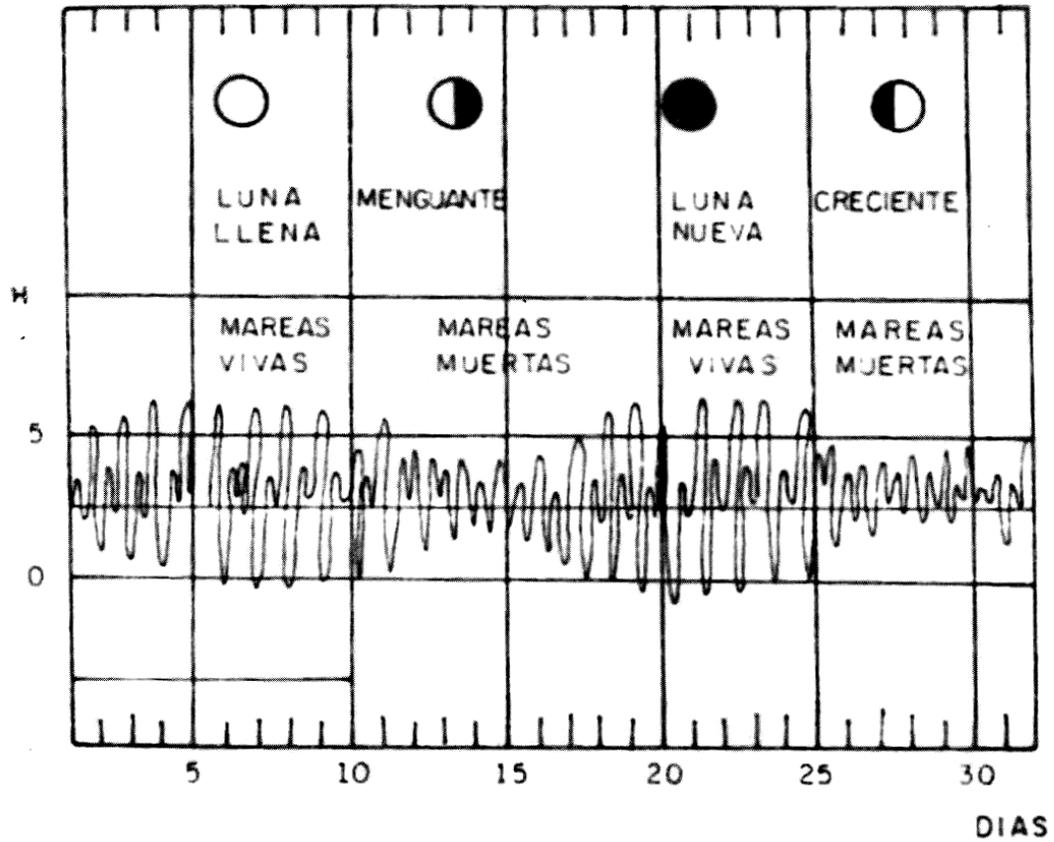


Figura 3.19 Registro de variación mensual (Tomado y modificado de Bracho, 1988).

3.4.12.- Mareas de la corteza terrestre sólida.

Bajo el influjo de las fuerzas de marea, la corteza sólida de la Tierra efectúa también ciertos movimientos. Las variaciones que así experimenta la fuerza de gravedad y las perturbaciones de la vertical, sólo son perceptibles con instrumentos muy sensibles a causa de la pequeñez del efecto (Bracho, 1988; Gravímetros de Tomasheck y Schaffernicht; Péndulo horizontal de Lettan).

La máxima perturbación de la vertical que podría expresarse en el supuesto de que la Tierra fuese rígida, así:

$\delta_i = 0.015$ En este caso la Oscilación de la Gravedad importaría $\delta g = \pm 0.15 \text{ mgal}$.

Los valores realmente observados son menores. La elevación vertical importa unos 24 cm, según Scheweydar, y unos 50 cms, según Tomasheck y Schaffernicht.

Como se trata de un fenómeno muy complicado, afectado por otras causas, la teoría de estas mareas resulta difícil y está todavía imperfectamente establecida.

En los últimos años se ha utilizado el gravímetro de Worden equipado con dos dispositivos registradores, para determinar las mareas. En la tabla siguiente damos los resultados de una investigación Norteamericana. Las diferentes mareas parciales reciben las mismas denominaciones que las mareas oceánicas correspondientes.

Abreviaturas empleadas en la tabla:

M2: Marea lunar principal, semidiaria (100).

S2: Marea solar principal, semidiaria (46.5).

N2: Marea lunar elíptica máxima, semidiaria (19.4).

K1: Marea Sol-Luna, diaria (39.9).

Deformación de la Tierra Sólida por mareas.

Es un fenómeno global y además la Tierra descansa dentro de la influencia gravitacional del Sol y la Luna, fuerzas de Mareas son ejercidas en todos los puntos de masas moldeando la Tierra.

Estas fuerzas se deben a la combinación de la fuerza centrífuga creada por la rotación de la Tierra sobre su eje y la influencia gravitacional de sus dos vecinos principales.

Los fenómenos de mareas son típicamente de tener períodos de 24 horas (mareas diurnas, 12 horas (semidiurna). Sin embargo y debido a la interacción de la rotación de la Tierra dentro de los campos gravitacionales del Sol y la Luna, el espectro de mareas exhibe una fina estructura de muchos períodos de mareas dentro de las bandas diurna y semidiurna.

Las frecuencias constituyentes del espectro de mareas son conocidas con gran precisión, basadas en décadas de observación astronómica (Tabla 3.1).

Aproximadamente 95% de la energía de marea total esta contenida en los 5 componentes principales de mareas O_1 , k_1 en la banda diurna y N_2 , M_2 y S_2 en la banda semidiurna. Usando un apropiado modelo elástico de la Tierra (e.g. Bullen Model B) y conociendo la órbita e información de masa de la Tierra, Sol y Luna, pueden ser calculadas la gravedad teórica de la marea y su inclinación y deformación.

Las amplitudes debidas a la deformación por mareas son las más pequeñas cerca del núcleo de la Tierra y alcanzan su máximo en el manto de la Tierra, ellas permanecen relativamente constante a través del manto hasta la superficie de la Tierra.

Como las rocas de la corteza superior se deforman, el volumen de los poros dentro de las rocas tiende a incrementarse debido a la dilatación de mareas o a decaer debido a la compactación producida por las mareas.

Si hay fluido presente en el poro, la presión de poro cambiara en respuesta a la deformación de marea aplicada. La naturaleza global de la deformación de marea sugiere que los métodos basados en respuestas de presión del yacimiento, responden a la deformación producida por las mareas y no están limitados por la profundidad.

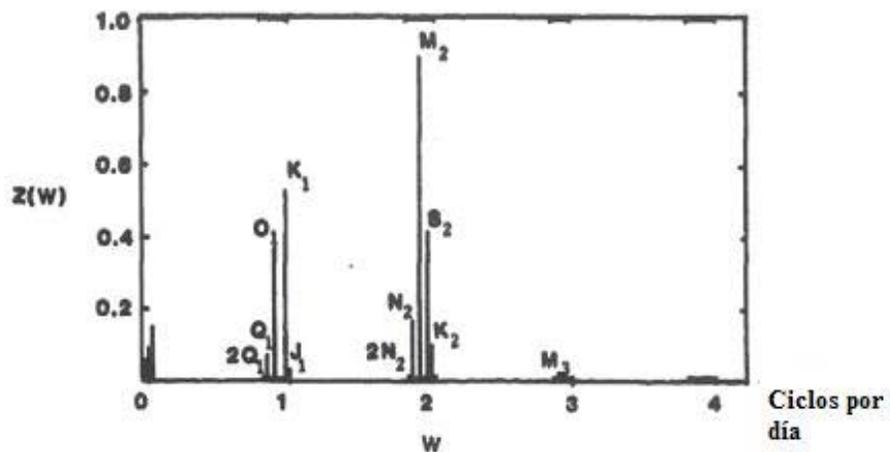


Figura 3.20 Espectro de Fourier para las componentes de mareas $Z(W)$ tiene escala adimensional.

Líneas principales del espectro de potencial de mareas. Las líneas gruesas indican el ancho de las bandas de frecuencias y estas a su vez contienen los diversos tipos de frecuencias de las mareas.

Obsérvese el ancho de banda para las distintas frecuencias, las amplitudes más importantes están contenidas en los anchos de banda de 1 y 2 ciclos por día.

La Tabla 3.1 muestra los valores en velocidad, período en horas solares y relación porcentual con respecto a M2 de las componentes armónicas de la marea oceánica

Tabla 3.1 Análisis armónico, componentes de las mareas en la parte oceánica.

Nombre de las mareas parciales	Símbolo	Velocidad (hsp)	Periodo en horas solares	Coefficientes Relación M2=100
Componentes Semidiurnas				
Lunar principal	M ₂	28.98410	12.420	100.000
Solar Principal	S ₂	30.00000	12.000	46.600
Elíptica lunar mayor	N ₂	28.43973	12.660	19.200
Semidiurna lunisolar	k ₂	30.08214	11.970	12.700
Elíptica Solar Mayor	T ₂	29.95893	12.010	2.700
Elíptica lunar pequeña	L ₂	29.52848	12.190	2.800
Lunar elíptica de segundo orden	2N ₂	27.89535	12.910	2.500
Mayor eveccional lunar		28.51258	12.630	3.600
Menor eveccional lunar		29.45563	12.220	0.700
Varacional		27.96821	12.870	3.100
Componentes Diurnas				
Lunisolar Diurna	K ₁	15.04107	23.930	58.440
Lunar principal diurna	O ₁	13.94304	25.820	41.500
Solar principal diurna	P ₁	14.95893	24.070	19.400
Lunar elíptica mayor	Q ₁	13.39866	26.870	7.900
Lunar elíptica menor	M ₁	14.49205	24.840	3.300
Lunar elíptica	J ₁	15.58544	23.100	3.300
Componentes de largo periodo				
Lunar 15 días	Mf	1.09803	327.67	17.2
Lunar mensual	Mm	0.54437	661.3	9.1
Solar semianual	Ssa	0.08214	2191.43	8

Definición de cada componente de la Tabla 3.1:

M2. Componente principal lunar semidiurna.

Representa la perturbación semidiurna sobre la marea debida a la rotación aparente de la Luna alrededor de la Tierra. Tiene un período de 12.42 horas.

M1. Componente lunar elíptica diurna.

Expresa la perturbación debida a la elípticidad de la órbita Lunar. Tiene período de 24.86 horas.

Mf. Componente lunar quincenal.

Mm Componente lunar mensual.

N2 Componente lunar elíptico semidiurno mayor.

Es el responsable de expresar la perturbación semidiurna en la marea causada por la elípticidad de la órbita Lunar. Su período es de 12.63 horas.

2N2. Componente lunar elíptico semidiurno de segundo orden.

Su función es similar a N2, solo que representa perturbaciones de pequeña amplitud y con un período ligeramente diferente, cuyo valor es de 12.91 horas.

K2. Componente Lunisolar semidiurna.

Es el responsable de expresar las perturbaciones semidiurna debidas a la declinación del Sol y la Luna, conjuntamente con M2 y S2, su período.

T2. Componente solar elíptico mayor.

Su período es de 12.01 horas y expresa las variaciones diarias debidas a la elipticidad de la órbita terrestre.

L2. Componente lunar elíptico semidiurno.

En conjunción con N2 modula la amplitud y frecuencia de M2 causada por el efecto de la variación en la velocidad orbital de la Luna debido a su elipticidad.

S2 Principal componente solar semidiurno.

Expresa la perturbación de período semidiurno presente en las mareas debido al movimiento aparente del Sol alrededor de la Tierra. Tiene un período de 12 horas.

K1 Componente Lunisolar diurno.

Expresa el efecto de la declinación lunar y solar. En combinación con O1 y PI es la responsable de la desigualdad diurna. Su período es de 23.93 horas.

O1 Componente principal lunar diurno.

Representa la perturbación diurna con período de 24.82 horas, debida a la rotación aparente diaria de la Luna alrededor de la Tierra, en ese intervalo de tiempo.

S1 Componente solar diurno.

Representa la acción de las mareas debidas al movimiento aparente del Sol, alrededor de la Tierra en un día sidéreo. Tiene un período de 24.07 horas.

P1 Componente solar diurna de declinación. Muchos autores identifican a S1 con P1.

Q1 Componente Lunar elíptico diurno mayor.

Es el mayor de los componentes lunares debido a la elípticidad de la órbita lunar. Su período es de 26.87 horas.

J1. Componente lunar elíptica menor diurna.

Expresa las perturbaciones menores que ocurren en la órbita lunar elíptica.

Ssa. Componente solar semianual.

Es responsable de representar las perturbaciones semestrales en la declinación y paralelaje de la Tierra respecto al Sol. Tanto Ssa., como Sa, pueden identificarse como componentes meteorológicos, que dependen de la estación en la cual nos encontramos.

S4 y S6.

Son los componentes solares en aguas poco profundas y representan el ascenso que sufren las mareas solares al moverse hacia zonas de menor profundidad. Sus períodos son múltiplos enteros del componente principal solar semidiurno S2.

Sa.

Expresa los cambios debidos a las variaciones en la declinación y paralelaje de la Tierra respecto al Sol, en el período de un año Trópico.

3.4.13.- Respuesta ideal en latitud del modelo de mareas terrestres.

La marea varía en su amplitud de manera latitudinal y esta variación es debida al cambio de posición del observador dentro del bulbo de mareas, la marea aquí representada fué generada a partir de un programa, que genera curvas de mareas sintéticas terrestres, aquí observamos una marea para el mismo día a distinta latitud (Figura 3.21).

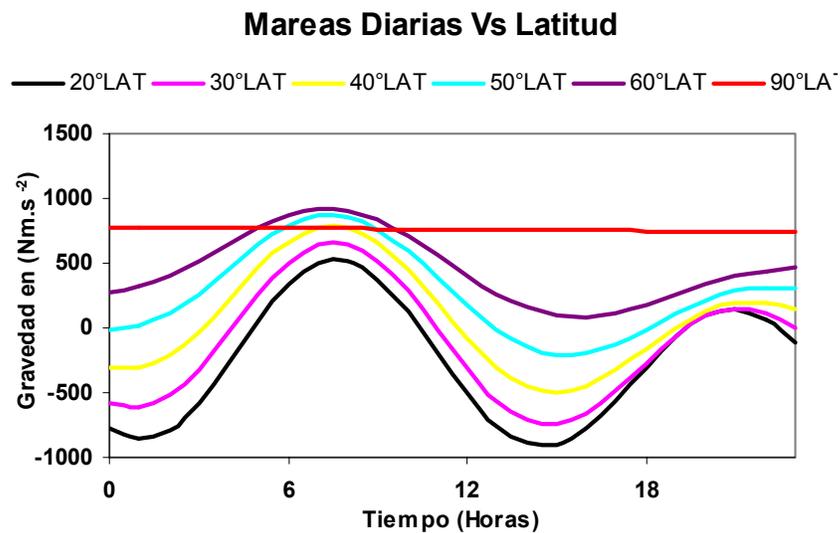


Figura 3.21 Variación en latitud de la gravedad en mareas terrestres.

Si se continúa estudiando la tendencia de las curvas se observara una máxima amplitud a una latitud de 0° . La Figura 3.21 se realizó para el tiempo en que la Luna pasa justo por latitudes ecuatoriales, sino el máximo se registraría en la latitud entre 28.5° y -28.5° que es el movimiento basculante de la Luna a lo largo de su eclíptica.

Los datos de la Figura fueron obtenidos utilizando el programa de mareas Terrestres ETGTAB. Todas las curvas mostradas fueron generadas en un mismo día.

3.4.14.- Respuesta ideal en longitud del modelo de mareas terrestres.

La marea no varía longitudinalmente debido al cambio en la posición del observador dentro del bulbo de mareas. En la figura 3.22 se muestra la variación con la longitud, usando datos generados por el programa de mareas ETGTAB.

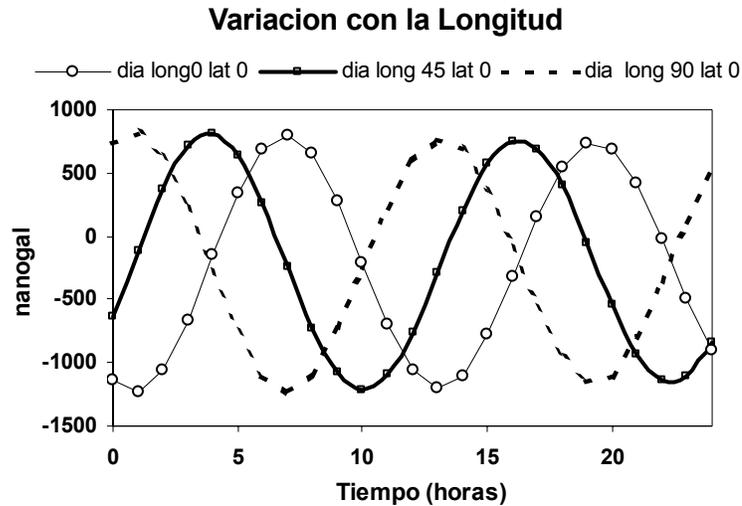


Figura 3.22. Efecto de la variación en longitud de la gravedad en mareas terrestres.

Se nota que los cambios en longitud, son solo cambios en la fase del modelo ideal, esto es porque en ángulos de fase de 90° , un punto puede sentir un máximo o un mínimo dependiendo del lugar en que se encuentre dentro o fuera del abultamiento causado por las mareas.

3.4.15.- Respuesta mensual de la marea.

Normalmente el ciclo de mareas anual alcanza valores que oscilan entre 0,2 a 0,3 miligales durante el año, para mareas de la corteza terrestre.

En la Figura 3.23, se muestra una gráfica de mareas mensuales terrestres, generada sintéticamente por el programa ETGTAB.

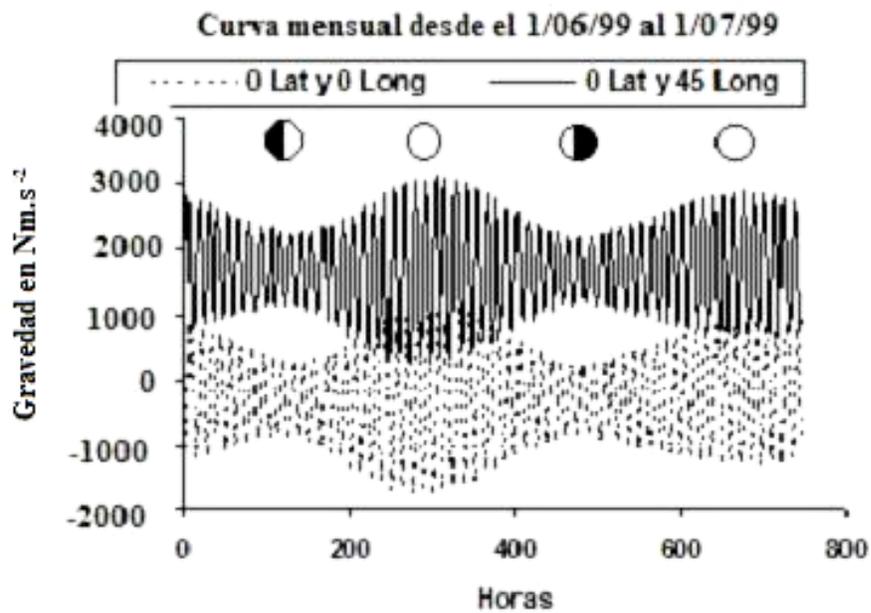


Figura 3.23. Dos Curvas que representa un mes de mareas a diferentes longitudes.

Los máximos de la gráfica coinciden con los ciclos de mareas vivas, mientras que los valles con los ciclos de mareas muertas o bien cuando el Sol, la Luna y la Tierra están en cuadratura o en conjunción.

3.4.16.- Respuesta anual de la marea.

El ciclo anual de mareas viene acompañado de una variación promedio entre 0.2 a 0.3 miligales, estas variaciones tienen sus máximos y mínimos, dependiendo de cuán alejado o cerca este el Sistema Tierra - Luna del Sol en su movimiento de traslación alrededor del mismo.

En la Figura 3.24 se muestra la variación anual generada sintéticamente por el programa ETGTAB. La variación anual viene acompañada de un cambio de gravedad entre 0.2 a 0.3 miligales.

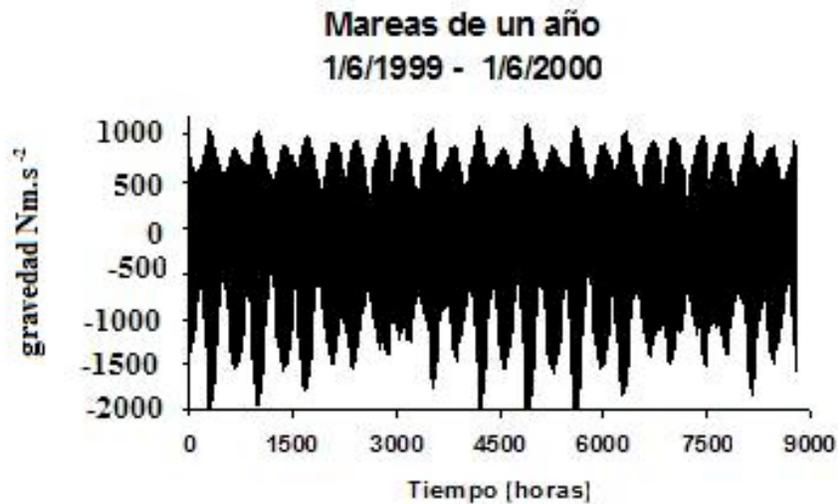


Figura 3.24. Variación anual de marea terrestre modelo sintético.

Obsérvese que cada dos picos en la en la Figura 3.24 representan un período de un mes, donde cada pico representa mareas vivas y mareas muertas. Esta gráfica fue generada por el programa ETGTAB, para un ciclo anual.

3.4.17.- Otros períodos de tiempo de la marea.

La marea posee otros períodos que se relacionan con ciclos mayores al anual como el de 18.6 años, debido a su movimiento de precesión lo cual provoca variaciones que alteran las predicciones.

3.4.18.- El análisis armónico:

El análisis armónico: es la descomposición en sus componentes generadoras de la marea terrestre, es una suma de las ondas generadas por el movimiento del Sol, la Tierra y la Luna.

Para desarrollar un máximo de comprensión de las mareas se necesita una combinación de análisis matemático y observación.

El análisis armónico es una técnica matemática para el estudio de mareas que abarca todas las variables generadoras de mareas, variables que poseen una periodicidad (ciclo patrón), se identifican con casi 400 variables generadoras de mareas, llamadas mareas parciales. La marea actual observada en cualquier locación dada es el efecto combinado de todas las mareas parciales en ese punto (mareas parciales, M2, S2, L2). Para simplificar las cosas un modelo relativamente preciso de las mareas actuales puede ser calculado considerando solo las siete más grandes mareas parciales.

Ellas son listadas con sus características en la Tabla No. 3.1. Combinando los períodos.

De cada una de las mareas parciales con las amplitudes y fases que puedan ser obtenidas de la observación, predicciones relativamente precisas de la marea en cualquier localidad.

Para que las predicciones sean tan precisas como sea posible, las observaciones deben ser hechas en un período de al menos 18.6 años, el período de precesión del plano de la órbita Lunar a través de la eclíptica.

El análisis consiste en el desarrollo de Fourier de la marea real observada, logrando separarla en componentes armónicos, periódicos, simples y en este desarrollo las fuerzas astronómicas de la Luna y el Sol son representadas por las fuerzas generadoras de mareas de un cierto número de astros hipotéticos que orbitan alrededor de la Tierra.

Cada componente de marea representa entonces un cambio periódico de las posiciones relativas de los astros reales. Este análisis es usado en el caso de las aguas en la predicción de futuras alturas de mareas y para el cálculo de las tablas de corrientes de mareas.

3.4.19.- Teoría espectral de las mareas.

Uno de los métodos más adecuados para el estudio de las mareas, se basa en el desarrollo armónico de Fourier de la marea real observada. Podemos escribir la altura de marea como función del tiempo según la ecuación siguiente: (En el caso de mareas Oceánicas) (Bracho, 1988).

$$h(t) = h_1 \left(w_1 t - \text{Tan}^{-1} \frac{B_1}{A_1} \right) + h_2 \cos \left(w_2 t - \text{Tan}^{-1} \frac{B_2}{A_2} \right) + \dots$$

$$\text{Donde } h_i^2 = A_i^2 + B_i^2$$

El procedimiento para determinar las amplitudes y fases iniciales de las componentes armónicas, es largo por lo que pueden usarse programas ya elaborados que usan una serie de datos reales previamente medidos para ajustar amplitudes B ; estas amplitudes representan las magnitudes relativas de las fuerzas suscitadoras de mareas para el lugar de observación. Las frecuencias angulares W representan los cambios periódicos de las posiciones de los astros reales (Luna y Sol en nuestro caso). El valor de estas se conocen con exactitud a partir de cálculos astronómicos previos.

El valor de la altura $h(t)$ calculada para cada estación mareográfica es comparada con los registros reales de altura, de manera tal que si coinciden, la serie obtenida es presentada en la forma de la ecuación logrando con ello un registro teórico caracterizado por constantes de altura h (las componentes más importantes tendrán una altura h mayor) y por fases dadas como:

$$\tan^{-1} \frac{B_1}{A_1}$$

Que indican el retardo angular del máximo de una componente de la marea observada detrás del máximo correspondiente de la misma componente en la marea teórica de equilibrio, es decir, que el retardo se toma convencionalmente con respecto al paso del astro perturbador sobre el meridiano del lugar. En los cálculos, esta fase está en grados. Así, entonces las alturas y las fases constituyen las llamadas constantes armónicas.

En la Tabla 3.1 se ofrece al lector un listado con las principales componentes armónicas periódicas. Las cuales determinan cada una de las frecuencias W presentes en la ecuación precedente.

Es importante notar que no siempre pueden utilizarse todas las frecuencias incluidas en esta tabla, ya que los programas utilizados con frecuencia desprecian las componentes menos influyentes, además, algunos componentes dependen de la

localización de la estación y de las condiciones meteorológicas del área en el momento de tomar las medidas.

En la Figura 3.25 se muestra una predicción e la marea oceánica a través de la teoría espectral y el análisis armónico en el puerto de Amuay.

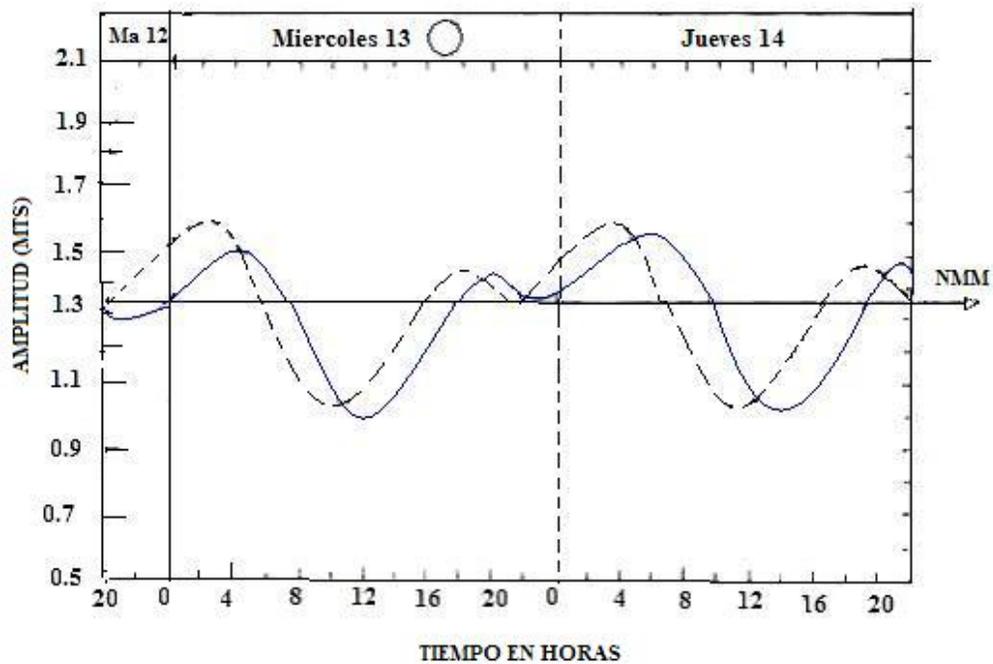


Figura 3.25 Ejemplo de marea oceánica o dinámica, en el Puerto de Amuay (Tomado de Bracho, 1988).

Las amplitudes reales son aquí representadas por la línea de trazo continuo, mientras que la de trazo interrumpido es producto del análisis armónico para el mes de Junio de 1984 en la estación Amuay. El Datum de amplitudes es el cero de la regla del Mareógrafo (Bracho, 1988).

3.5.- PRUEBAS DE RESTAURACION DE LA PRESIÓN.

3.5.1- CONCEPTO.

La prueba de restauración de la presión consiste en monitorear la presión dentro del yacimiento. Esta tiene por finalidad estudiar el comportamiento de la presión en el yacimiento. Si se realiza el cierre del pozo en superficie, la presión de fondo fluvente, (P.W.F.) tiende a igualarse con la presión fluvente del yacimiento. Cuando se alcanza el equilibrio dentro del pozo, se dice que la presión ha quedado restaurada dentro del hoyo y por tanto ha alcanzado la presión de yacimiento P_o . A esto se le conoce con el nombre de Build Up.

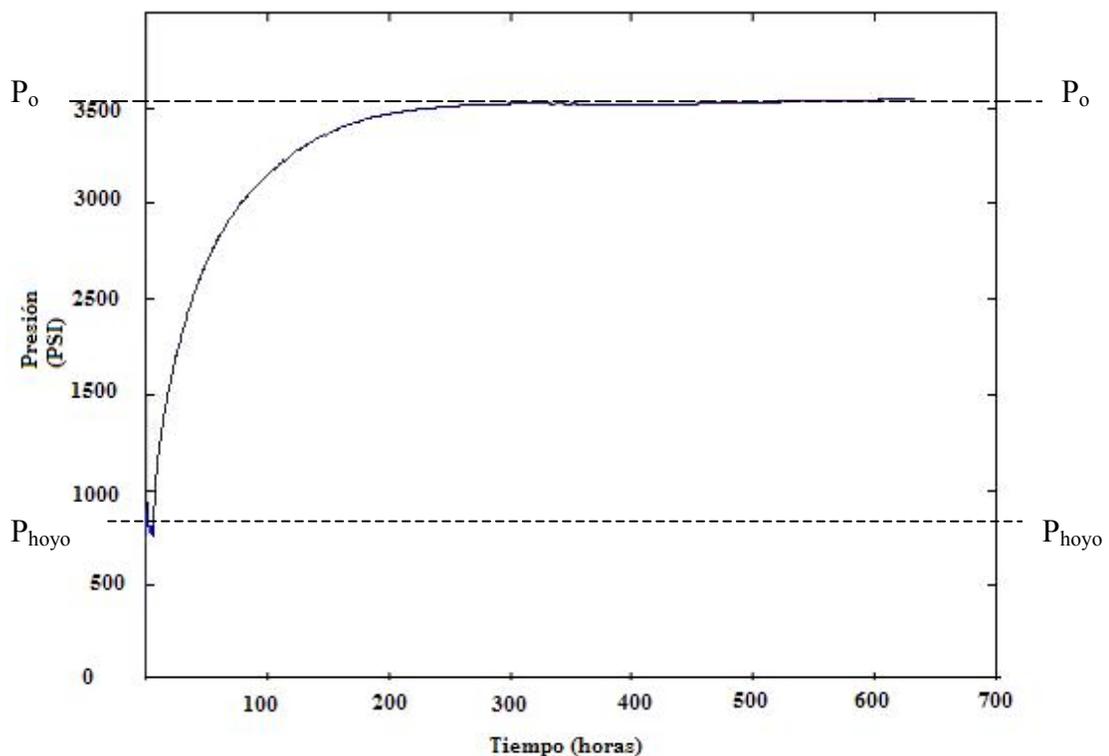


Figura 3.26 Curva de restauración de la presión (Build Up.).

La Figura 3.27 muestra el diagrama esquemático relacionado con la prueba de restauración. Aquí se observa el significado físico de P_o y P_{hoyo} . El flujo es posible debido a que existe un diferencial de presión en los intervalos de cañoneo, donde $P_o > P_{\text{hoyo}}$. Esto empuja el fluido en dirección del hoyo, pero debido al cierre de la válvula de superficie, la presión existente en el hoyo ira creciendo en la medida que

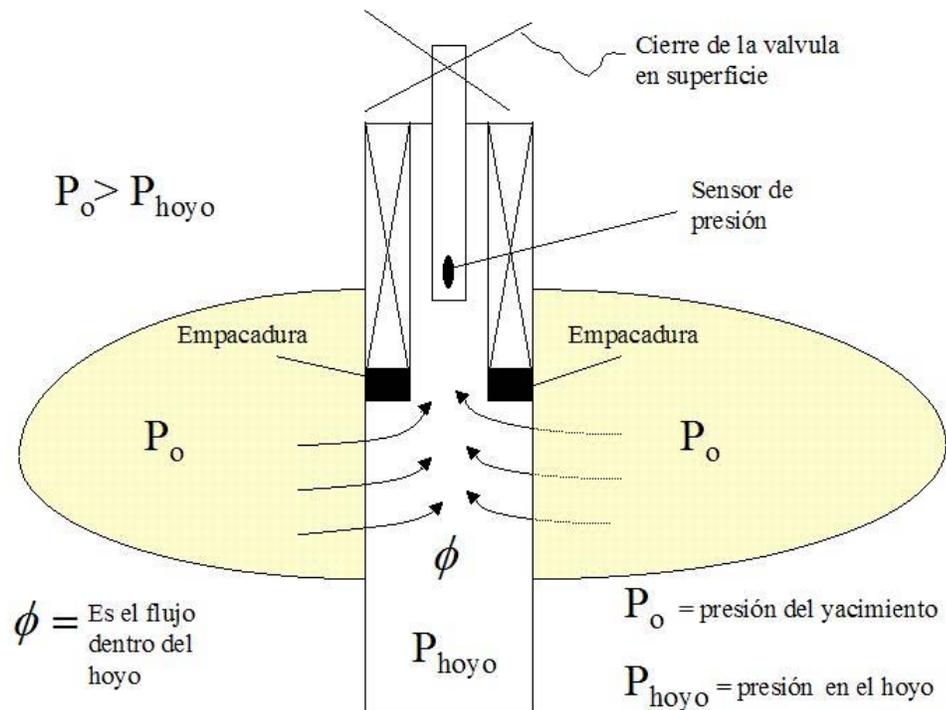


Figura 3.27 Representación física de la prueba de restauración (Build Up).

se vaya presurizando lentamente el hoyo hasta que el sistema alcance el equilibrio. Esto ocurre cuando P_o sea igual a la P_{hoyo} .

3.5.2.- Corrección por mareas.

Durante las pruebas de “Build up”, el yacimiento se encuentra en un estado latente, algunas de sus pulsaciones son debidas a las mareas, tratadas a veces por los ingenieros de yacimientos como ruidos indeseados, los cuales deben ser eliminados de la información original de presiones, para poder trabajar con la data de presión al natural.

Cuando las mareas no son consideradas como ruidos, estas pueden llegar a ser usadas como parámetros de estudio del yacimiento, es decir son una herramienta más para el cálculo de propiedades físicas dentro del yacimiento.

CAPITULO IV

4.- VARIACIONES DE LA GRAVEDAD CON LA LATITUD.

4.1 EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE FORMULAS TEÓRICAS DE LA GRAVEDAD.

En este Capítulo se estudian las variaciones de la gravedad teórica con la latitud. En la Tabla 4.1, se comparan las gravedades teóricas obtenidas con las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4, correspondientes a las fórmulas de gravedad de los años 1930, 1967 y 1980, para latitudes comprendidas entre el ecuador y el polo.

Tabla 4.1. Variaciones de la gravedad con la latitud.

Latitud (grados)	SRG 1967 (miligales)	SRG 1930 (miligales)	SRG 1980 (miligales)
90	983217.762	983221.314	983218.637
80	983060.724	983064.675	983061.588
70	982608.781	982613.884	982609.620
60	981917.029	981923.908	981917.839
50	981069.565	981078.642	981070.357
40	980169.040	980180.479	980169.830
30	979324.071	979337.751	979324.870
20	978636.139	978651.662	978636.954
10	978187.557	978204.289	978188.384
0	978031.846	978049.000	978032.677

*SRG. Significa sistema de referencia geodésico.

Obsérvese que de la latitud 0° a la 90°, la variación de la gravedad en gales es de 5 unidades. Para una misma latitud, los modelos difieren en el primer decimal de gal.

En la Figura 4.1 se muestran gráficamente los datos de la Tabla 4.1. Se observa que para una misma latitud, la diferencia entre los modelos de 1967 y 1930 está alrededor

de 1mgal, mientras que el modelo de 1930 difiere hasta en 4 miligales con respecto a los otros dos modelos.

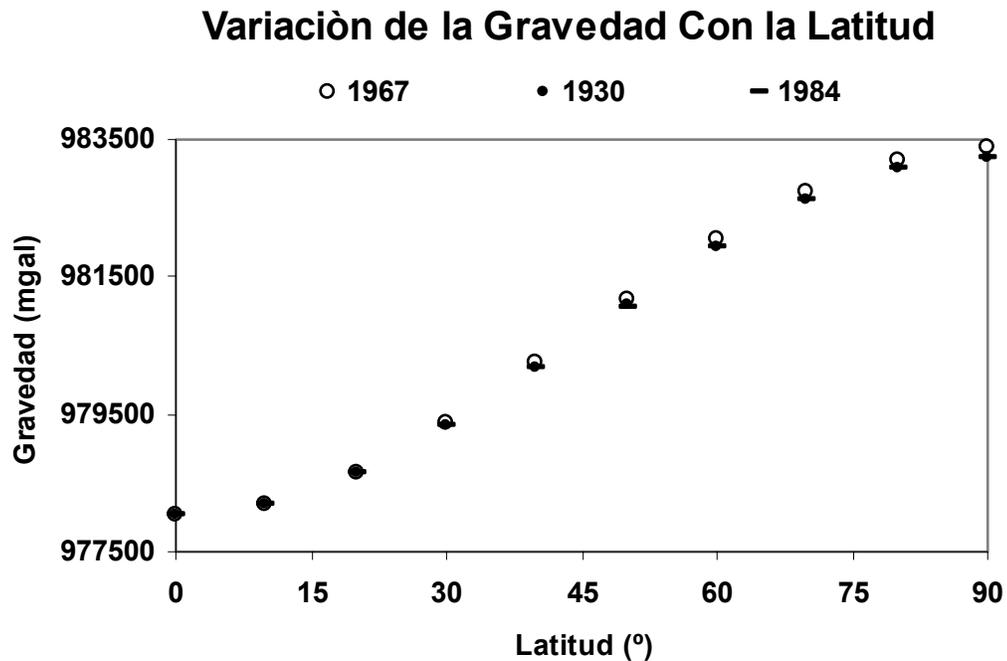


Figura 4.1. Gravedad teórica vs. Latitud, entre el Polo y el Ecuador. Fórmulas de Elipsoides de 1967, 1930 y 1984.

4.2. – Variación en el gradiente de presión de poros.

En muchos casos los ingenieros de petróleo utilizan en sus estimaciones de gradientes de presión de poros una constante, cuyo valor no corresponde al valor de la gravedad para latitudes en Venezuela. Es por esto que en este Trabajo Especial de Grado se estima el valor de esa constante para latitudes entre 7° y 11.5°, correspondientes a las latitudes venezolanas.

El cálculo que involucra al gradiente de presión de poros es el siguiente: La presión hidrostática se expresa como:

$$P(z) = \rho_f(z)g(z)z \quad (4.1)$$

donde $P(z)$ es la presión de poros, $\rho_f(z)$ es la densidad del fluido en los poros de la roca de la columna sedimentaria estudiada, $g(z)$ es la gravedad y z es la profundidad en la corteza.

Para estimar el gradiente de presiones debemos derivar la expresión de la presión con respecto a la profundidad y si se considera $g(z)=g$ constante, tenemos que,

$$\frac{dp(\rho_f gz)}{dz} = \rho_f g \quad (4.2)$$

Si ahora se supone también que ρ_f corresponde a la densidad del agua, entonces la ecuación (4.2) se reduce a,

$$\frac{dp}{dz} = g \left(\frac{psi}{ft} \right) \quad (4.3)$$

El valor dp/dz expresa la variación de la presión con la profundidad y es conocido como gradiente de presión hidrostático.

Las unidades de g , pueden ser en miligales o en cm/s^2 en CGS, pero en la Industria Petrolera, las unidades mas utilizadas son las Inglesas o sea, PSI (Pounds Square Inch) (libras por pulgadas cuadradas) $\left(\frac{libras}{pulg^2} \right)$ para la presión y ft (pies) para la profundidad. El valor de dp/dz considerando solo unidades inglesas es:

$$0.433 \left(\frac{psi}{ft} \right) \quad (4.4)$$

Esto es, si se supone un valor para g de $9,80 \text{ m/s}^2$, el cual es un valor estándar para altas latitudes, no cercanas al Ecuador.

Para las latitudes venezolanas, este gradiente lo estimamos igual a 0.432 psi/ft , cuando se usan valores de gravedad teóricos comprendidos entre 970 cm/s^2 y 978 cm/s^2 , como se mostró en la sección anterior. El cálculo involucrado para llevar el gradiente de presión a PSI es el siguiente,

$$\frac{dp}{dz} = 10^3 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot g \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = g \cdot 10^3 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right) \quad (4.5)$$

donde $\rho_f = 10^3 \text{ Kg/m}^3$ es la densidad del agua.

Si se sustituyen los cambios necesarios para llevar al Sistema Inglés obtenemos,

$$\frac{dp}{dz} = g = \frac{9.81 \cdot N}{\text{m} \cdot \text{m}^2} \cdot \frac{1 \text{ kgf}}{9.81 \cdot N} \cdot \frac{2.204623 \cdot \text{lb}_f}{1 \cdot \text{kgf}} \cdot \frac{1 \cdot \text{m}}{3.2808 \cdot \text{ft}} \cdot \frac{(2.54 \times 10^{-2})^2 \cdot \text{m}^2}{\text{pu lg}^2} \times 10^3 \quad (4.6)$$

simplificado,

$$\frac{dp}{dz} = \frac{g_{\text{obs}}}{10^5} \cdot \frac{2.204623 \cdot 0.3048 \cdot 2.54^2}{98.0665} \quad (4.7)$$

Donde el valor de $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ es el denominador, es un valor promedio internacional correspondiente a una latitud de 45° aproximadamente.

realizando las operaciones necesarias, la ecuación se 4.7 se transforma en:

$$\frac{dp}{dz} = 0.433 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \quad (4.8)$$

donde g_{obs} representa la gravedad observada en miligales, a una latitud arbitraria. El valor de la gravedad teórica, para una latitud igual a 9° , correspondiente a Venezuela

es de 978120,00 miligales aproximadamente. Si sustituimos, este valor en la ecuación (4.7), obtenemos un gradiente de:

$$\frac{dp}{dz} = 0.432 \frac{psi}{ft}$$

El valor de 0.432 psi/ft es el correspondiente al gradiente de presión de poros en Venezuela.

4.3 - Variación del gradiente de presión de poros y el esfuerzo vertical con la latitud a nivel global.

El esfuerzo vertical σ_v , al igual que la presión de poros P_p , depende del valor de la gravedad, g , en la latitud φ considerada. Por lo que para estimar σ_v , se debe usar la formula:

$$\sigma_v(x) = \int_0^z \rho_b g dz \quad \longrightarrow \quad \sigma_v(z, \varphi) = \int_0^z \rho_b(z) g(z, \varphi) dz \rho_b \quad (4.9)$$

La cual considera una gravedad variable con la latitud y la profundidad. ρ_b Ahora corresponde a la densidad de la roca saturada. Si se supone ρ_b y g independientes de la profundidad, el esfuerzo vertical se puede estimar como,

$$\sigma_v(z) = \rho_b g z \quad \sigma_v(z) = \rho_b g(\varphi) z \quad (4.10)$$

La Tabla 4.2 muestra la variación de la presión de poros, el esfuerzo vertical y el gradiente de presión de poros para varias gravedades teóricas que varían con la latitud. Para este cálculo se supone una profundidad Z constante de 20.000 pies. Para el cálculo de la presión de poros P_p , y el gradiente de presión de poros se utilizan preferiblemente las gravedades teóricas. En estos cálculos se utiliza la gravedad

teórica en vez de la observada, para evitar variaciones debidas a efectos geológicos locales. Para el cálculo de la gravedad teórica se usó el elipsoide de 1.980. Para el cálculo del esfuerzo vertical se supuso una densidad de roca constante $\rho_b = 2.3 \text{ g/cc}$, y para la presión de poro una densidad de fluido $\rho_f = 1 \text{ g/cc}$

Tabla 4.2 Gradiente y Presión Normal.

Latitud (grados)	Geoid. 1980 g(ϕ) (miligal)	Gradiente de presión de poros	Presion de Poro $\rho=1 \text{ g/cc}$	Presión Litostática $\sigma_v \quad \rho=2.3 \text{ g/cc}$
90	983218.637	0,43466	8693,13	20863,51
80	983061.588	0,43459	8691,74	20860,18
70	982609.619	0,43439	8687,74	20850,59
60	981917.838	0,43408	8681,63	20835,91
50	981070.356	0,43371	8674,14	20817,93
40	980169.829	0,43331	8666,17	20798,82
30	979324.870	0,43294	8658,70	20780,89
20	978636.953	0,43263	8652,62	20766,29
10	978188.383	0,43243	8648,65	20756,77
0	978032.677	0,43236	8647,28	20753,47

Para las latitudes 10°N. y 40°N correspondientes a Venezuela y México respectivamente, se observa un cambio en el gradiente de presión de poros de unos 0.00088 psi /ft, que es el equivalente a una variación de 0.02 miligales en la gravedad teórica. Lo cual corresponde a un cambio de 17.52 (psi) en presión de poro. El valor de 17.52 psi sería el error cometido en la estimación de la presión de poro, mientras que el erro cometido en el esfuerzo vertical sería de 42.05 psi. Si se usa un gradiente para Venezuela de 0.433 psi/ft. en vez de 0.432 psi/ft.

En la Figura 4.2 se muestra gráficamente la variación del gradiente de presión de poro y la presión normal con la latitud. La variación máxima en la presión de poros es de aproximadamente 45,55 psi, esto es entre el Ecuador a 0° y el polo a 90°. Mientras que la variación del gradiente es de unos 0.0023 psi/ft. Partiendo de un valor en el ecuador de 0.4324 psi/ft hasta llegar a los polos con un valor de 0.4347 psi/ft.

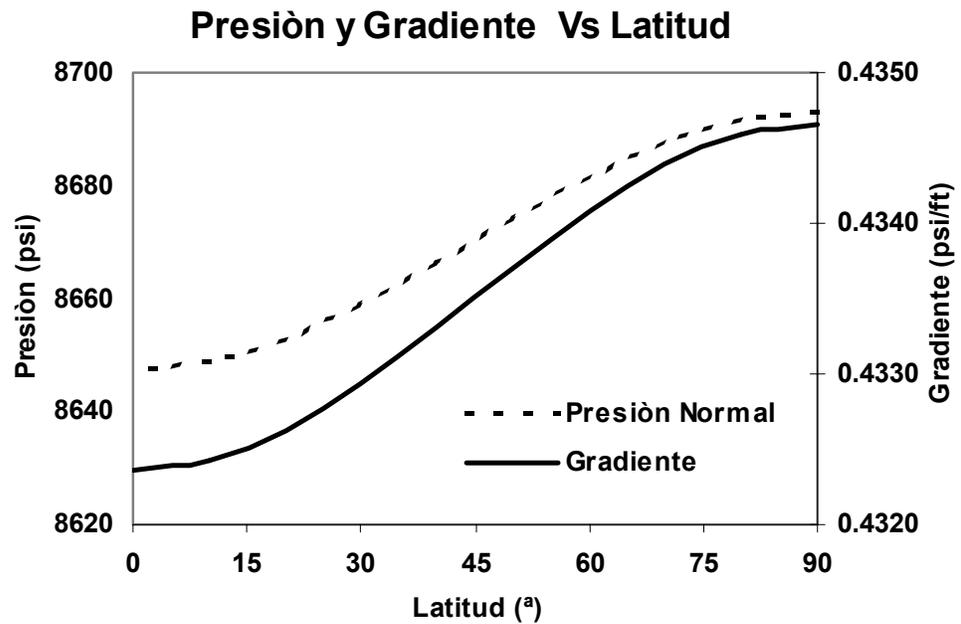


Figura 4.2. Curva de la variación del gradiente de presión y presión normal vs .latitud, entre 0° y 90°.

4.4.- Variación de la gravedad teórica con la latitud en Venezuela.

En la Figura 4.3 se muestra el mapa de gravedad teórica entre las latitudes 0° y 14°N y las longitudes 55W a 74W , correspondientes a la región venezolana.

Para la generación del mapa se usó la fórmula de gravedad correspondiente al elipsoide de 1967. Nótese que de 0° a 14° de latitud, se observa una variación de 310 miligales. Las líneas de isogravedades están separadas a intervalos de 0.005 miligales.

En la Figura 4.3, los valores de gravedad teórica pueden ser obtenidos en miligales, si se le suma el valor de 978000 miligales a las unidades mostradas en el mapa.

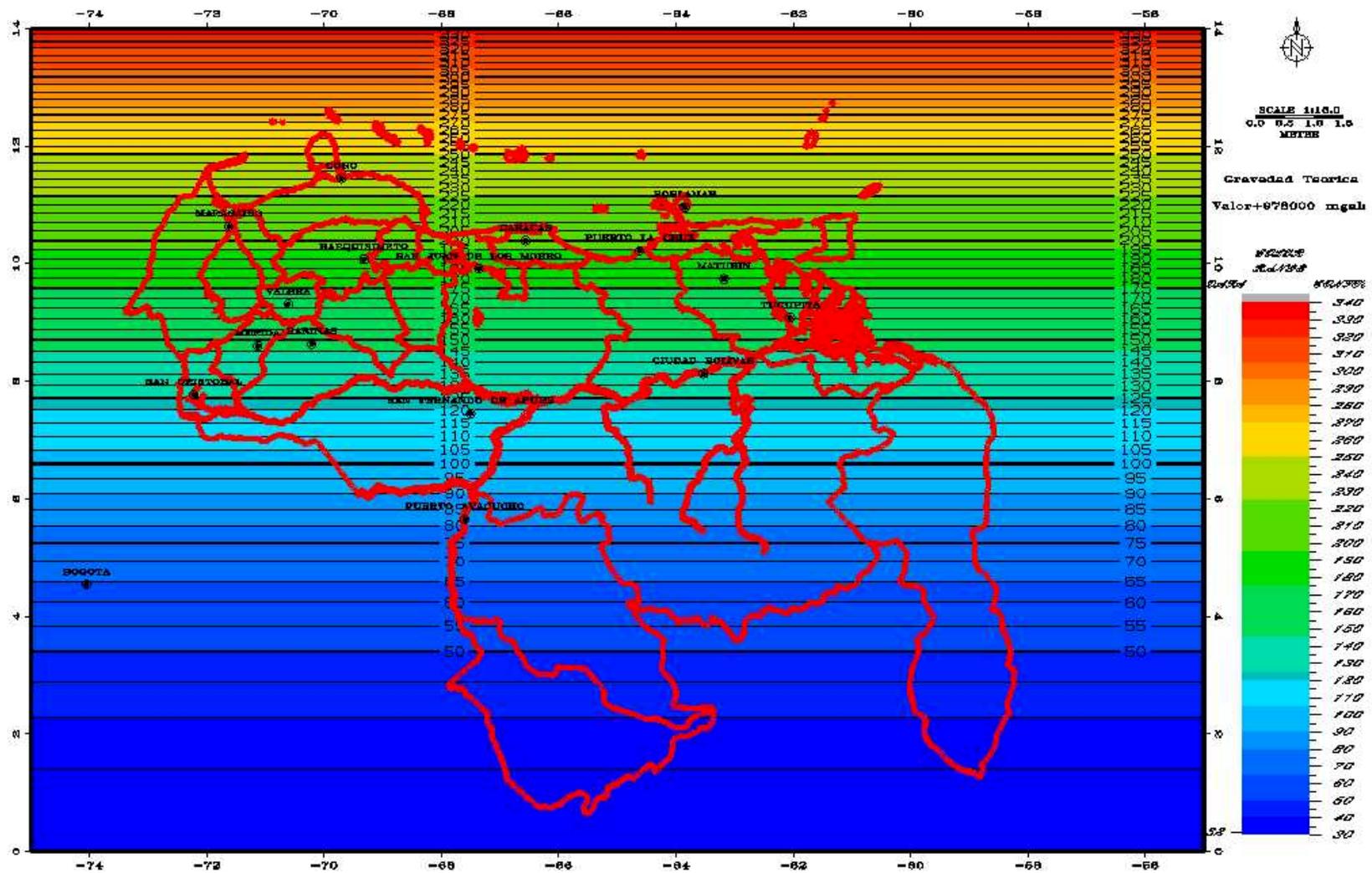


Figura 4.3 Mapa de las variaciones de la gravedad teórica para diversas latitudes en Venezuela.

4.5.- Mapa de gravedades observadas de Venezuela.

En la Figura 4.4 se muestra el mapa de gravedades absolutas, a partir de observaciones realizadas en el territorio nacional venezolano.

Este mapa fue generado con valores de gravedad tomados de diversos levantamientos gravimétricos. Entre estos se encuentran datos adquiridos por las siguientes Instituciones:

- Ministerio de Energía y Minas: Instituto Nacional de Geología y Minería.
- Ministerio de la defensa: Oficina Coordinadora de Hidrografía y Navegación.
- Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales: C.A. Hidrológica de Venezuela (Hidroven) e Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar.
- Universidad Central de Venezuela y Universidad Simón Bolívar.
- PDVSA-INTEVEP.
- PDVSA-Exploración.

Todas estas instituciones colaboraron en la adquisición de datos gravimétricos a nivel nacional y en la creación de una red o base de datos para la industria petrolera nacional.

Algunas zonas de Venezuela no fueron cubiertas por los levantamientos; se tienen datos incluso foraneos.de Perijá y los llanos de Apure además de algunas zonas del Amazonas y Estado Bolívar . No cuentan con datos gravimétricos.

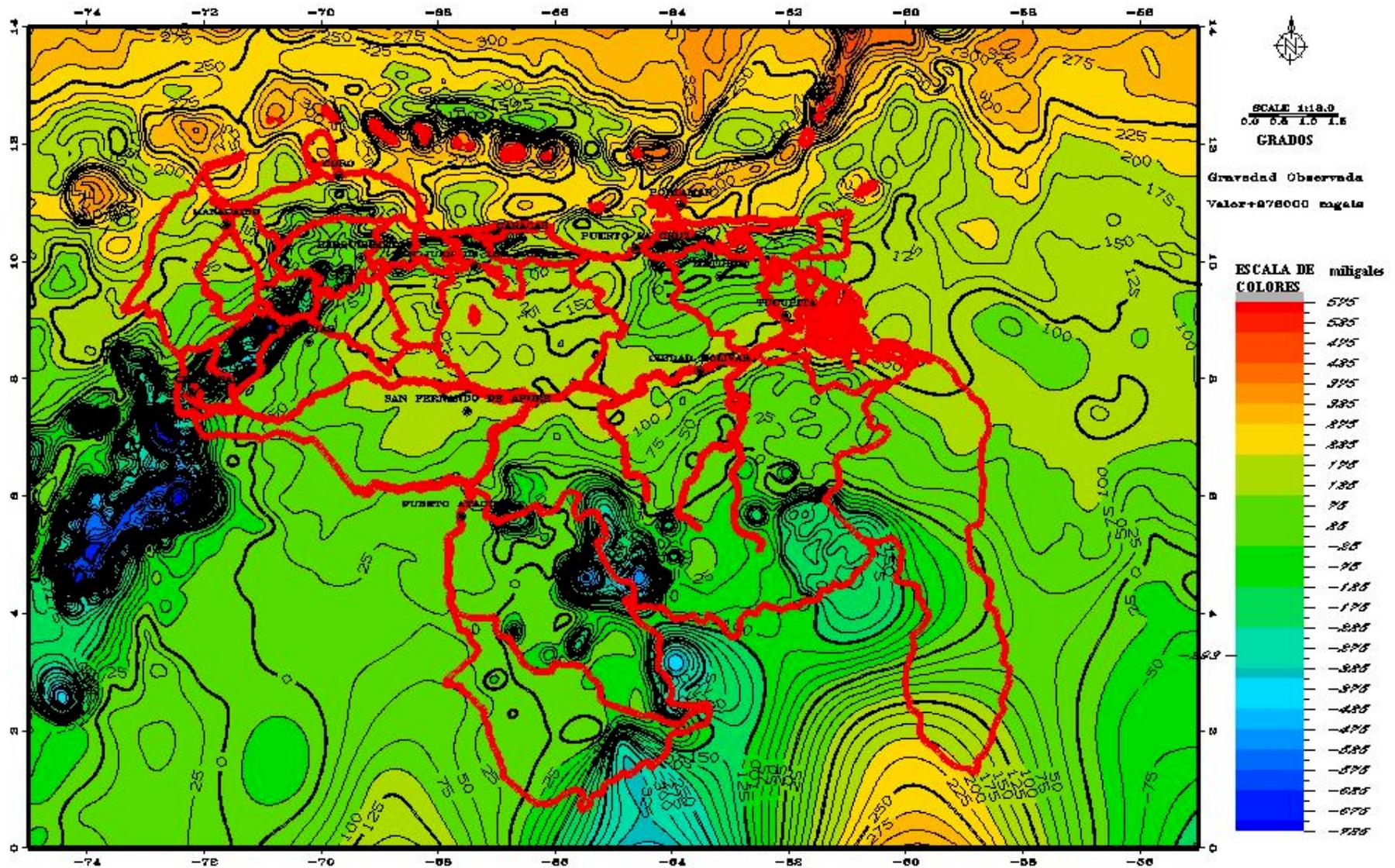


Figura 4.4 Mapa de gravedades observadas en Venezuela

4.6.-Gradientes de presión de poros en Venezuela.

El cálculo del gradiente se realizó a partir de las gravedades teóricas, determinadas entre las latitudes 0° a 16° y las longitudes -67.5 hasta -73° correspondientes a las coordenadas de Venezuela. En la Figura 4.5, se muestra el mapa de gradientes de presión hidrostática en Venezuela. Obsérvese que la variación de gradientes. Ocurre solo en la cuarta cifra decimal. Al Sur el mínimo valor de gradiente teórico es de 0.4323 psi/ft. y al Norte es de 0.4325 psi/ft. Ya que la región de interés petrolífero esta comprendida al Norte del Orinoco y al Sur de las islas meridionales de Venezuela, los valores apropiados de gradientes a utilizar, estarían comprendidos entre: 0.43246 psi/ft. y 0.43240 psi/ft, al Norte y al Sur respectivamente. Para la construcción del proyecto usan las gravedades teóricas en vez de las observadas, para evitar los efectos geológicos locales. Este mapa se obtuvo a partir del mapa de gravedades teóricas. La conversión se obtiene a través de la multiplicación de la gravedad teórica por una constante que convierte g en unidades del sistema ingles y obtener gradientes en unidades de psi/ft.

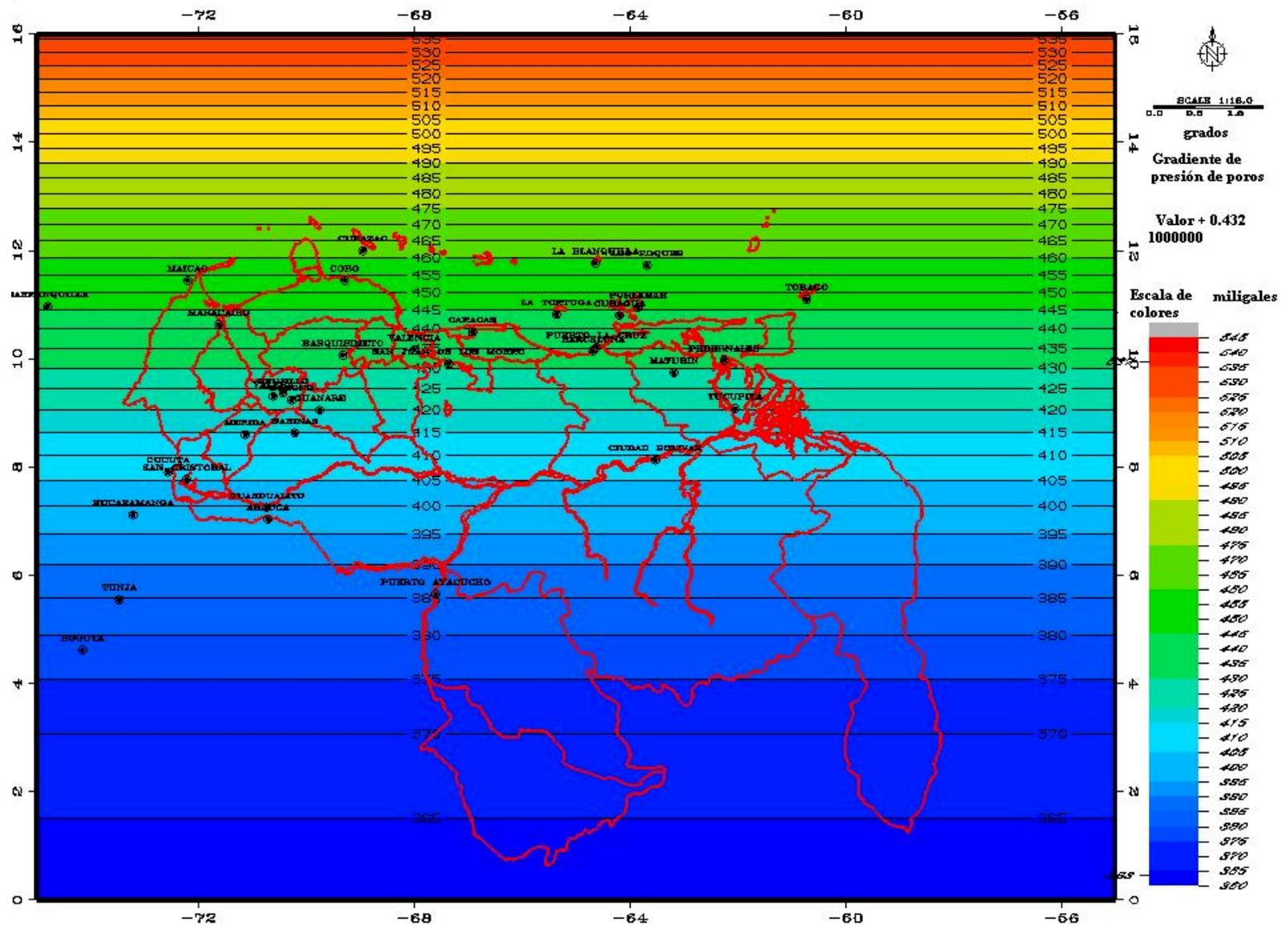


Figura 4.5 Mapa de gradiente de presión de poros

4.7 Variación del gradiente de presión de poros en Cuencas de Venezuela.

En Venezuela, en muchos estados se usa generalmente, el valor de 0.433 psi/ft. Como gradiente de presión de poro (P_p) Sin embargo, hemos observado en este trabajo, que el gradiente más adecuado es el de 0.432 psi/ft.

En la Tabla 4.3 se muestran los valores de gradiente de P_p . más apropiado para varias regiones del País. También se indica el valor promedio de gravedades observadas en las Cuencas y regiones de más interés en el País. Obsérvese que la variación del gradiente ocurre solo en el 4to. decimal.

Tabla 4.3 Clasificación del gradiente por cuencas:

latitud (grados)	Gravedad obs (m/s^2)	Gravedad teor (m/s^2)	Cuenca	Valor del gradiente (PSI/FT)
8° - 10°	9.78075	9.78170	Oriente	0.4324
9° - 10° 30'	9.78325	9.78200	Lago de Maracaibo	0.4325
6°30' - 8° 30'	9.78050	9.78150	Apúre	0.4324
9° - 11°	9.77325	9.78180	Perijá	0.4321

También se puede notar en Perija un valor anómalo entre la gravedad teórica arrojada por el modelo y la observada. En el modelo es de $9,78180 m/s^2$ mientras que la observada es de 9.77325 . Esto puede ser causado a posibles errores de medición o significantes contrastes de densidades locales.

Finalmente en la Figura 4.6 se propone una división del País en 3 zonas, en las cuales se puede usar un gradiente constante cuyo valor es 0.432 psi/ft.

Como el gradiente toma un valor casi constante de 0.432 psi/ft, nada más se observa variación en el orden de la cuarta cifra decimal, para los distintos valores observados. Los cuales pueden ser visualizados enteramente a través del mapa de la Figura 4.6



Figura 4.6 Zonificación de Gradientes de presión de poros en Cuencas Petrolíferas de Venezuela.

Este mapa se construye a partir del mapa de las gravedades teóricas (Figura 4.3), se toma el valor correspondiente a cada latitud se multiplica por la constante proveniente de la conversión de las unidades al sistema ingles (Ec 4.7) donde g_{obs} representa el valor teórico mostrado en el mapa de la Figura 4.3.

Esta es la razón por la cual el mapa de gradientes de presión de poros posee tendencias lineales ya que proviene del mapa de gravedades teóricas y la relación con la constante es lineal.

CAPÍTULO V

5.- EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA GRAVEDAD CON LA PROFUNDIDAD.

5.1.- Variación de la gravedad con la profundidad.

Así como la gravedad “g”, depende de la latitud, existe una dependencia también con la profundidad “z”. A medida que la distancia de la estación de observación al centro de la tierra disminuye, la gravedad aumenta. Si la medida se realiza en una montaña su valor disminuye y si se realiza en un pozo profundo su valor aumenta, ya que “g” es inversamente proporcional a la distancia del centro de la Tierra al punto de observación. En este Capítulo evaluaremos como es la variación de “g” con “z” y a su vez como una cierta variación en “g”, afecta las estimaciones de esfuerzos y presión de poros en la corteza.

Una buena estimación de los esfuerzos es indispensable para los estudios geomecánicos en pozos petroleros. Entre los estudios geomecánicos comunes están: la estabilidad de hoyos, problemas de subsidencia, arenamiento del yacimiento, perforaciones verticales u horizontales, fracturamiento hidráulico, etc. En este Capítulo se usarán los datos de pozo provenientes de un pozo del Estado Anzoátegui, en el cual se conoce la variación de la densidad con la profundidad, $\rho(z)$.

En la Figura 5.1 se muestra un ejemplo esquemático de columna sedimentaria con los intervalos de densidad constante y variable.

5.2.- Construcción del Registro de Densidad y de Velocidades P y S desde la superficie.

Adicionalmente a la necesidad de conocer un gradiente específico, para una latitud local, para determinar la dependencia de g con la profundidad, se requiere conocer la variación de la densidad de la misma.

La estimación de $g(z)$, requiere del conocimiento previo de $\rho(z)$. Una vez obtenido $g(\rho(z), z)$ entonces el siguiente paso en el estudio, es el determinar que efecto tienen estas variaciones observadas sobre las presiones de poro y esfuerzos “In Situ”. Una vez determinados los esfuerzos “In Situ”. estos son usados para cálculos geomecánicos.

Para los cálculos geomecánicos, a veces es necesario conocer las propiedades elásticas de la roca atravesada por el pozo, desde la superficie hasta la profundidad. Sin embargo generalmente para estimar las propiedades elásticas se requiere conocer las velocidades de las ondas P, S y la densidad, pero estas propiedades en general, solo se conocen en la zona ó intervalo de interés. Por lo que es necesario elaborar métodos para construir registros en toda la columna, a partir de la combinación de datos provenientes de diferentes fuentes, tales como: 1) datos de densidades volumétricas y de grano de muestras de canal, 2) velocidades de onda P- VSP, 3) velocidades sísmicas de onda P y S, y 4) velocidades de ondas P obtenidas a partir de sísmica de superficie, entre otros (Ruiz, 2000).

Si no se dispone, por ejemplo, de registros de densidad, es necesario estimarla a partir de datos de velocidad sísmica provenientes de registros sísmicos o sísmicos de superficie usando por ejemplo la fórmula de Gardner o correlaciones.

5.3.- Variación de la densidad “In Situ” con la profundidad.

Para determinar la presión producida por una columna de fluido, suponiendo que el fluido es agua, de densidad constante $\rho_a = 1 \text{ g/cc}$ se usa la ecuación 4.1.

Si se supone que la gravedad y la densidad son constantes, o sea que varían con la profundidad, la fórmula a usar es :

$$P(z) = g z \rho_a = gz \quad (5.1)$$

El esfuerzo vertical σ_v , el cual esta producido por el peso de toda la columna de roca, sobre el punto Z, se determina mediante la ecuación 4.9.

Si medimos la densidad usando un gravímetro a diferentes profundidades a lo largo de un pozo, la misma se determina mediante la fórmula

$$\rho_R = 3.6827 - 0.03913 \frac{\Delta g}{\Delta z} \quad (5.2)$$

donde 3.6827 representa la constante debida a la inhomogeneidad del medio en el cual esta midiéndose la densidad, 0.03913 es la variación de la gravedad con la altura y ρ_R representa la densidad de la roca

Si agrupamos términos, tenemos que,

$$\Delta z \rho_R = 3.6827 \Delta z - 0.03913 \Delta g \quad (5.3)$$

si despejamos Δg ,

$$\frac{\Delta z \rho_R - 3.6827 \Delta z}{0.03913} = -\Delta g = g_1 - g_o \quad (5.4)$$

Ag representa la diferencia entre las gravedades medidas en dos estaciones a diferentes profundidades Z_1 y Z_0 . g_1 es la gravedad medida en la estación Z_1 y g_0 la gravedad medida en la boca del pozo, por ejemplo.

Si despejamos g_1 ,

$$g_o + \frac{3.6827\Delta z - \rho_R \Delta z}{0.03913} = g_1 \quad (5.5)$$

Si medimos en estación sucesivas $g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$ usando g_0 en la boca del pozo como referencia se obtiene,

$$\Delta g_n = g_o + \left(\frac{3.6827 - \rho_{R1}}{0.03913} \right) \Delta z + \left(\frac{3.6827 - \rho_{R2}}{0.03913} \right) \Delta z + \dots \quad (5.6)$$

Obsérvese que en cada término, aparece ρ_{Ri} , o sea la densidad correspondiente a cada intervalo.

Finalmente obtenemos la fórmula general para la variación en g , con z ,

$$g = g_o + \Delta z \sum_{i=1}^N \frac{3.6827 - \rho_i(z)}{0.03913} \quad (5.7)$$

Para estimar la presión de poro P_p y el esfuerzo vertical σ_v , se introduce la ecuación (5.7) en las ecuaciones 4.1 y 4.9, obteniendo las siguientes expresiones:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_p(z) = \int_0^{z'} \left(g_o + \frac{3.6827\Delta z - \rho_R(z)\Delta z}{0.03913} \right) \rho_a(z) dz \\ \sigma_v = \int_0^{z'} \left(g_o + \frac{3.6827\Delta z - \rho_R(z)\Delta z}{0.03913} \right) \rho_R(z) dz \end{array} \right. \quad (5.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_p(z) = \int_0^{z'} \left(g_o + \frac{3.6827\Delta z - \rho_R(z)\Delta z}{0.03913} \right) \rho_a(z) dz \\ \sigma_v = \int_0^{z'} \left(g_o + \frac{3.6827\Delta z - \rho_R(z)\Delta z}{0.03913} \right) \rho_R(z) dz \end{array} \right. \quad (5.9)$$

Donde Z' es la profundidad final del pozo, hasta donde se siguen calculando P_p y σ_v , ordenando se obtiene,

$$\begin{cases} P_p(z) = \int_0^{z'} \left[\left(g_o + \frac{3.6827 \Delta z}{0.03913} \right) \rho_a(z) - \frac{\rho_R(z) \rho_a(z) \Delta z}{0.03913} \right] dz \\ \sigma_v = \int_0^{z'} \left[\left(g_o + \frac{3.6827 \Delta z}{0.03913} \right) \rho_R(z) - \frac{\rho_R^2(z) \Delta z}{0.03913} \right] dz \end{cases}$$

En resumen:

Se tiene una ecuación para la presión de poros y dos casos cuando la gravedad es constante y cuando es variable, como la densidad es siempre uno por que se trata del fluido agua tenemos:

Caso 1 gravedad, constante. y $\rho=1$ $P_p = g z \rho_a = gz$

Caso 2 gravedad, variable y $\rho=1$ $P_p = \rho_a \int_0^z g(z) dz$

Para el caso del esfuerzo vertical, $\sigma_v(z)$ se tienen también dos casos, el caso 1 con gravedad constante y densidad variable.

Caso 1 gravedad, constante. y ρ variable $\sigma_v = g \int_0^z \rho_R(z) dz$

Y el caso 2 con profundidad variable y densidad variable

Caso 2 g y ρ variables $\sigma_v = \int_0^z g(z) \rho_R(z) dz$

Para la estimación del esfuerzo horizontal, σ_h se usa la siguiente relación:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v = \frac{\nu}{1-\nu} \int \left[(g_o + \frac{3.6827 \Delta z}{0.03913} \rho_R(z) - \rho_R^2 \frac{\Delta z}{0.03913}) \right] dz \dots(5.3)$$

Para determinar el esfuerzo efectivo, $\sigma_e(z)$ que sienta los granos de la roca, se puede usar la siguiente relación,

$$\sigma_e = \left(\frac{\sigma_v + 2\sigma_h}{3} \right) - \alpha P_p$$

donde α es conocido como el factor de Biot.

El esfuerzo horizontal σ_h depende de la litología local en cada profundidad. Esta variación debe ser vista a través de la variación de $\nu(z)$. Sin embargo para los propósitos de este trabajo las variaciones de σ_h con la litología no era parte de nuestro objetivo, por lo que se supone un modulo de Poisson constante igual a $\nu: 0,25$ en todo el intervalo estudiado. Esto, simplifica la interpretación y la determinación del efecto cuando se considera g variando con z únicamente.

La Figura 5.2 nos da una idea de la variación en profundidad de los esfuerzos verticales, horizontales y el esfuerzo efectivo. La tendencia en el incremento de los esfuerzos, es aparentemente lineal a medida que se profundiza en el pozo. Es lógico que esto suceda a lo largo del pozo.

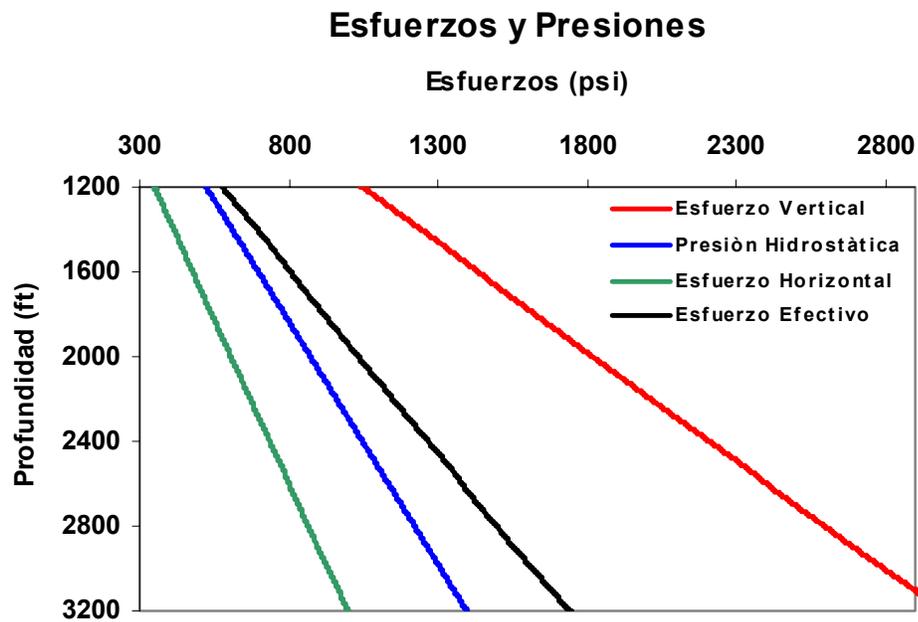


Figura 5.2. Régimen de esfuerzos a lo largo del pozo.

También podemos observar en la Figura 5.2, la curva de presión Hidrostática, la cual corresponde con el caso 1 anteriormente descrito, se construyó esta curva suponiendo

una densidad constante $\rho=1$ y g constante. Esta tendencia no difiere mucho del caso 2 para las presiones de poros en donde ρ es variable.

En cuanto al esfuerzo Vertical la Figura 5.2 muestra el caso 1 esto es cuando la densidad es variable y la gravedad es constante. El esfuerzo vertical muestra una variación mucho mayor que la mostrada por la presión de poros.

Para estimar la variación de $g(z)$ con la profundidad, se parte de suponer un valor, de gravedad absoluta, g_0 , medido en la superficie o boca del pozo. En la Figura 5.3 se muestra la gráfica de la variación de la gravedad a medida que se profundiza en un pozo. Obsérvese que en un intervalo de 2000 pies la variación es de aproximadamente 70 miligales.

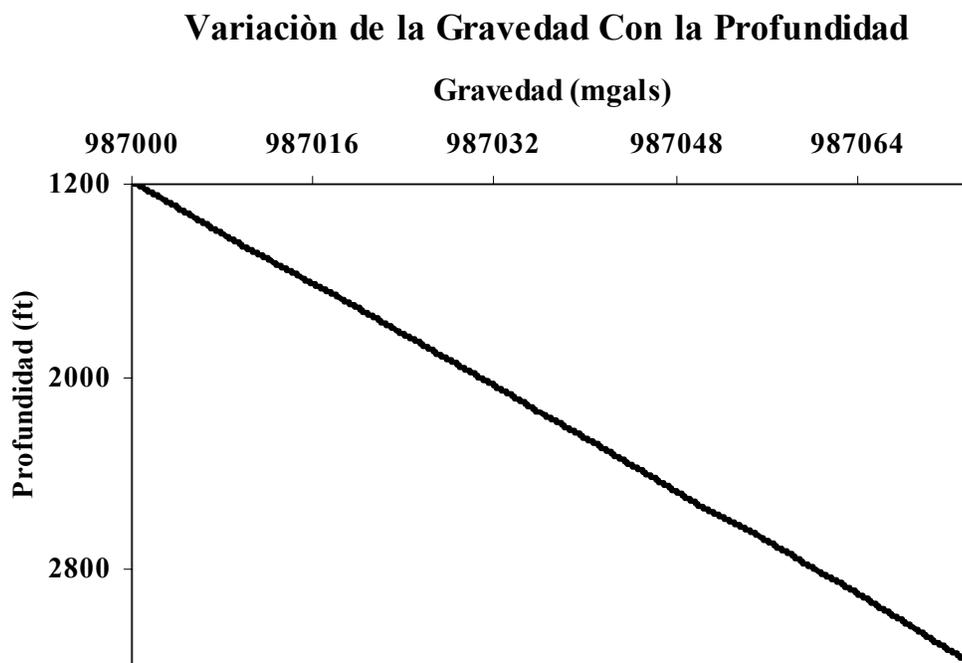


Figura 5.3 Gráfica de la variación de la gravedad a medida que se profundiza en un pozo.

En la Figura 5.4 se muestra la diferencia entre el esfuerzo vertical, si se determina usando gravedad variable, menos el esfuerzo vertical determinado usando gravedad constante. Obsérvese que esta diferencia aumenta con la profundidad. El valor máximo observado en un intervalo de 2000ft es de tan solo 0.07 psi.

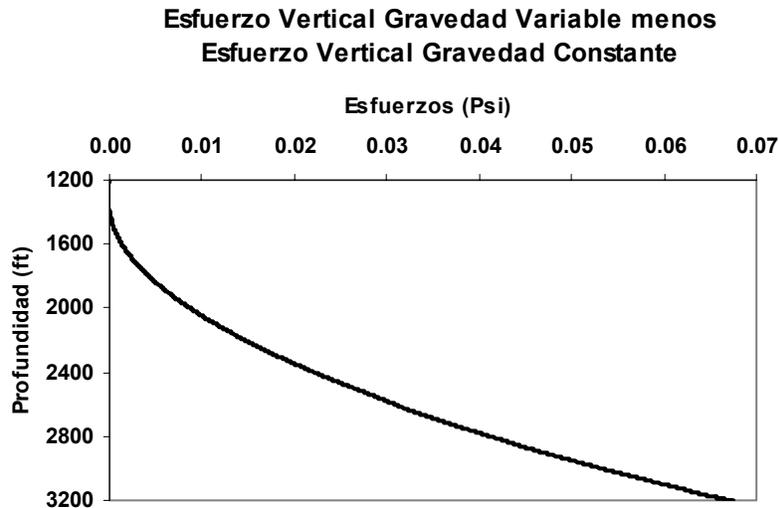


Figura 5.4 Diferencia entre el esfuerzo vertical usando gravedad variable, $g(z)$, menos el esfuerzo vertical usando gravedad constante.

Un error de 0.07 psi, en la estimación de σ_v , es muy pequeño inclusive menor que los posibles errores existentes en la determinación de la densidad usando gravedad de pozo. Esto sugiere que el considerar un valor constante para la gravedad a medida que se profundiza, es una muy buena aproximación, en lo que a estimación de esfuerzos se refiere.

En la Figura 5.5 se tiene la variación del gradiente de presión de poro con la profundidad. Se observa que la variación esta solo en el cuarto decimal. La variación desde 1200 pies a 3000 pies es de solo 0.00003 psi/ft

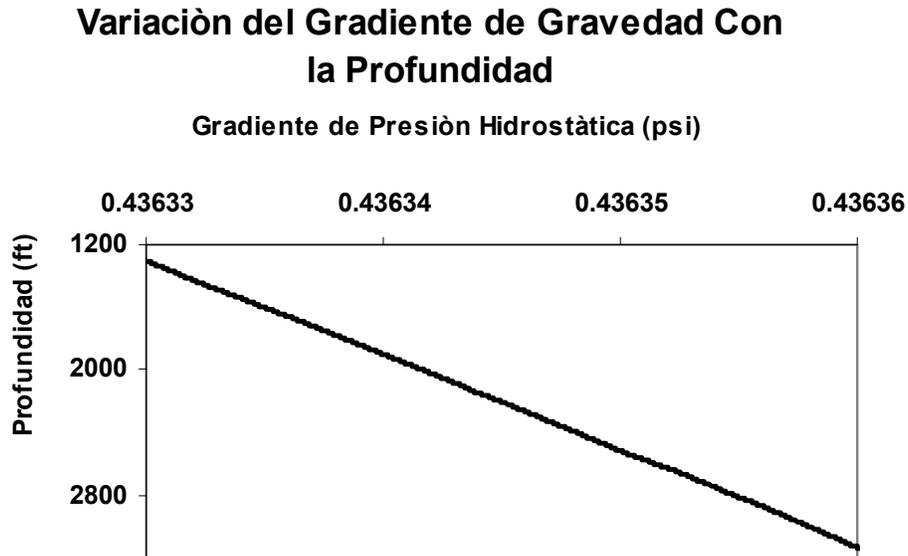


Figura 5.5 Variación del gradiente de presión hidrostática con la profundidad.

Obsérvese que el gradiente varía con la profundidad y no es constante. Su variación depende de la variación en $g(z)$, quien a su vez depende de los cuadrados de densidad $\rho(z)$.

CAPÍTULO VI

6.-EFECTO DE LAS VARIACIONES DE LA GRAVEDAD CON EL TIEMPO.

6.1.- Programas simuladores de mareas terrestres.

Para el estudio de la variación de la gravedad en el tiempo en diferentes latitudes, se generan registros sintéticos de mareas terrestres en ciertos periodos de tiempo. Para generar los registros sintéticos de predicción de mareas, se usaron dos programas, el ETGTAB y el MT80, ambos disponibles en la Web. Se generan señales sintéticas con ambos programas y se comparan con la finalidad de estudiar la confiabilidad en el uso de los mismos.

El ETGTAB es una rutina dentro de un paquete de programas llamado ETERNA. Todas las rutinas del ETERNA son programas de análisis de mareas terrestres. Este conjunto de programas fueron elaborados por Hanzel (1989) y disponibles en la dirección electrónica www.ksb.be/ICET/home.html, al igual que el programa MT80.

Los programas ETGTAB y EL MT80 son algoritmos generadores de registros sintéticos de mareas terrestres. Ambos se basan en modelos de deformación de la corteza terrestre, utilizando cálculos astronómicos de predicción de mareas terrestres basados en la fórmula de Longman (1948).

6.1.1.- Comparación entre los algoritmos del ETGTAB y MT80.

Se generó una señal sintética de 24 horas con el programa ETGTAB y otra con el MT80. El muestreo temporal, utilizado en la señal fue de 1 hora. En la Figura 6.1 se muestran las señales sintéticas obtenidas con ambos programas. Obsérvese que la correlación en fase es muy buena. En amplitud sólo se observa una pequeña diferencia en los mínimos de la señal. Con lo que se puede concluir que ambos programas son confiables, para el objetivo de esta tesis.

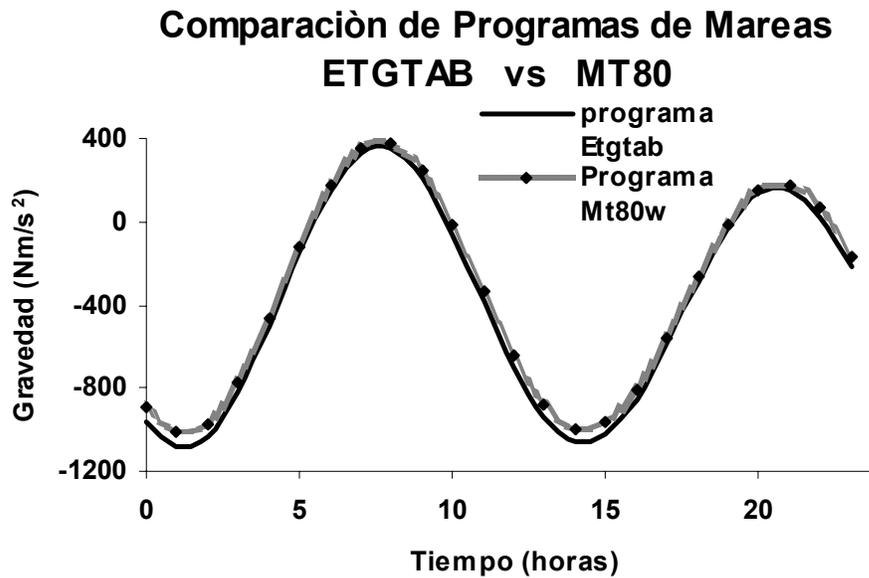


Figura 6.1 Comparación de mareas terrestres sintéticas, utilizando el programa ETGTAB y el MT80.

Para continuar con el estudio de confiabilidad del ETGTAB, se comparan señales a diferentes longitudes, pero dejando la latitud fija.

En la Figura 6.2 se muestran tres señales sintéticas de 24 h cada una y a un mismo muestreo temporal. Las tres señales corresponden a un mismo intervalo de tiempo pero a diferentes longitudes y todas a latitud cero. Obsérvese que lo que cambia es la fase como se esperaba, pero la variación en amplitud es la misma. Los máximos están en desfase de 90 grados tienen una diferencia entre ellos de 6 horas, es decir que cuando hay marea alta para un sitio al amanecer a 90° de longitud, es decir a 6 horas de allí, existe una marea baja.

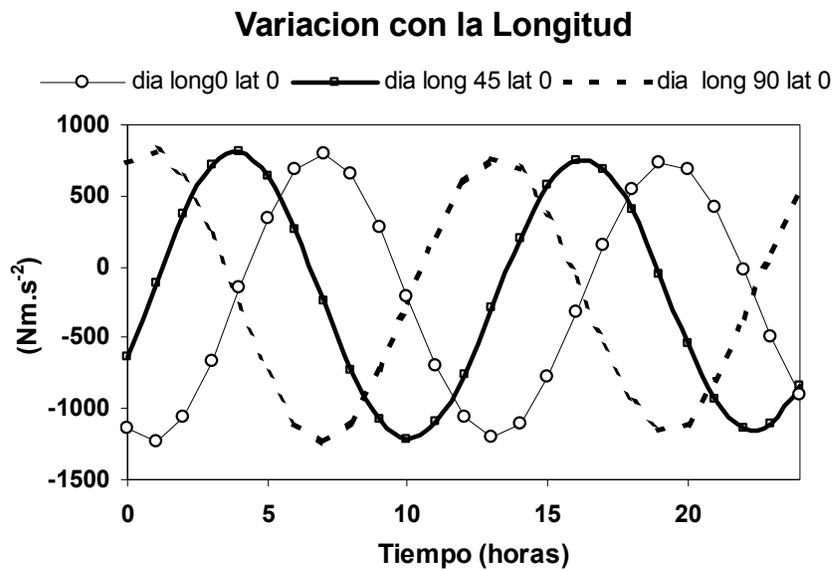


Figura 6.2 Marea Sintética generada con el programa ETGTAB para distintas longitudes y latitudes fija e igual a 0° .

6.1.2.- Componentes de marea consideradas en el ETGTAB.

Las señales sintéticas generadas por ambos programas ETGTAB y MT80 son la superposición de varios componentes de mareas. Cada una de estas componentes es causada por las diferentes orbitas y fenómenos físicos de los astros que intervienen. En el capítulo III, la Tabla 3.1 muestra algunas de las componentes de marea consideradas por el programa ETGTAB. En la Figura 6.3 se muestran componentes, su frecuencia y su amplitud. Obsérvese que las componentes de mayor amplitud son las M₂, S₂, N₂ y K₂ de las semidiurnas y las componentes K₁, O₁ y P₁ de las diurnas. De largo periodo la de más amplitud es la M_f.

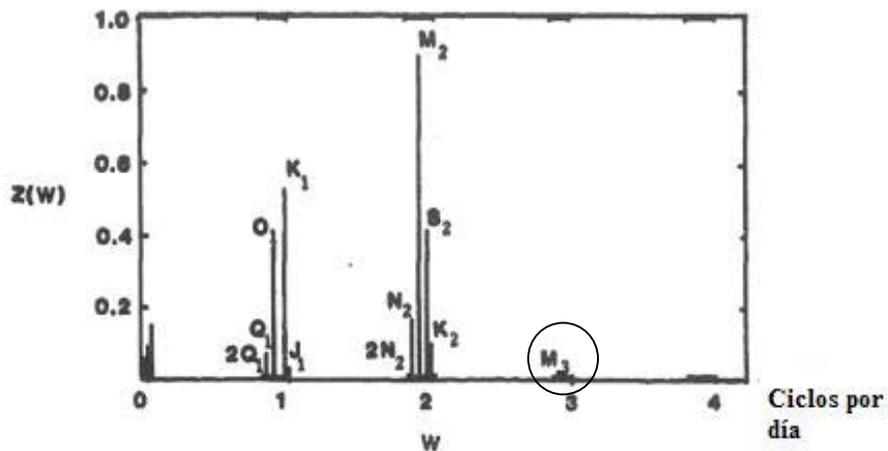


Figura 6.3 Componente de marea terrestre M₃.

En la Figura 6.3 se muestra una parte del espectro de Fourier con algunas de las componentes principales usadas por el programa de mareas terrestres, la cual expone la componente M₃. Componente está presente en la marea terrestre más no en la

marea oceánica. Si se desea ver con más detalles cuales son las componentes usadas por el programa ETGTAB. Ver el apéndice A.

6.1.3.- Comparación de datos reales con datos sintéticos.

La siguiente prueba de los programas de mareas sintéticas, consistió en la comparación de las señales teóricas con señales reales. Para ello se tomaron datos reales de medidas gravimétricas disponibles en la Web, los cuales fueron registrados con un gravímetro Lacoste y Romberg. El período de grabación fue de 1500 horas a un muestreo temporal de $\Delta t = 30\text{seg}$. Estos datos fueron adquiridos en el observatorio Henzel en Alemania.

Se escogió el ETGTAB, en vez del MT80 para esta prueba, por su mayor facilidad en la generación de las señales, sobre todo en que el muestreo temporal puede ser tan fino como se desee. En el MT80 el muestreo permitido es solo de 30 minutos.

En la Figura 6.4 se muestran los datos reales, medidos en el laboratorio Henzel (Alemania). Se puede observar el efecto de la deriva del gravímetro como una tendencia lineal, mientras las oscilaciones periódicas superpuestas a la tendencia lineal, son debidas a la marea. Para eliminar el efecto de la deriva instrumental y aislar sólo el efecto de marea se realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados y luego se le resta esta tendencia lineal a los datos.

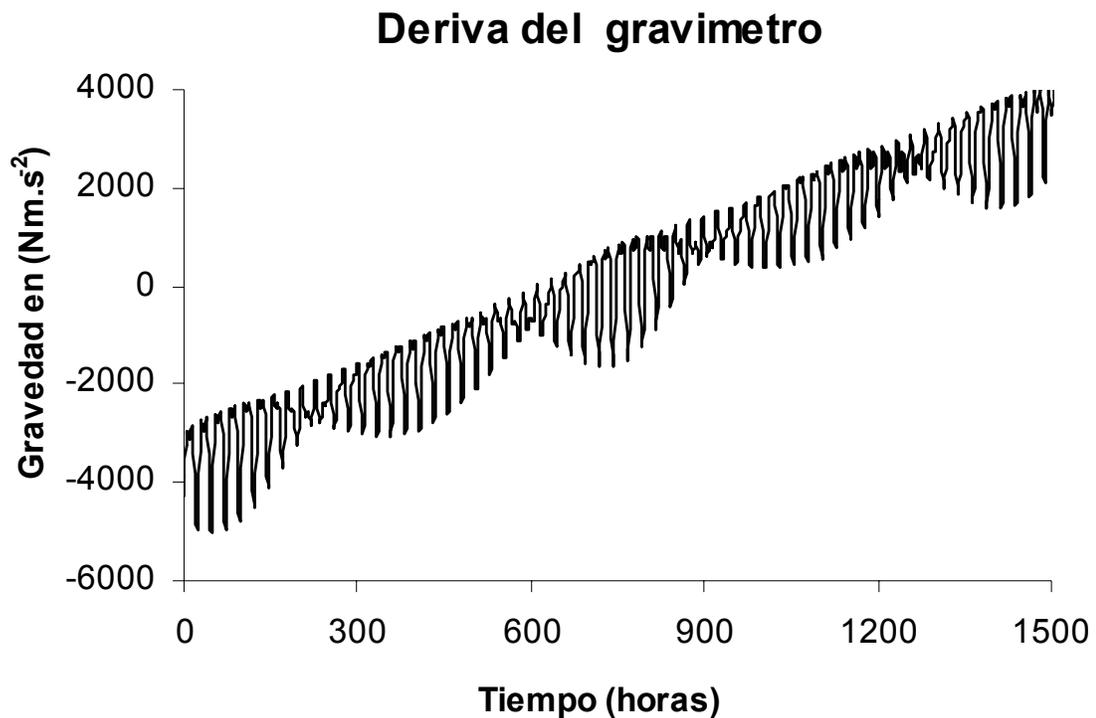


Figura 6.4 Diagrama de la curva de gravedad observada, durante dos meses, con un gravímetro Lacoste y Romber en el observatorio Henzel, Alemania.

Una vez sustraído la variación lineal, debido a la deriva, se comparan los datos reales con los sintéticos generados con el ETGTAB.

En la Figura 6.5 se muestra el registro sintético superpuesto al registro real sin el efecto de la deriva instrumental. Obsérvese las diferencias de amplitud entre una y otra curva. No se observa desfase entre la marea experimental y la real debido a que son medidas en la corteza y no en el mar, pero si existen diferencias en sus amplitudes.

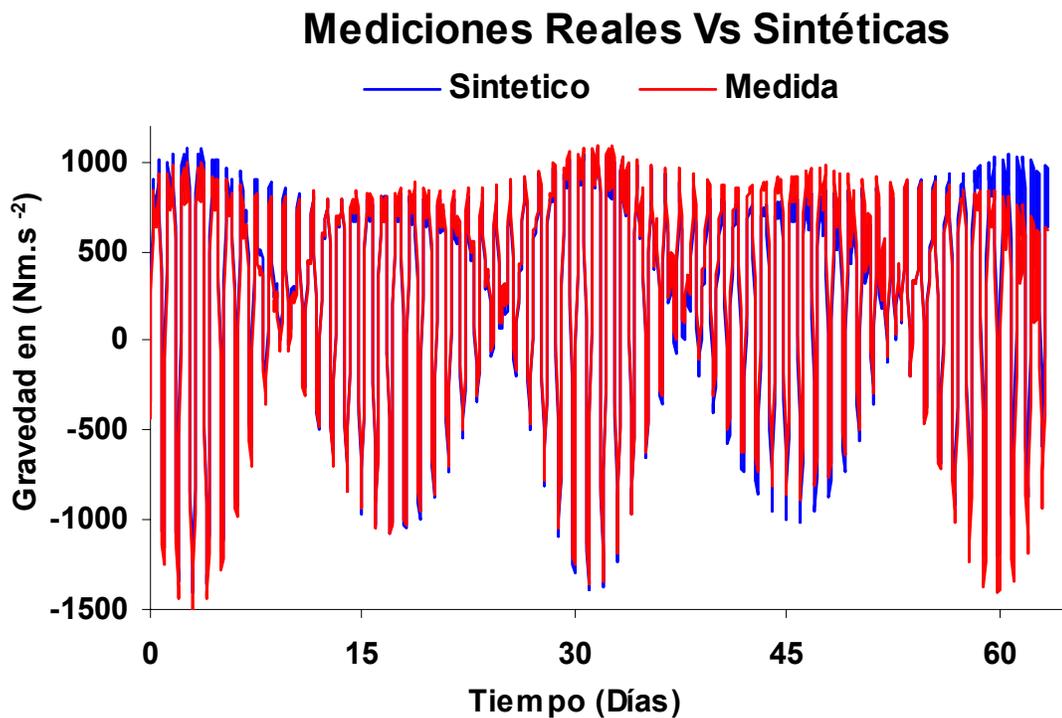


Figura 6.5. Gravedad real y Gravedad teórica en función del Tiempo.

En la Figura 6.6 se realiza un detalle de la curva de la Figura 6.5 en el intervalo comprendido entre 0 y 96 horas (4 días). De esta manera se pueden comparar los datos teóricos y sintéticos con más precisión. Se observan unas pequeñas diferencias en amplitud que pueden ser causadas por la remoción inadecuada del efecto de deriva instrumental. Sin embargo en la fase, la correlación es casi perfecta.

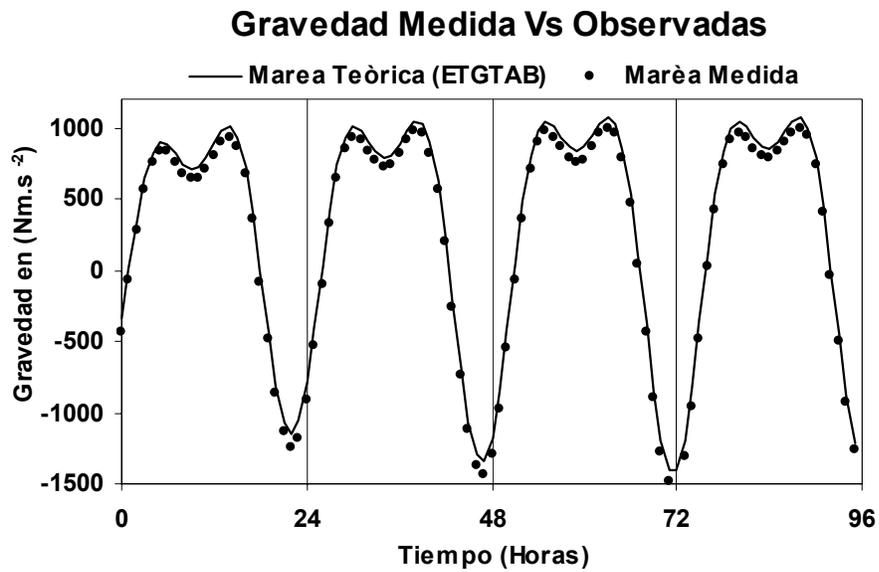


Figura 6.6 Detalle de la gravedad teòrica y sintética en función del tiempo.

6.2.- Ejemplo de predicción de mareas oceánicas observadas y sintéticas.

En la Figura 6.7 se muestra la comparación entre una señal medida en el mes de Junio de 1984, en una estación fija en el puerto de Amuay, Estado Falcón con un modelo matemático de predicción de altura de marea para ese sitio geográfico. Obsérvese que existe un desfase entre ambas señales. Esto es producto de que la medición real tiene un retardo con respecto a la señal del modelo. La causa de este retraso es el medio físico. En la señal producida por el modelo el fluido es ideal, por tanto la respuesta a la atracción gravitacional es instantánea. Mientras que en la real, la respuesta sufre un retardo debido a la inercia de las aguas o fricción con el fondo marino.

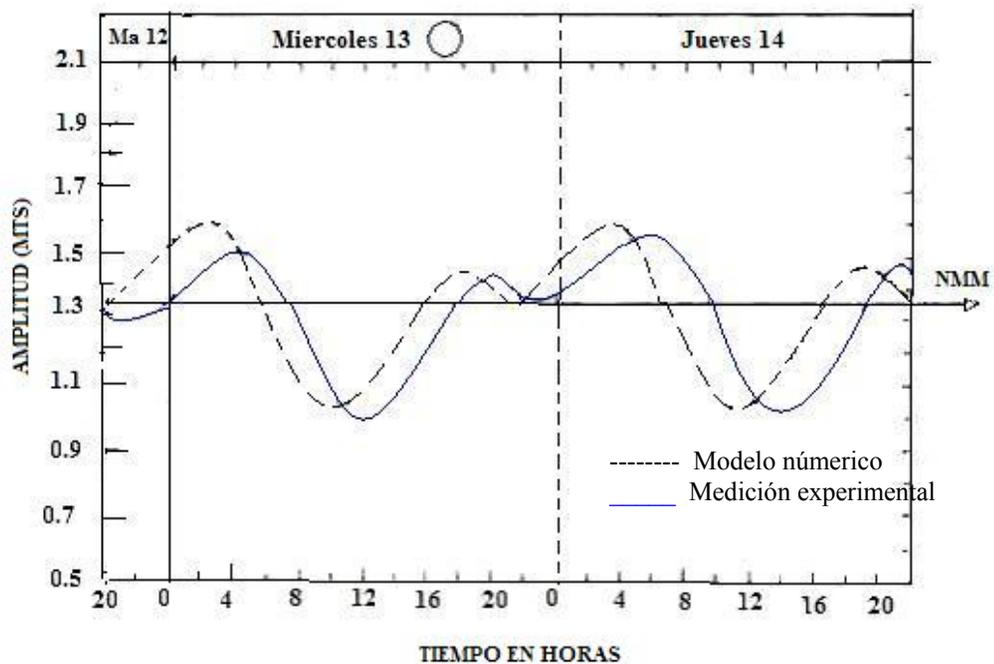


Figura 6.7 Curva de predicción de mareas oceánicas Puerto de Amuay.

Tanto el modelo matemático como la marea experimental estiman la altura en metros del Nivel medio del mar (NMM).

En el caso de mareas terrestres, como el de la Figura 6.5 no se observa desfase, debido a que la marea es sobre la corteza y no en un fluido. La relación en el mar es del tipo “fluido – fluido”. En el caso de un yacimiento de agua o petróleo, la relación es del tipo corteza – fluido.

6.3.- Variación de la Presión por el efecto de las mareas.

En la Figura 6.8 se muestra la conversión de datos de gravedad a datos de presión utilizando la ecuación 3.11.

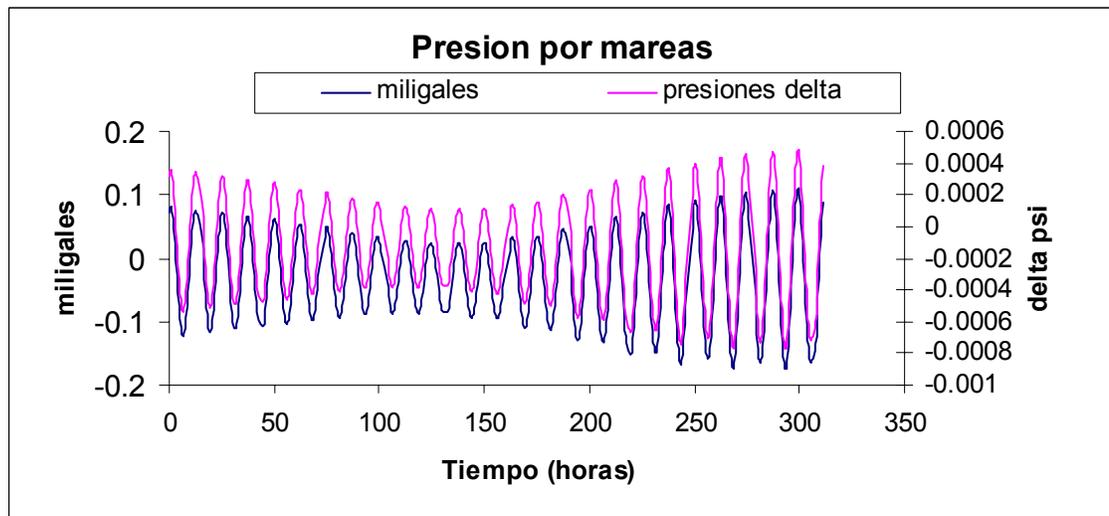


Figura 6.8 Comparación de datos de marea en unidades de gravedad y unidades de presión.

Este efecto sería el que se observaría en un yacimiento ideal, es decir donde la permeabilidad sea alta, ya que se espera que no exista ningún tipo de desfase entre la señal experimental (en morado) y la teórica (en azul) (Figura 6.8).

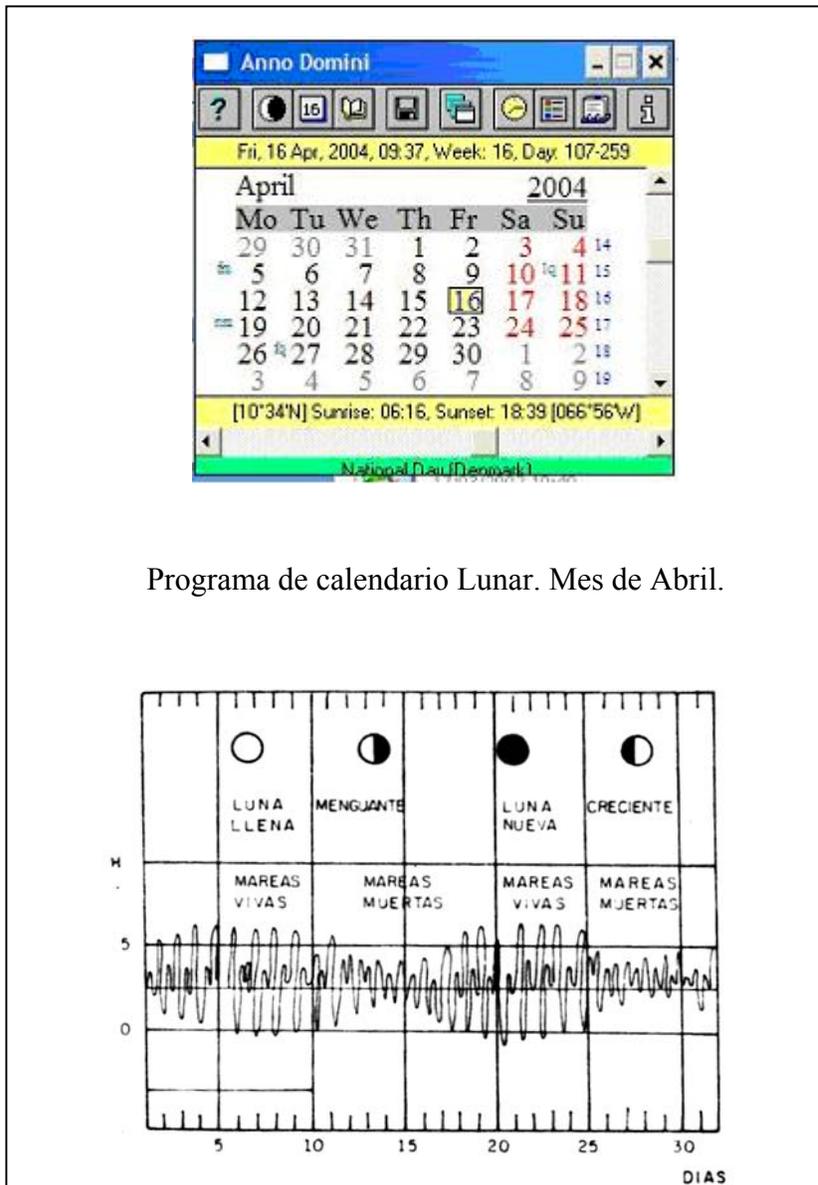
Si esta fuera la idealización de la respuesta de presión de un yacimiento, se podría decir que el yacimiento tiene muy alta transmisibilidad o permeabilidad, ya que la respuesta teórica y la experimental no presentan desfase. Es notorio resaltar que la curva morada es la respuesta teórica en un fluido mientras que la azul es la respuesta

teórica en un medio sólido o de corteza la morada hace las veces de curva experimental mientras que la azul sería el modelo teórico. En el yacimiento que se estudia en el capítulo a continuación, coexisten la parte rígida que es la respuesta del medio sólido al efecto provocado por la acción de las mareas terrestres en el yacimiento (en unidades de gravedad) y la respuesta del fluido que viene dado por la curva experimental medida a través de un sensor (en unidades de presión).

6.4.- Programa Año Domini generador del Calendario Lunar.

Para asegurar la calibración de los datos se usó un programa que predice el calendario lunar. El programa usado se llama A.D (Anno Domini). Con este programa se pueden calibrar los ciclos de mareas vivas y de mareas muertas. De esta manera chequeamos si las lunas predichas coinciden con los máximos de mareas mensuales generadas con el ETGTAB y MT80.

En la Figura 6.9 se muestra la salida del programa Anno Domini. en el mes de Abril. En la parte inferior se comparan las curvas predichas por el ETGTAB de marea sintética con las lunas predichas por el Anno Domini.



Programa de calendario Lunar. Mes de Abril.

Figura 6.9 Comparación de marea sintética ETGTAB con lunas obtenidas con el programa Anno Domini.

CAPÍTULO VII

7.- ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA GRAVEDAD EN EL TIEMPO, OBSERVADA EN LA PRUEBA DE RESTAURACIÓN DE LA PRESIÓN (BUILD UP).

En este Capítulo se describe el análisis realizado a los datos provenientes de una prueba de presión tipo Build up. Esta prueba se realizó simultáneamente en varios yacimientos cretácicos del pozo Gun 1-x. La señal de presión tipo “Build up” registrada, tuvo una duración de 45 días.

7.1.- Historial de producción del pozo (Evaluación en 1997 y Reevaluación en 2000).

De acuerdo con el informe entregado por Giovanni Da Prat (2000) acerca de la producción del pozo Gun 1-x, éste, fue objeto de pruebas tipo DST durante la perforación del mismo en el año 1997. Estas pruebas no fueron conclusivas en cuanto a la determinación de los parámetros de yacimiento por cuanto los cierres fueron de poca duración y la baja transmisibilidad del yacimiento, no hizo posible la identificación de regímenes de flujo tipo radial o flujo característico de yacimiento naturalmente fracturado, de aquí que en la re-evaluación del mismo, se efectuaron cierres de mayor duración, inclusive de 45 días a fin de poder efectuar análisis conclusivo. Cabe mencionar que tenemos un sistema tipo multicapa y de baja transmisibilidad el cual durante la perforación fue objeto de daño considerable debido a que se registraron pérdidas de lodo de mas de 4000 barriles, lo cual por una parte nos indica que es un sistema permeable, pero de tratarse de un yacimiento naturalmente fracturado el daño inducido puede ser de extensión considerable, de aquí que la inducción de producción mediante estimulación durante el período de re-evaluación fue el aspecto mas importante. Las pruebas de restauración se efectuaron en las formaciones la Luna, Maraca y Lisure considerándolo un solo paquete, luego

en la formación Piche superior y finalmente la prueba de 45 días, considerando todo el sistema.

La razón por la cual las pruebas se realizan de esa manera, se debe a la secuencia operacional así como el sistema de complementación, el cual no hace posible el efectuar pruebas por separado en cada una de las formaciones en estudio. Debido al uso del Cool Tubing (CT) como herramienta de levantamiento artificial no fue posible la medición de presiones en tiempo real, de aquí que se uso un sistema de medición de presión y temperatura de fondo con sensores electrónicos de memoria (Memory Gauge) con sensibilidad igual a 0.01 psi. También pero con menor resolución fue posible medir la presión y temperatura en superficie, ya que se introdujo una bomba electrosumergible. La medida de la presión en superficie permitió tomar decisiones en cuanto a la duración de los periodos de flujo y cierre. A fin de disponer de las propiedades del fluido productor. Se tomaron varias muestras para análisis tipo PVT.

Según el análisis PVT se desprende que el punto de burbuja asociado con el intervalo productor Piche superior es de 2715 psia, mientras que el punto de burbuja para todo el intervalo productor es de 3115 psia. Durante todo el período de re-evaluación se monitoreó la presión de fondo y superficie así como la gravedad API del fluido productor. El valor de la gravedad API no fue constante y depende del intervalo productor bajo estudio así como el acumulado de producción: El miembro Piché superior mostró una gravedad API de 44° cuando se evaluó por separado al comienzo del período de evaluación. La gravedad API que se obtiene al tener todos los intervalos en producción fluctúa entre el valor de 44 al inicio de la producción hasta un valor de 72 al final del período de evaluación, que corresponde a un acumulado de mas de 30.000 barriles de petróleo.

7.1.1- Desviación del pozo Gun 1X.

El pozo en estudio, presenta una desviación hacia el Oeste de 800 pies y al Norte una máxima de 25 pies (Figura 7.3). Obsérvese que aunque la desviación es básicamente hacia el Oeste, hay una pequeña componente hacia el Norte. Esta desviación indica, basados en el estudio sísmico estructural del proyecto, que el hoyo tiene la tendencia de desviarse perpendicular a los estratos encontrados. Adicionalmente, basados en los estudios de imagen acústica, ultrasónicas y registros de buzamientos, el pozo tiende a orientarse en la dirección de las fracturas abiertas. Debe notarse que en el intervalo donde se realizaron pruebas de presión, evaluaciones y cañoneos, el pozo muestra una inclinación considerable, lo que se debe tomar en cuenta para los estudios geomecánicos y cálculos de gradientes de presión de poros.

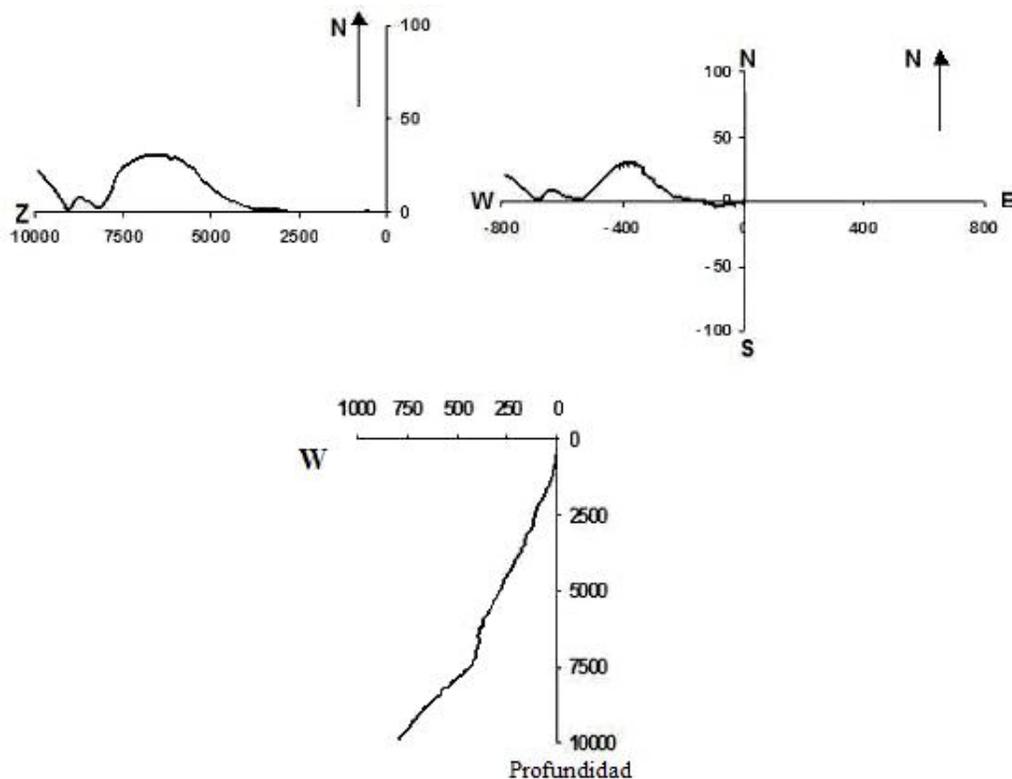


Figura 7.1 Desviación del pozo Gun-1x en tres vistas (Ruiz F. 2000)

La gráfica Z-N corresponde a la gráfica de la profundidad (Z) vs. dirección Norte. La grafica W-N corresponde a una vista en planta de la desviación del pozo y la Z-W corresponde a la profundidad (z) vs. Dirección Oeste (W).

7.1.2.- Característica Petrofísica de los intervalos en estudio.

En las Figuras 7.2 a 7.5 se muestran los resultados de una evaluación Petrofísica integrada y calibrada con datos de análisis de núcleos y datos de producción. El intervalo en estudio va desde 7260 pies a 8320 pies. Los intervalos cañoneados están indicados en colores amarillos y anaranjados. Se cañoneó a intervalos de 6 tiros / pie.

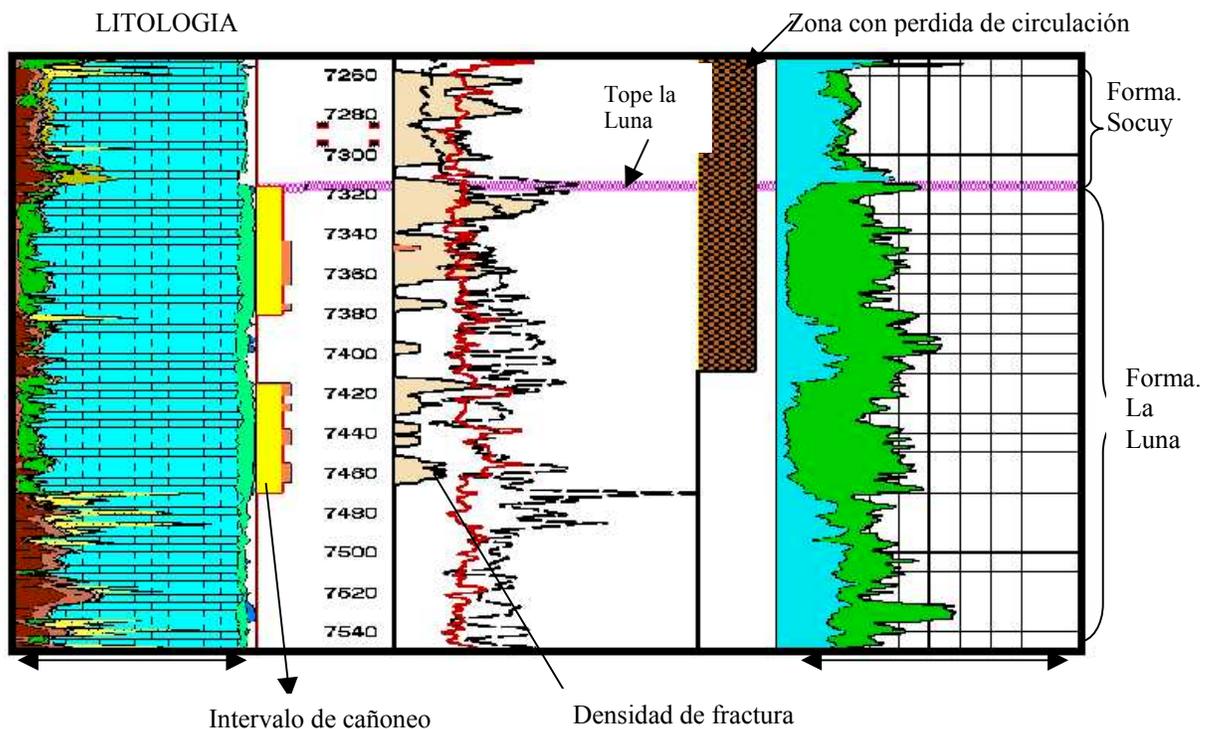


Figura 7.2 Evaluación petrofísica tope de la Formación La Luna.

Los intervalos cañoneados se seleccionaron basados en el estudio sedimentológico, la evaluación Petrofísica, estudios geomecánicos, análisis de las fracturas, pérdida de lodo durante la perforación y los análisis de las pruebas de producción (Figura 7.2). Cada intervalo se clasifica como intervalos con buenas propiedades de yacimientos o

intervalos con malas propiedades de yacimiento. Los intervalos en amarillo son los intervalos clasificados como buenos, los cuales fueron los intervalos cañoneados.

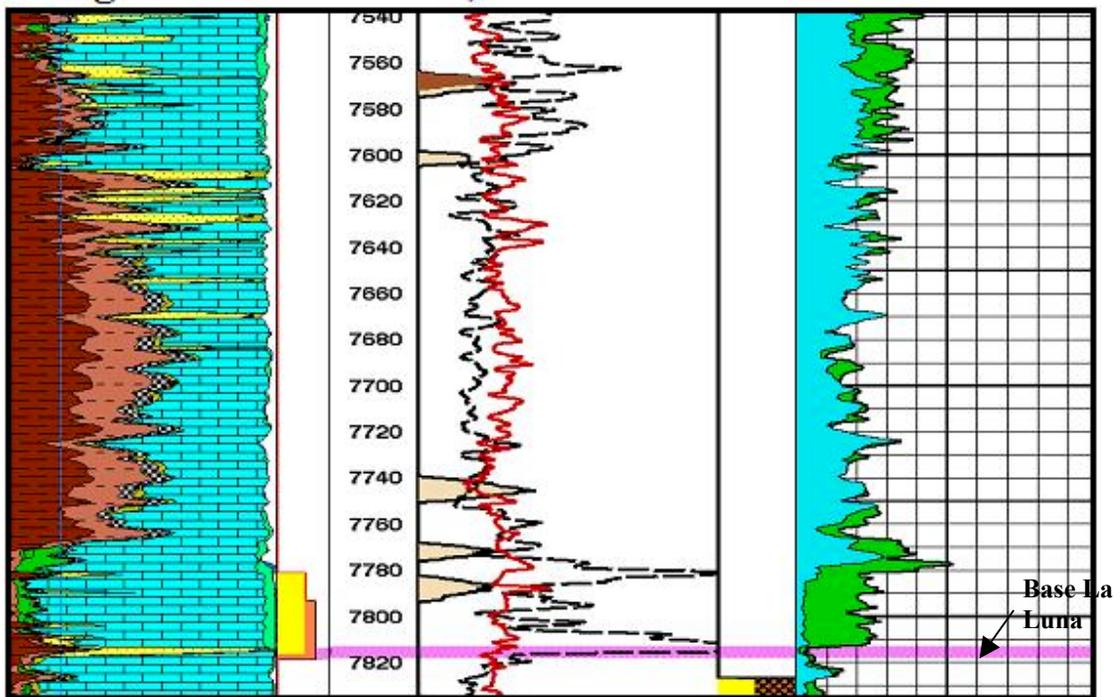


Figura 7.3 Evaluación Petrofísica de la base de la Formación La Luna.

En la Figura 7.3 se muestra la evaluación Petrofísica de la base de la Formación La Luna. Nótese que los intervalos sugeridos para el cañoneo están en las zonas donde se consiguen mejores propiedades de yacimiento, o sea alto porcentaje de calcita, alta porosidad efectiva, altas saturaciones de petróleo, mayor densidad de fracturas, mayor pérdida de lodo y menor cantidad de arcillas.

En las Figuras 7.4 y 7.5 se muestran los intervalos, cañoneados en la formación, Maraca y Lisure. Obsérvese el gran porcentaje de arcillas en la formación Lisure. En ambas formaciones se encuentra una litología muy variada, con altos contenidos de calcita, arcillas y cuarzo (Ruiz F, 1999-2000).

Las lutitas de la formación Lisure representan un excelente sello para los yacimientos carbonáticos inferiores.

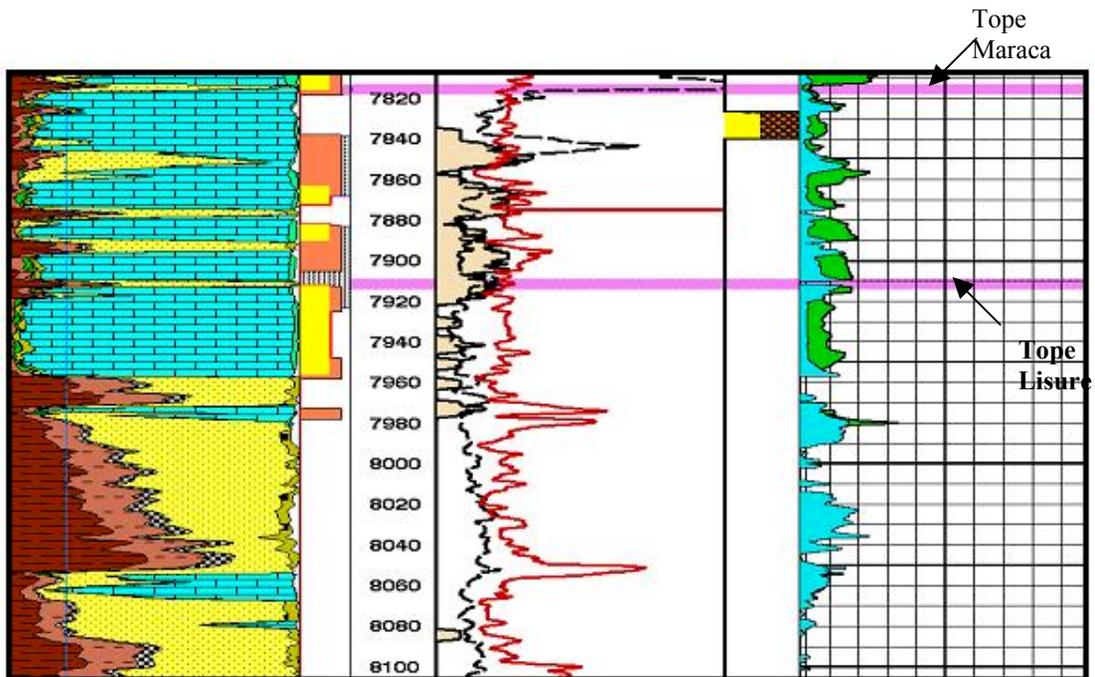


Figura 7.4. Evaluación petrofísica, formación Maraca y tope de la Formación Lisure.

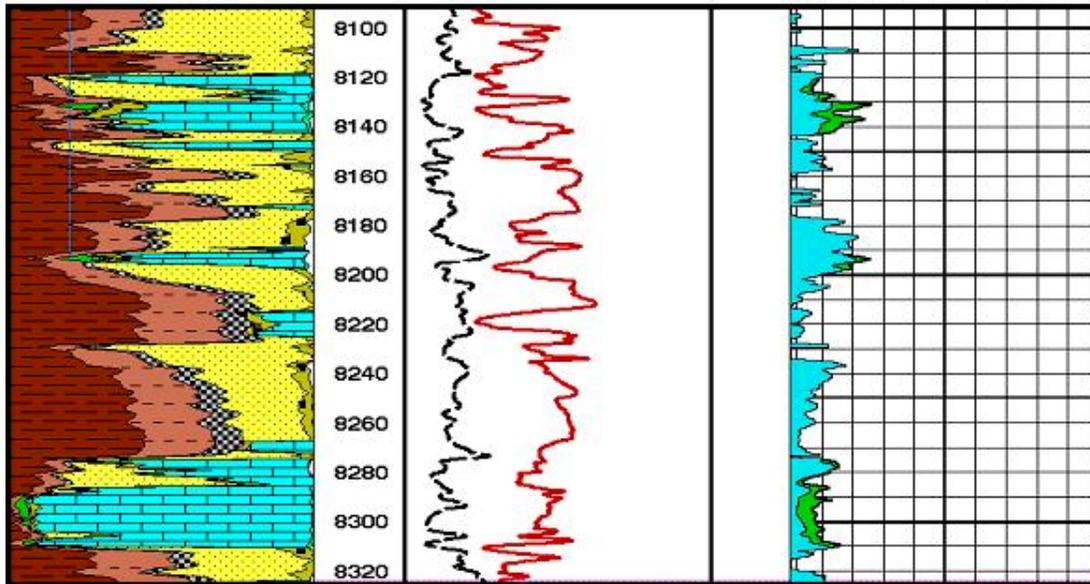


Figura 7.5. Evaluación petrofísica de la Formación Lisure.

En la formación Lisure no se propusieron intervalos para cañoneo a pesar de que se pueden observar algunos intervalos de caliza entre las profundidades de 8100' a 8320', esto se debe a la existencia de gran cantidad de sellos, formados por las capas lutíticas presentes en esta formación.

7.1.3.- Estado mecánico del pozo durante el Build up de 45 días.

En la Figura 7.6 se muestra un esquema del estado mecánico del pozo para el momento de la prueba de restauración de presión. La prueba se realizó a hueco entubado. El intervalo aislado para la prueba incluye las formaciones La Luna, Lisure, Maraca y la parte superior del miembro Piche de la formación Apón.

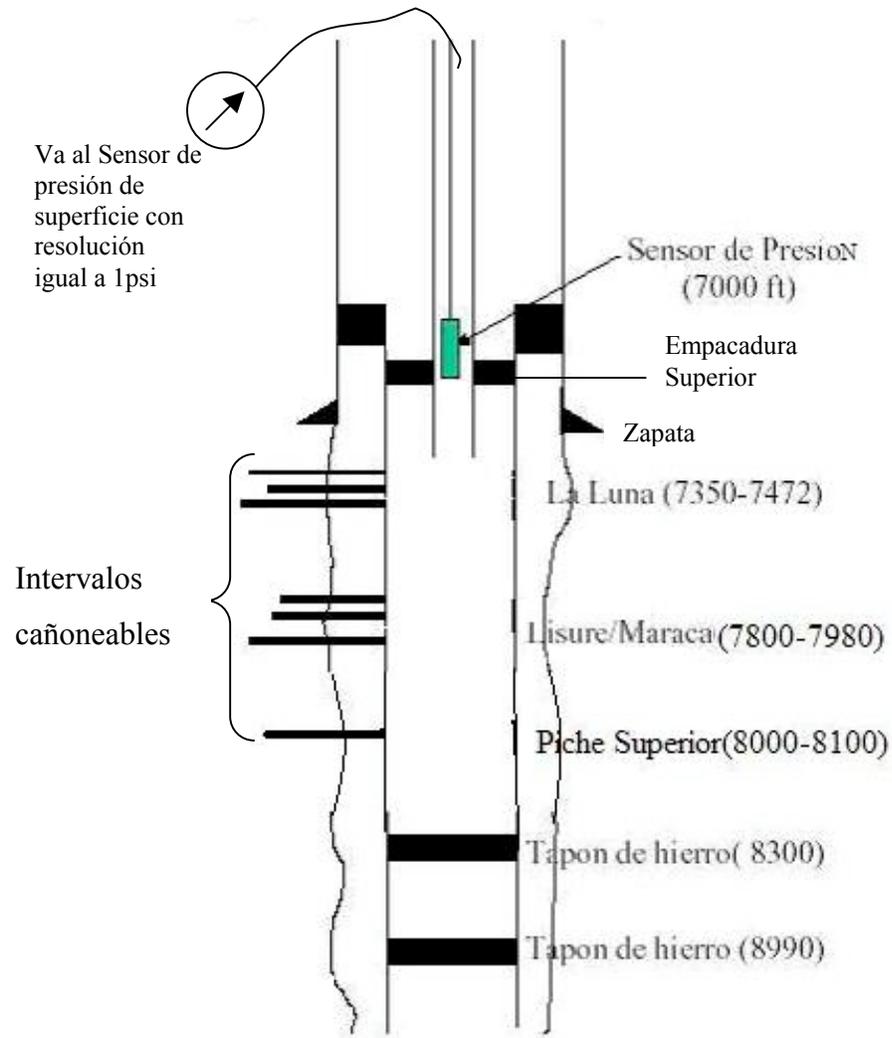


Figura 7.6. Estado mecánico del pozo Gun-1x para el momento de la prueba de restauración de presión (Build up).

7.2.- Prueba de presión tipo Build up de 45 días.

Previamente a la prueba de restauración de la presión tipo Build up, en el pozo se hizo una prueba de producción llamada drawdown. Esta es una prueba de medición de presión que se aplica durante la producción. En el pozo se encontró agua, petróleo y gas; debido a esto, durante la prueba de drawdown, los sensores registraron una caída normal de la presión pero, con ruidos provenientes de la turbulencia causada por la segregación de los fluidos en el pozo.

El día 21-05-2000 se dio comienzo a la prueba de restauración de presión con cierre en superficie. La prueba duro 45 días, la presión y temperatura fueron muestreadas a un intervalo de tiempo de 30 seg. Inicialmente, con tubing cerrado, se bajó blanking plug y dos herramientas de registros, cada uno con un sensor de presión y uno de temperatura. Los sensores de registros fueron asentados en una herramienta en forma de Y (Ytool). El primer dispositivo quedo a una profundidad igual a 6560 pies, sensor (71277), y el otro a una profundidad igual a 6562 pies, sensor (71276).

Una vez posicionados los sensores de registro en profundidad, se espero estabilización de la producción a través del monitoreo de la presión y la temperatura en superficie, haciendo uso de los sensores de la bomba electrosumergible (BES), los cuales eran de poca resolución, ubicada en el tope del intervalo aislado a evaluar, posteriormente se cerró el pozo.

Durante la prueba no se reporta ningún tipo de falla, y se registraron datos en fondo por 45 días, se mantuvo un chequeo en superficie, haciendo uso de los sensores de la bomba, los cuales eran de poca resolución (1 psi y 1°F).

Al finalizar la prueba planificada (45 días), extraen los dos dispositivos que contienen los sensores de memoria (Memory Gauges) y los datos se graban en una computadora.

La Figura 7.7 muestra las presiones del yacimiento medidas durante la prueba de restauración de presión. Este experimento duro 45 días. Iniciando el día 21-5-2000 y culminando el día 5-7-2000, la curva superior corresponde a la presión y la inferior

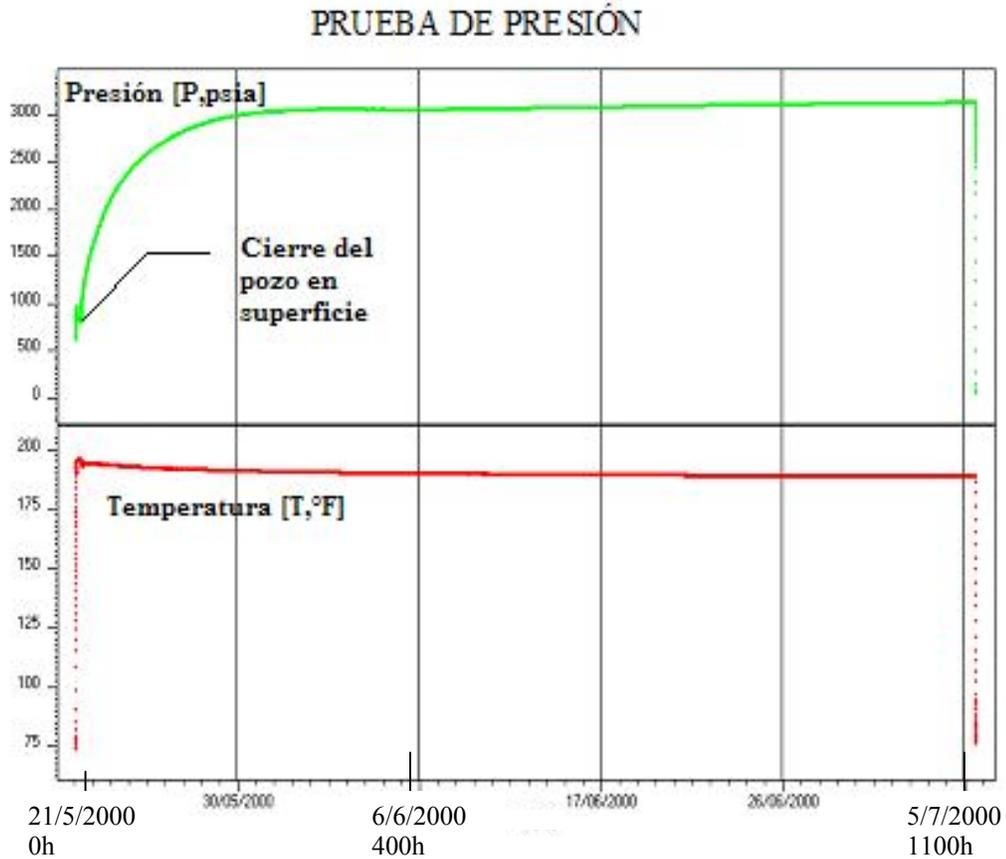


Figura 7.7 Gráfico de la prueba de restauración y de Temperatura vs. Tiempo.

corresponde a la temperatura, ambas medidas se realizan simultáneamente a un muestreo temporal de 30 seg. La escala de presión esta en psia, la cual es la unidad de presión absoluta en el Sistema Ingles. La escala de temperatura está en grados Fahrenheit (°F).

7.2.1.- Análisis de la prueba (Build up de 45 días).

En la etapa inicial del Build up de 5 h a 120 h existe un período de almacenamiento (Figura 7.8), el cual se define como el tiempo que tardan los fluidos en presurizar toda la tubería hasta alcanzar el amortiguamiento de la onda de producción, de 0 a 5h se registra la señal proveniente del la prueba de producción Drawdown. Una vez que la tubería se presuriza, la presión se hace más estable y continua la segregación de los fluidos. Posterior a la segregación y Debido a la baja transmisibilidad del yacimiento, la presión sigue restaurando pero no alcanzara el valor de presión de este, Por que se requiere un tiempo de estabilización mucho mayor a 45 días (Figura 7.7).

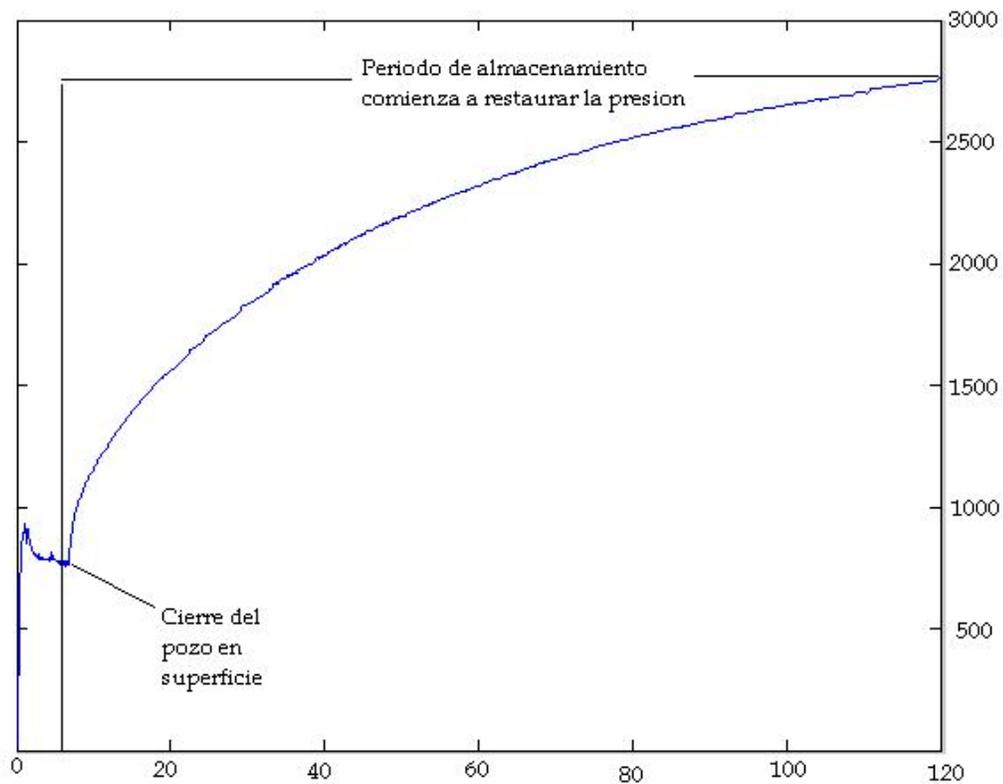


Figura 7.8 Intervalo de prueba comprendido entre las horas 0 y 120.

El ruido generado por la producción, se sigue observando como una oscilación, pero no es tan marcado, como se observaría normalmente durante la producción. Una vez que desaparece el ruido de la onda de producción sigue ocurriendo la segregación de los fluidos dentro del pozo, pero ya no existe la turbulencia causada por la producción. Es así que luego del amortiguamiento de la onda producida por la turbulencia se puede tener una medida de presión más confiable del yacimiento (Figura 7.9).

También en la Figura 7.9 se muestra la señal de presión en un tiempo posterior (120h) en el cual ya no está la parte inicial de la señal que contiene el ruido causado por la onda de producción y por la existencia en los yacimientos de varias fases de fluidos. Obsérvese que en el rango de 160 a 260 horas, ya casi no se observa onda de rebote y se tiene ya la información neta de presión, proveniente de la segregación o restauración de la presión del yacimiento, además se encuentran allí aunque no visibles, las oscilaciones de la presión causadas por la marea terrestre.

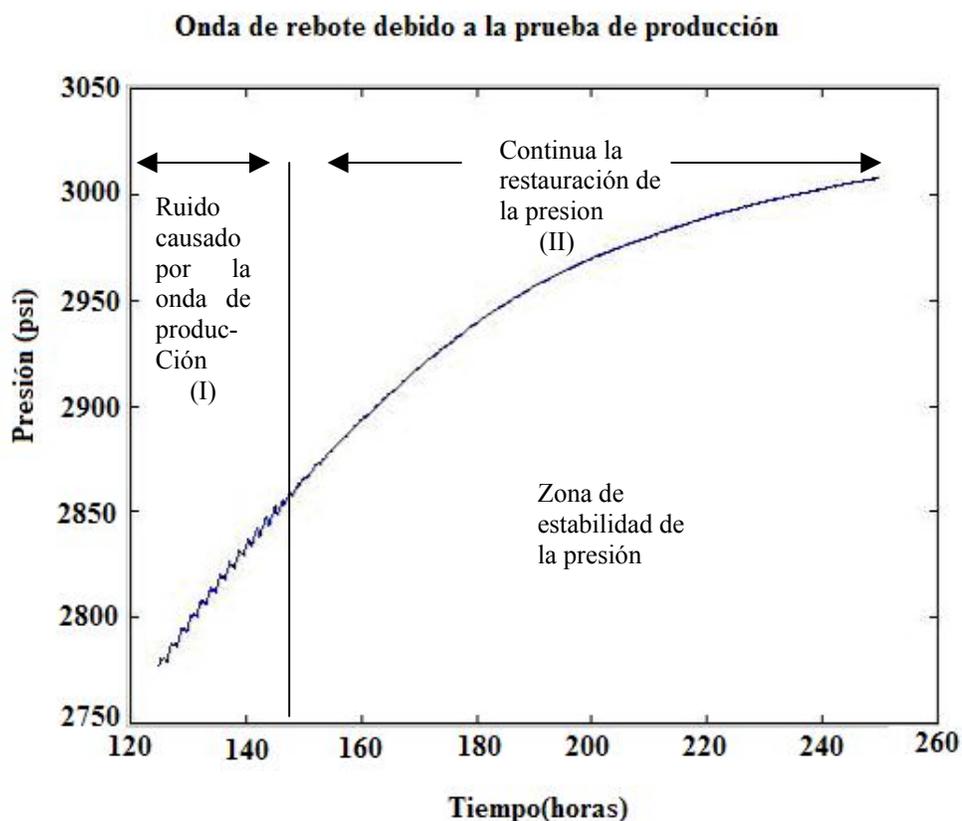


Figura 7.9 Onda de rebote debido a la prueba de producción.

Después de cierto tiempo mayor a 260 horas, la señal de presión tiende a estabilizarse, pero luego aún después de 45 días sigue aumentando con menor tasa. Esto sucede porque cesa el efecto de segregación de fases y la señal de presión es causada netamente por flujo de fluido y estabilización de la presión en el yacimiento. Esto corresponde a la etapa final del Build up, después de la hora 400 aproximadamente.

En el intervalo comprendido entre 250 h y 450 h, ocurre una fuga de fluido, causada por una falla mecánica. Esto posiblemente debido al deslizamiento de la empacadura superior la cual estaba ubicada entre el Cemento y el entubado (Figura 7.6). Un deslizamiento de esta empacadura podría causar una disminución en la presión del

intervalo aislado. Una vez reposicionada la empacadura, la presión vuelve a estabilizarse nuevamente y continúa la restauración de la misma.

En la Figura 7.10 se muestra el intervalo de 250 a 450 del Build up en el que ocurre la falla mecánica. Los Ingenieros encargados de la prueba se percataron de la falla después de 45 días. Cuando los sensores en fondo fueron llevados a superficie. Esto ocurrió porque el instrumental en superficie, no tenía la resolución necesaria para detectar esta caída de presión con anticipación y reiniciar la prueba.

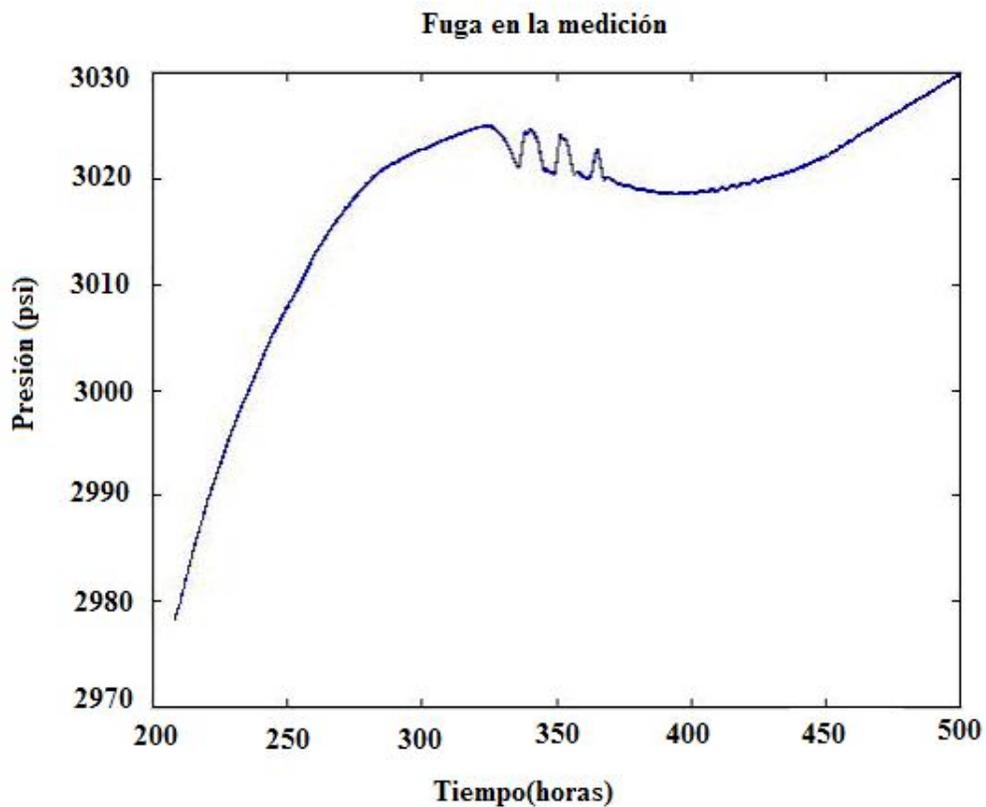


Figura 7.10 Curva que muestra la caída de presión en el yacimiento causado posiblemente por falla mecánica en el intervalo aislado.

La señal completa de "Build up" estudiado duró 45 días. Esta señal la dividimos en 5 partes, para facilitar su estudio y seleccionar el intervalo adecuado para el análisis de las componentes de mareas:

- a) En el intervalo comprendido entre 0 y 120 h, contiene mucho ruido proveniente de la producción. En este periodo la segregación de fluidos ocurre en el intervalo aislado de manera caótica.
- b) En el período de 120 h a 150 h, ocurre la onda de rebote proveniente de la producción, pero ya más amortiguada.
- c) Entre 140 h a 160 h hay una zona de transición a partir de la cual se hace más estable la señal.
- d) Entre 160 h a 300 h se observa una señal más nítida proveniente del yacimiento.
- e) De 300 h a 450 h ocurre una falla mecánica y posteriormente se vuelve a estabilizar la presión en el periodo posterior a 450 en adelante.

7.2.2.- Selección del intervalo de la señal de presión para el análisis de marea.

Las componentes de mareas más intensas contenidas en la señal de presión consisten de armónicos con periodos de aproximadamente: medio día, un día, un mes y un año. Por lo que un experimento tipo Build up que dure 1 día o más es útil para extraer componentes armónicos de la marea. El Build up en estudio contiene componentes de la marea con periodos aproximados de mediodía, 1 día y 1 mes, ya que este tiene una longitud mayor a un mes. Sin embargo, no sería suficiente para estudiar periodos de un año.

El intervalo inicial del Build up, comprendido entre 0 h y 120 h (Figura 7.8) es un intervalo donde la presión es muy inestable, por lo que no es recomendable para un análisis. Se puede observar en la Figura 7.9 que de 120 h hasta 160 h, todavía hay ruido que pudiera interferir con las componentes de mareas. A partir de las 160 h la amplitud de la señal incrementa pero no presenta oscilaciones, por lo que pudiera ser

usada para un análisis de marea. Debido a la falla ocurrida de la hora 300 a la 400, el Build up completo no puede ser utilizado para cálculos de modelaje de yacimientos. Sin embargo, aun en este caso, la señal de presión puede ser usada para estudios de marea, ya que las frecuencias correspondientes a esta falla no necesariamente son las mismas que las frecuencias de las componentes de marea estudiada. Es aquí donde el Análisis Armónico se convierte en una de las ventajas del presente trabajo, ya que no es necesario contar con una prueba de presión en óptimas condiciones para ser realizado.

7.2.3.- Preparación de las señales para la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier.

El análisis armónico consiste en aplicar la transformada de Fourier y obtener el espectro de amplitud de la señal de presión real y de la sintética generada con el programa de mareas ETGTAB, al mismo muestreo de la señal real y de la misma duración. De la señal real, por simplificación en el procedimiento numérico. Se tomo solo la parte de la señal comprendida en el intervalo de Tiempo, que va desde las 400 horas hasta las 1100 horas, el cual excluye el intervalo afectado por la onda de producción y el afectado por las fallas mecánicas (Figura 7.11). Antes de aplicar la Transformada rápida de Fourier, la señal debe adecuarse para evitar ruidos numéricos en la Transferencia directa e inversa. Una vez seleccionado el intervalo 400h – 1100h, el primer paso fue el de realizar un ajuste lineal por mínimos cuadrados (Figura 7.11).

El segundo paso fue el de restar la recta de ajuste a los datos originales y obtener como resultado una señal que contiene las frecuencias de interés. Así la frecuencia filtrada por mínimos cuadrados es mucho menor que las frecuencias de buscadas es decir las correspondientes a las frecuencias de mareas diarias, semidiarias y la mensual. El filtro aplicado al substrae la recta de ajuste podría estar en el orden de la frecuencia anual de marea, la cual no fue considerada para esta parte del estudio.

Ajuste de la curva de presión

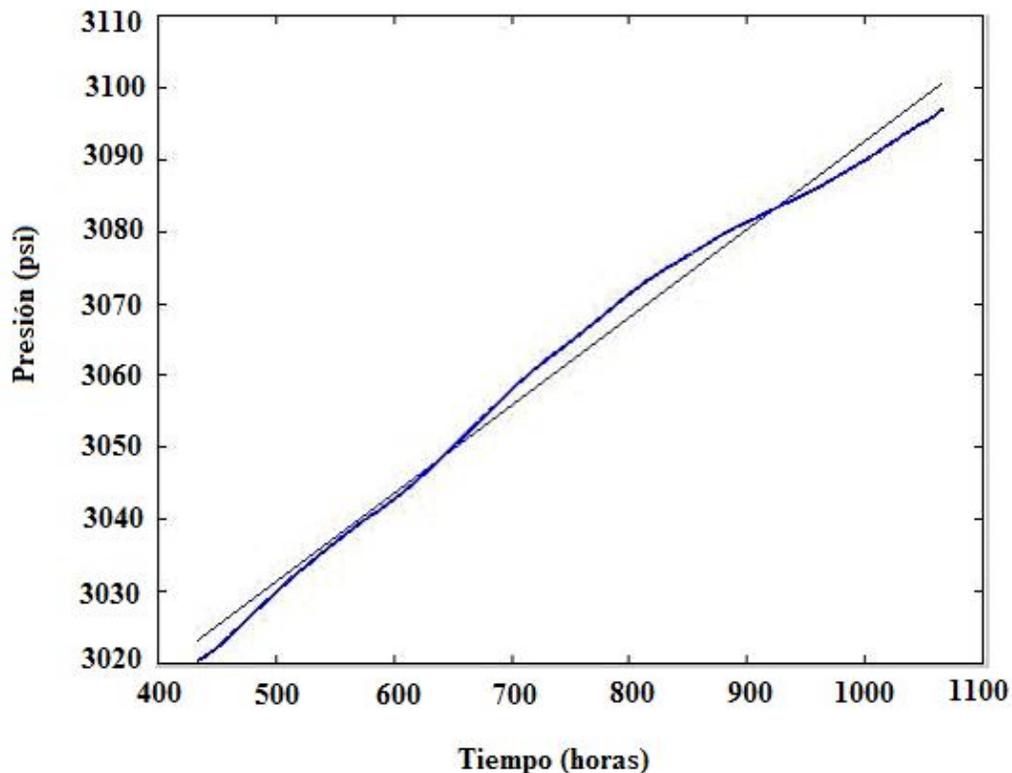


Figura 7.11 Segmento aproximadamente lineal de la señal de presión y recta de ajuste por mínimos cuadradas.

Una vez que se hace la diferencia entre la señal real y la recta de ajuste, se obtiene la señal mostrada en la Figura 7.12.

En la Figura 7.13 se muestra la señal teórica obtenida con el programa ETGTAB y la señal experimental. Adicionalmente se indica el ciclo lunar obtenido con el programa generador de Calendario Lunar “Año Domini”. La señal generada por ETGTAB, es la variación de la gravedad (en Nm./seg^2) en el tiempo, exactamente al mismo muestreo de la señal real y de la misma longitud. Para el estudio realizado no es necesario transformar los valores de gravedad teórica a valores de presión, ya que solo se

estudiaran las amplitudes relativas de las diferentes componentes y las fases de la señal.

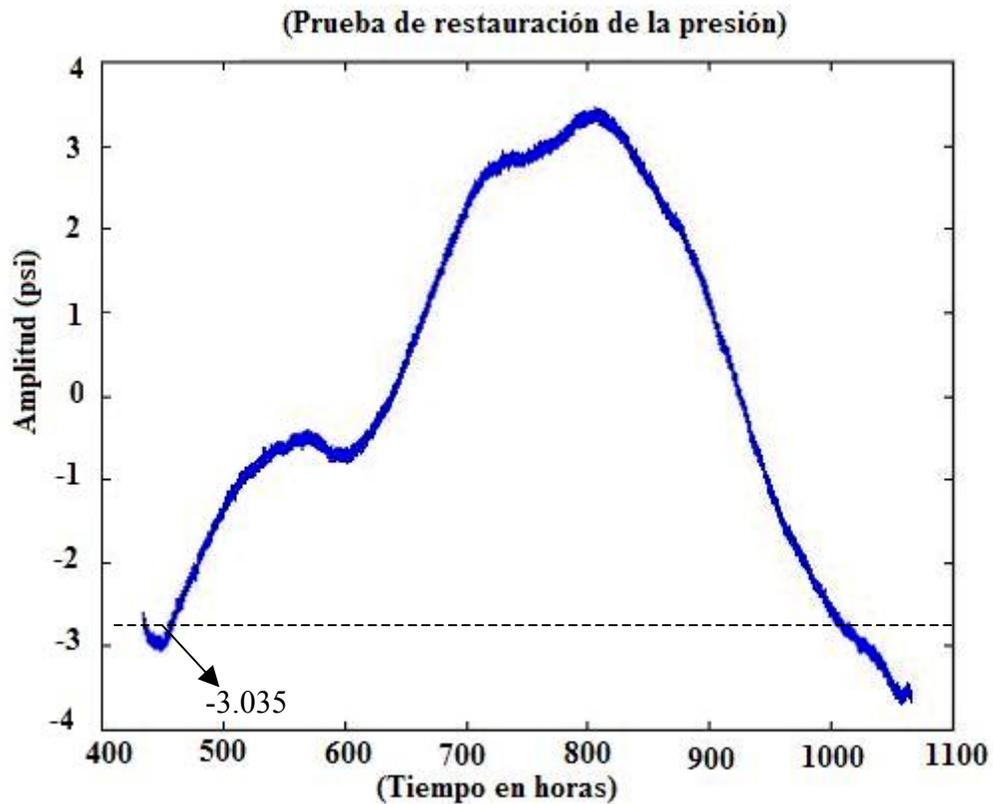


Figura 7.12.-Señal real menos la recta de ajuste.

También en la Figura 7.13 La señal teórica muestra dos máximos, los cuales corresponden perfectamente con las fases de Luna Llena y Nueva. En la señal real pareciese existir cierta correspondencia con las fluctuaciones observadas en la señal sintética.

Antes de aplicar la Transformada de Fourier (Figura 7.12), se prepara la señal para evitar el fenómeno de Gibbs en el dominio de la frecuencia. Una manera de evitar esto, pudo haber sido aplicar un “Taper” a la señal de presión, sin embargo, debido a que la señal tiene forma de campana y termina aproximadamente en el mismo valor

en ambos extremos, lo que se hizo simplemente fue eliminar todos los puntos que estén por debajo y por arriba de un cierto nivel de referencia. En la figura 7.12 se observan los extremos de la señal que hay que eliminar. Posteriormente a la señal se le añade una constante de 3.035 psi, para llevar ambos extremos de la señal a un nivel de referencia de valor cero. Ambos extremos se corrigieron manualmente. De esta manera la señal real ya esta preparada para la aplicación de la transformada de Fourier. Un procedimiento análogo se le aplicó a la señal de marea sintética, es decir se lleva la señal a un nivel de referencia. Para ello se determinó la media de la señal y se le substrajo a la misma. Luego se eliminaron las colas de la señal hasta llevarla a cero en ambos extremos.

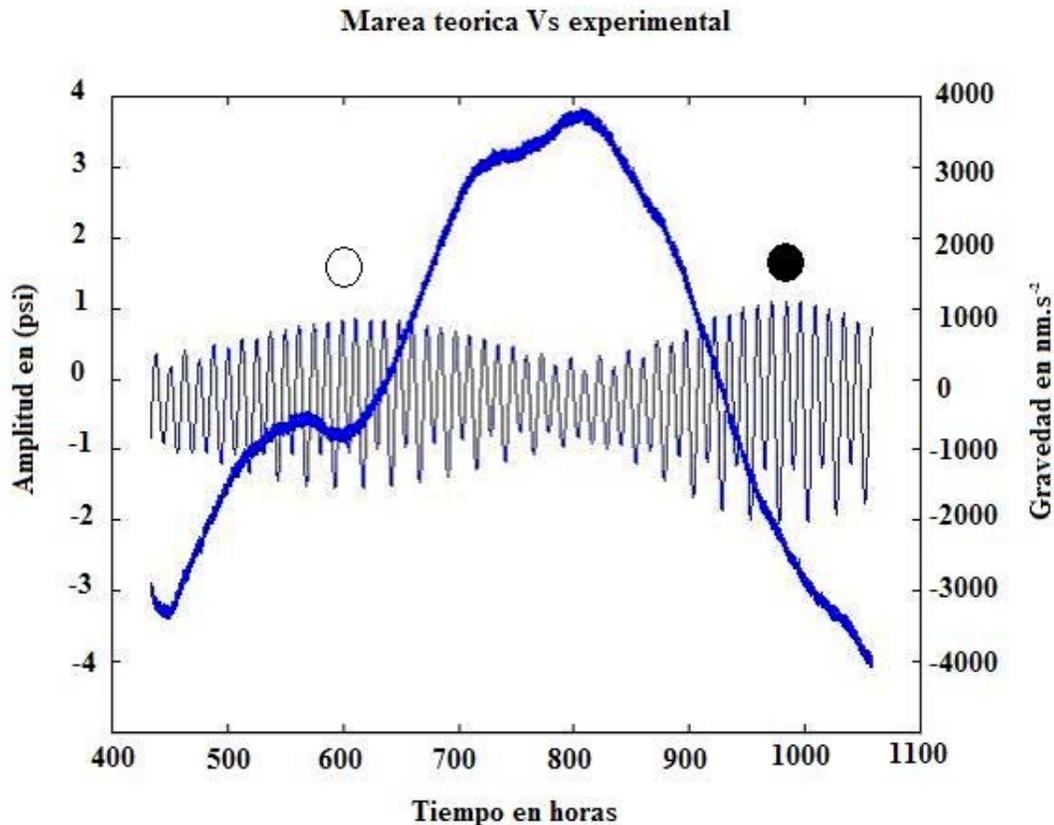


Figura 7.13 Comparación de la señal del Build up con la fase lunar durante el período que dura la prueba.

Finalmente para lograr un espectro de amplitud suave y con mayor resolución en el dominio de la frecuencia, a ambas señales real y sintética, se le añadieron ceros en los extremos.

Ambas señales constan de 76000 muestras a un muestreo temporal de 30 seg. A cada señal se le agregan 226269 ceros en ambos extremos, de manera de obtener una señal de 524288. Este número de muestras es un múltiplo del número 2, lo cual permite la aplicación de la transformada rápida de Fourier. En las figuras 7.14 y 7.15 se muestran la señal real y la señal sintética con ceros en los extremos, listas para aplicarles la transformada rápida de Fourier.

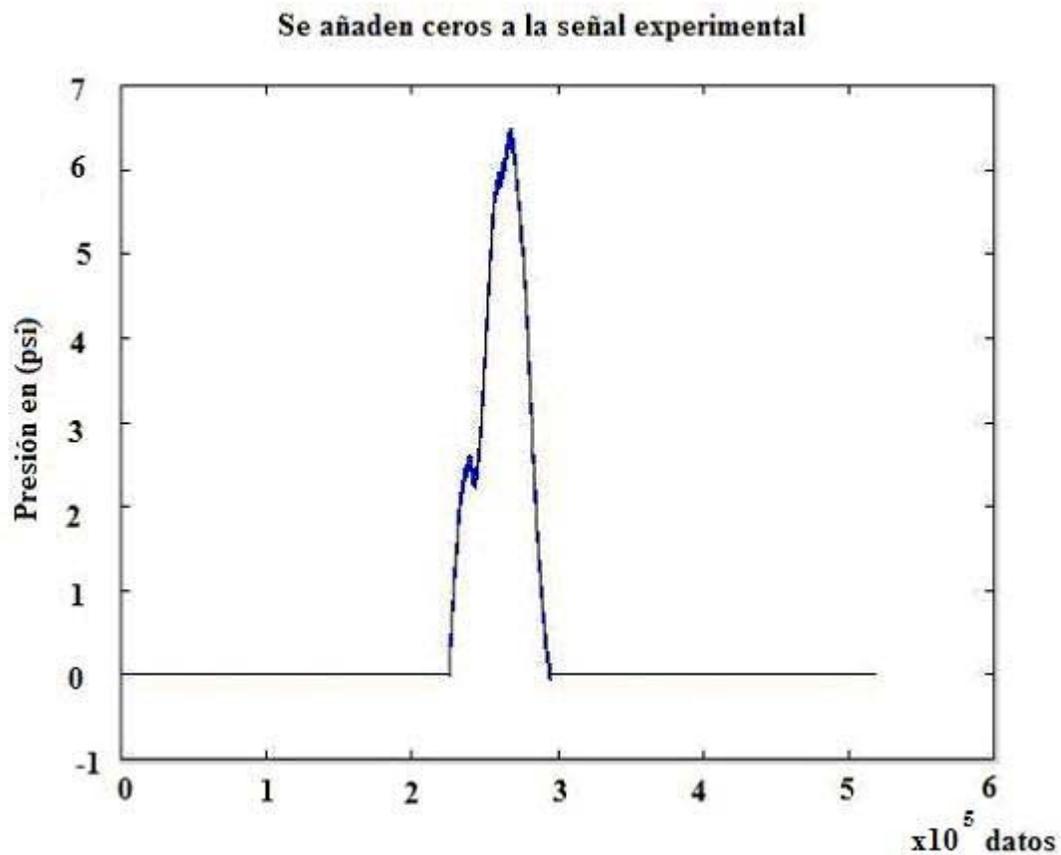


Figura 7.14 Señal real con filtro pasa bajo con ceros a la izquierda y derecha.

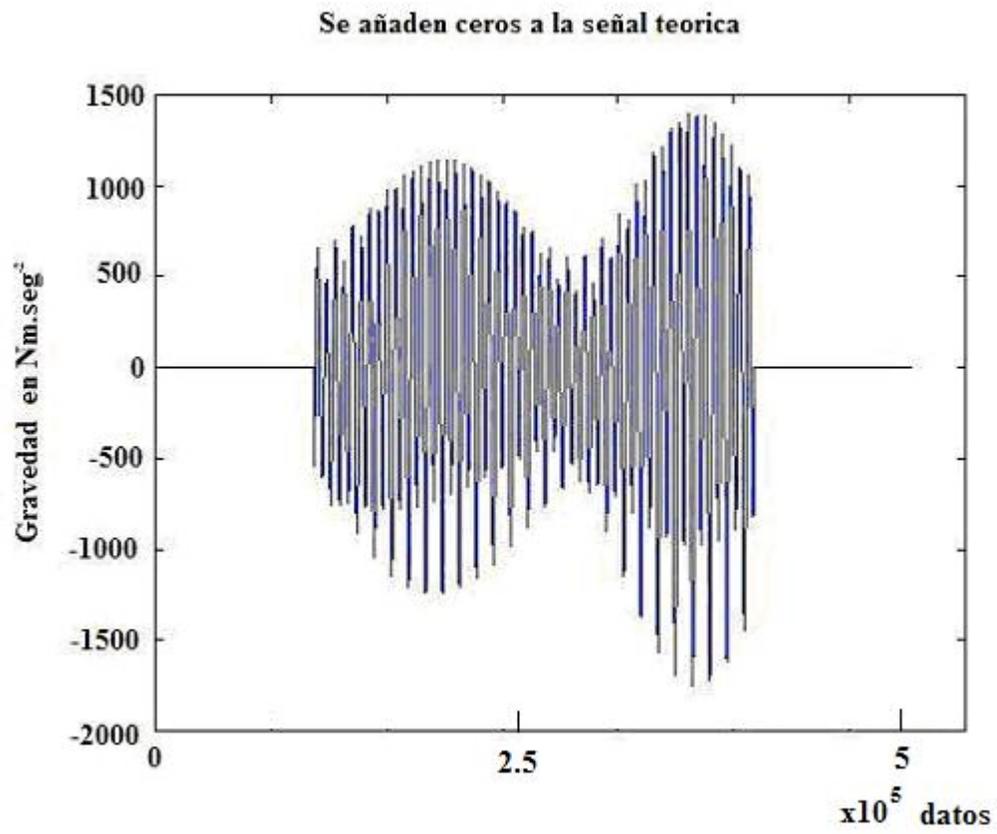


Figura 7.15 Señal sintética sin filtrar con ceros añadidos a la izquierda y derecha.

7.2.4.- Espectro de amplitud de las señales real y sintética.

La Figura 7.16, muestra el espectro de amplitud normalizado de la señal de presión experimental de la Figura 7.14. En ella se observan las componentes de mareas teóricas representadas en “*” (Tabla 7.1), mientras que las experimentales son mostradas en línea continua. Ambas amplitudes fueron normalizadas, de manera de poder realizar una comparación adecuada.

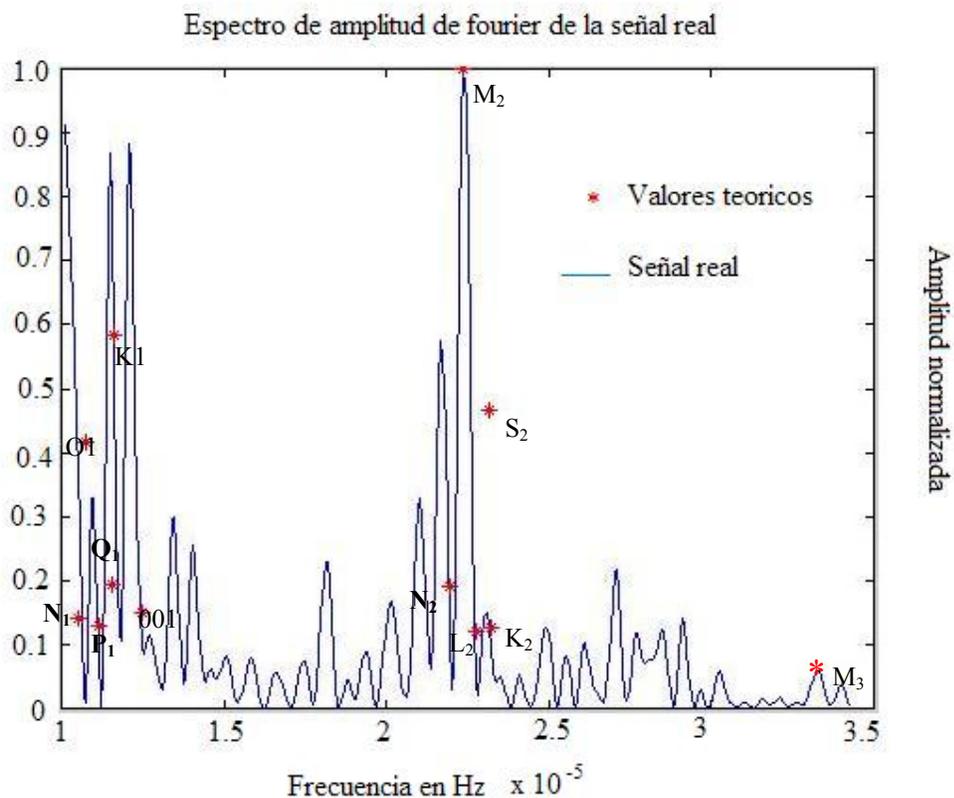


Figura 7.16 Espectro de amplitud de la señal experimental.

Es importante aclarar que la señal real contiene la siguiente información:

- Señales correspondientes a los diferentes armónicos de marea. Compuesta por las señales indicadas en la Tabla 7.1.

b) Alta frecuencia proveniente de ruido numérico o instrumental electrónico (mayor que 3.5 Hz).

c) Información sobre la manera en que se estabiliza la presión en el yacimiento. La señal de presión del yacimiento, inferimos que contiene básicamente información de baja frecuencia.

Ya que la señal real de Build up dura aproximadamente 30 días, se decidió tratar de filtrarla y preservar solo la banda de frecuencia correspondiente a las mareas diurnas y semidiurnas, las cuales están comprendidas entre 1 Hz y 3 Hz.

En la Figura 7.17 se muestra el espectro de amplitud normalizado de la señal sintética de la Figura 7.15. También se muestra la comparación con los valores teóricos y universales de las componentes de mareas.

La señal sintética solo contiene los armónicos con frecuencias muy específicas de las diferentes componentes de marea. Hay componentes no visibles en el espectro de amplitud, por su baja amplitud en comparación con las frecuencias semidiurnas y diurnas como la M_2 (Semidiurna). La M_3 que esta a 3.35 Hz es un ejemplo de ello.

En la Figura 7.18 se muestra la componente M_3 extraída a partir del espectro de amplitudes teórico, es decir el proveniente de la señal teórica se observa ruido matemático en la gráfica, pero un pico sobresaliente el cual corresponde a la componente M_3 . En la señal experimental también parece observarse un pico en la frecuencia correspondiente a M_3 pero no se tiene certeza de que esa frecuencia podría ser ruido o la señal principal.

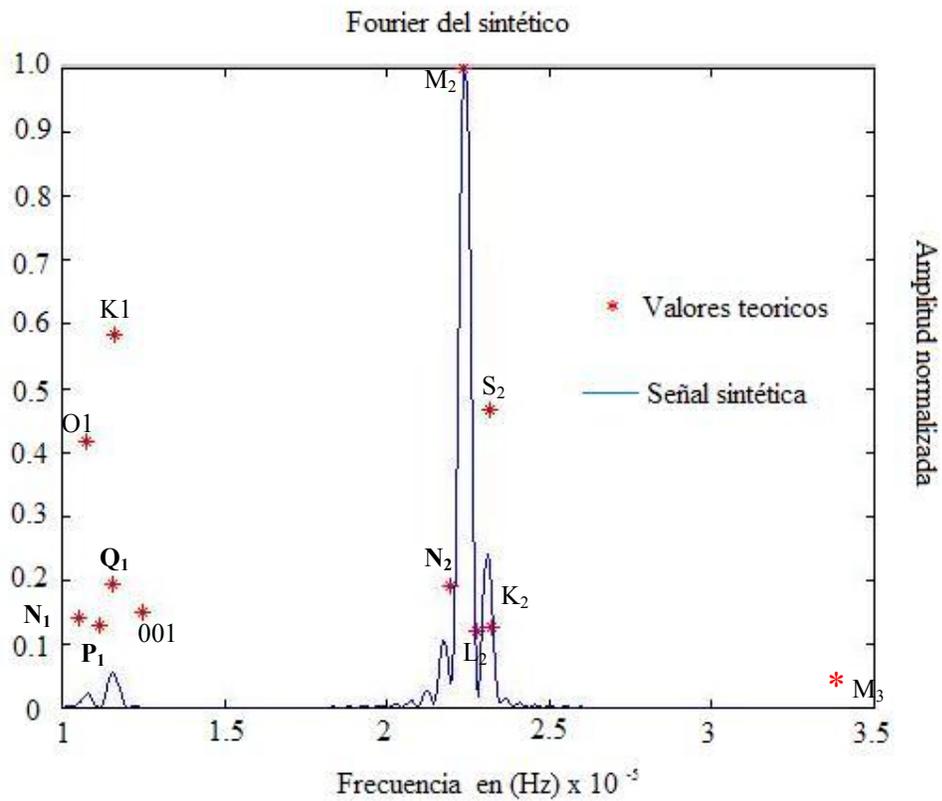


Figura 7.17 Espectro sintético de Fourier.

Ambos espectros de amplitud, de la señal real y la sintética, fueron graficados en el intervalo de frecuencia correspondiente a $1 \text{ Hz} - 3.5 \times 10^{-5} \text{ Hz}$. Esto se hizo así, porque las señales entre 0 Hz a 1 Hz correspondientes a las frecuencias de mareas mensuales y anuales, no forman parte de nuestros objetivos en el estudio, sin embargo, la señal del Buid up analizado contiene datos suficientes como para analizar las componentes de períodos de aproximadamente un mes.

Se puede observar en ambos espectros (Figuras 7.16 y 7.17) que los valores teóricos de amplitud de las componentes, muestran diferencias significativas tanto con la señal real como con la sintética. Esto posiblemente es causado por las diferentes frecuencias de ruido presentes en la señal experimental y la presencia de algún filtro de atenuación de amplitudes del programa ETGTAB para la señal teórica. Sin embargo, obsérvese que la correspondencia en frecuencia entre los valores teóricos y reales es precisa

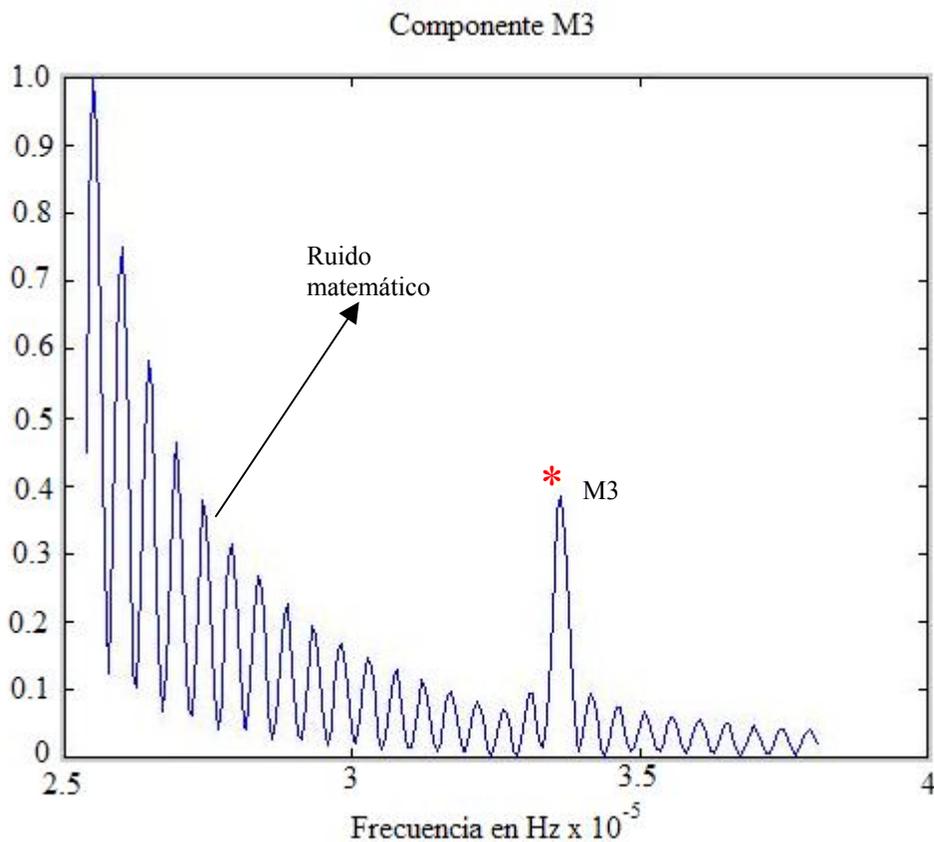


Figura 7.18 intervalo del espectro sintético donde se ve reflejada la componente M3

Se observa ruido matemático coherente a ambos lados de la señal

Tabla 7.1 Componentes de mareas presentes en el experimento

Mareas	Frecuencias $\times 10^{-5}$ (Hz)	Amplitud	Descripción	Símbolo
S E M I D I U R N A S	2,234	100	Lunar principal, (constituyente semidiurna)	M2
	2.314	46,6	Solar principal (semidiurna constituyente)	S2
	2.190	19.1	Constituyente Lunar debida a la variación mensual en distancia a la Luna	N2
	2.32	12.7	Constituyente solilunar debido a cambios en la declinación del sol y la Luna a través de su ciclo orbital	K2
D I U R N A S	1.161	58.4	Constituyente solilunar	K1
	1.076	41.5	Constituyente Lunar principal (diurna)	O1
	1.154	19.3	Constituyente solar principal diurna	P1
	1.246	20.0	Lunar diurna de segundo orden	001
	3.4	0.1	Desconocida para mareas marinas pero descrita en los programas de mareas terrestres	M3

Se puede observar en el espectro de la señal real, que las componentes N_2 , L_2 , k_2 , S_2 y M_2 correspondientes a las semidiurnas y las componentes K_1 , O_1 , Q_1 , N_1 P_1 y 001 correspondientes a las diurnas son registradas por el sensor de presión en el yacimiento (Tabla 7.1). En el caso de la M_2 la correspondencia en amplitud es muy precisa. Para las otras componentes solo se observa correspondencia en las frecuencias. Esto puede ser debido a que debe haber información de presión,

proveniente de la estabilización en el yacimiento que contiene las mismas frecuencia de la señal de marea, causando así, un solape de las señales en el Dominio de la frecuencia.

En los datos reales posiblemente se observa la amplitud de la componente M_3 , la cual debería ser de muy baja amplitud pero en el espectro aparece con un valor alto, se infiere la presencia de ruido resonante.

En el espectro de la señal sintética las amplitudes, también están atenuadas, excepto la M_2 . Sin embargo, y al igual que el espectro anterior, las señales coinciden perfectamente en frecuencia. El programa ETGTAB genera la componente M_3 , Sin embargo ésta no se observa en este espectro sintético, debido a que ésta, es de muy baja amplitud comparada con las otras componentes, pero si se hace un acercamiento a la zona comprendida entre 3 Hz y 3.5 Hz, entonces se observará la señal de la componente.

7.2.5.- Filtrado de las señales en el dominio de la frecuencia.

Como las componentes de mareas tienen frecuencias bien definidas, para filtrar solo hay que hacer cero a todas las partes de la señal que estén comprendidas entre 0 y 1 Hz y entre 3.5 Hz y la frecuencia de Nyquist. Esto es así, ya que solo estamos interesados en las frecuencias correspondientes a las componentes de mareas semidiurnas y diurnas.

7.2.6.- Transformada Inversa de Fourier. De la señal real y sintética.

Una vez obtenidos los espectros de la señal sintética y la experimental se procede a filtrar, lo no deseado y aplicar la transformada inversa, sin alterar la fase de la señal, y poder compararlas en ese dominio.

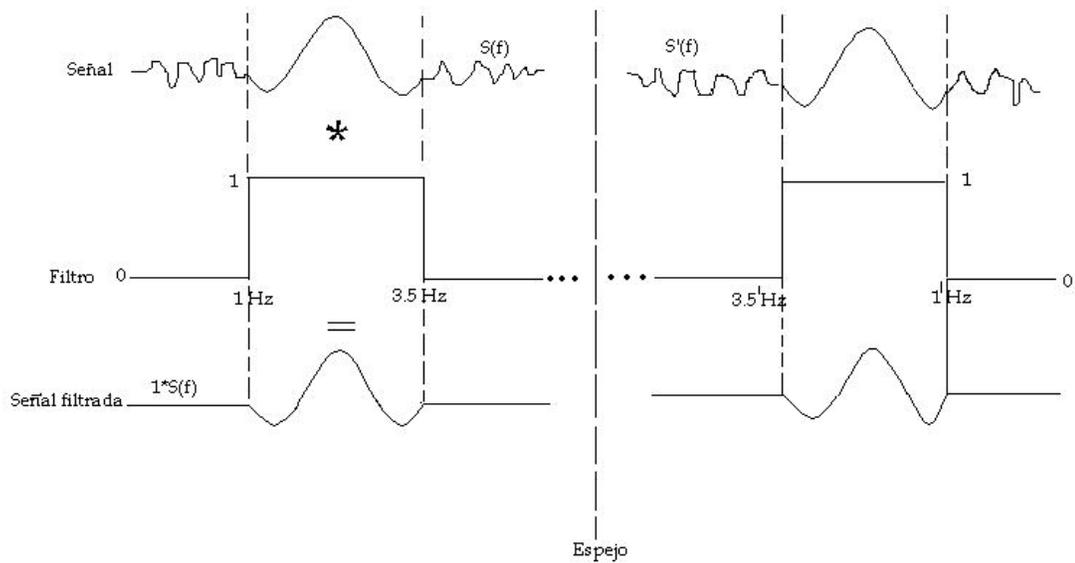


Figura 7.19 Filtro aplicado a la señal $S(f)$ y su correspondiente imagen en el espejo.

La señal compleja en el dominio de la frecuencia se hizo igual a cero en el intervalo comprendido entre 0 Hz y 1 Hz y entre 3.5 Hz y F_n (Figura 7.19). De igual manera se hizo para la señal espejo (Figura 7.19). Debido a que la señal tiene frecuencias bien definidas y no cae abruptamente en sus extremos, la multiplicación por el filtro “Caja” no introduce fenómeno de Gibb en el dominio del tiempo y tampoco hace falta la aplicación de un “Taper”. Este filtro aplicado así, solo elimina algunos componentes de frecuencia, pero no altera las fases de las frecuencias de la señal filtrada. En las Figuras 7.20 y 7.21 se muestran las señales en tiempo de las transformadas inversas de los espectros de Fourier anteriormente descritos. (Obsérvese en el Apéndice C con más detalle este procedimiento en el programa desarrollado con Matlab).

Exactamente el mismo procedimiento también se le aplico a la señal sintética, en el dominio de frecuencia, de manera de poder comparar en las mismas condiciones en el dominio del tiempo, al realizar la Transformada inversa.

En la Figura 7.20 se muestra la señal real filtrada. En ella se puede notar que el sensor de presión tipo “Memory Gauge” de sensibilidad 0.01 psi, fue capaz de grabar las componentes de mareas semidiurna y diurna.

El siguiente paso del estudio es el de comparar las dos señales filtradas, en el dominio del tiempo, y estudiar los desfases entre los diferentes componentes de marea real y sintética.

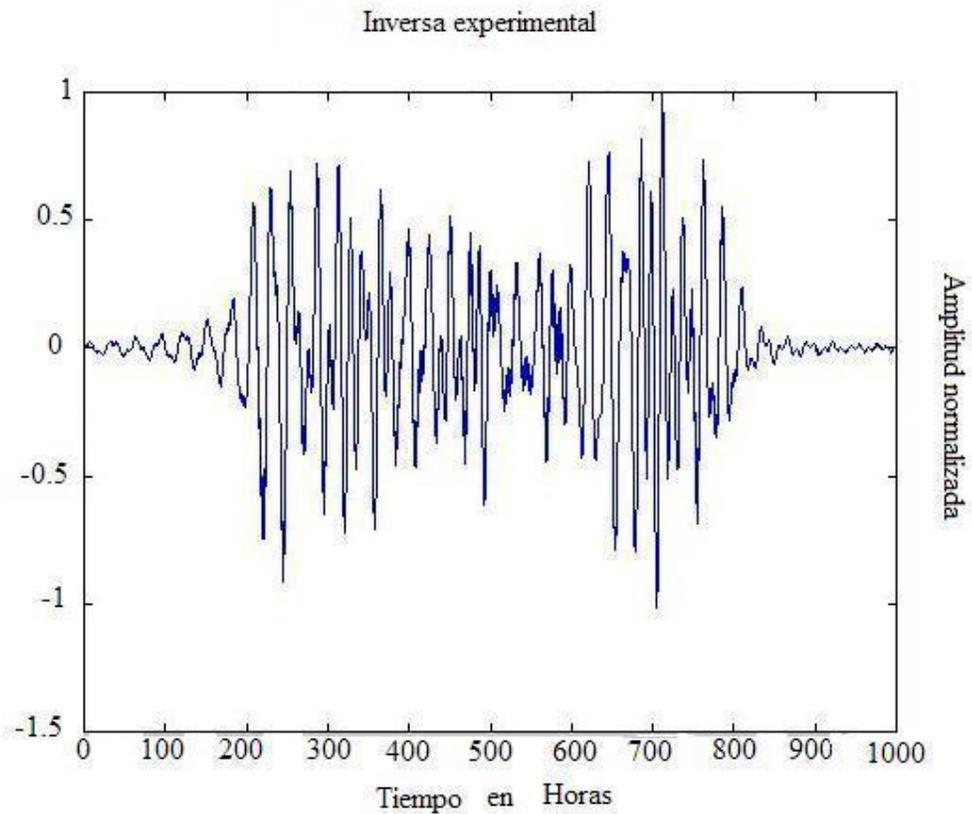


Figura 7.20 Señal real filtrada y normalizada, en el dominio del tiempo.

En la Figura 7.21 se muestra la señal sintética filtrada.

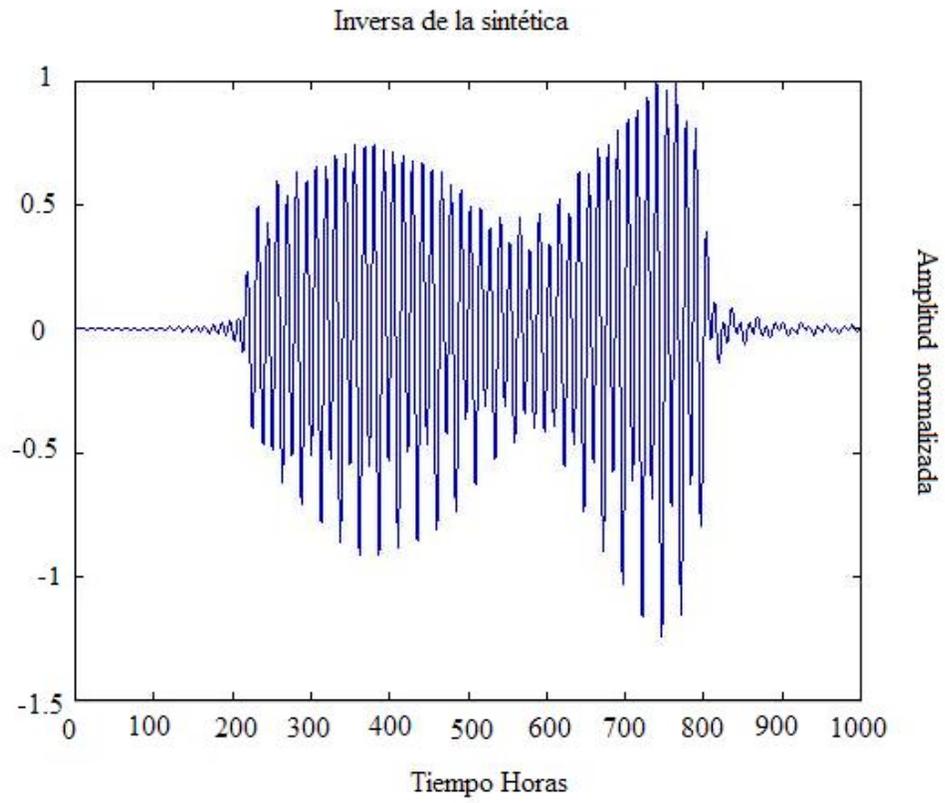


Figura 7.21 Señal sintética filtrada y normalizada.

La Figura 7.22 muestra la comparación de ambas señales en tiempo junto a las distintas fases lunares que ocurrieron durante el experimento. Estas fases ocurrieron en las siguientes fechas: el 16 de Junio a las 6:27 pm Luna Llena y el 1^{ero} de Julio a las 3:20 pm Luna Nueva y fueron estimadas con el programa “Anno Domini”. Obsérvese que las máximas mensuales de la señal sintética. Están en fase con las Lunas. Sin embargo la señal real muestra claramente un desfase

La señal real filtrada muestra la presencia del fenómeno de marea en el yacimiento. La señal experimental esta modulada en amplitud al igual que la señal sintética.

El paso final del estudio consiste en medir el tiempo de retardo que existe entre la señal sintética y la real. Este desfase, esta relacionado con la permeabilidad de la roca en el yacimiento. Para calcular esto, se hizo uso de la crosscorrelación entre la señal real y la sintética. El tiempo de retardo se obtiene a través de la resta del tiempo correspondiente al máximo de la curva de crosscorrelación menos el punto medio de la misma, es decir el intervalo de tiempo correspondiente a ese punto.

Ya que el desfase debía ser constante entre ambas señales se decidió aplicar las crosscorrelación en tres intervalos de tiempo distintos. En la Figura 7.23, se muestra la crosscorrelación de la señales, primero para la fase de Luna llena (Figura 7.23 (a)), en un intervalo de 0 a 70 horas ambos lados del máximo de mareas, el desfase fue de 2.3 horas del mismo modo se hizo con la Luna nueva (Figura 7.23 (b)), obteniendo un desfase de 7.8 horas, por último se hizo la crosscorrelación de todo el intervalo de las señales y se obtuvo 16 horas de desfase (Figura 7.23 (c)). Como los desfases no fueron similares se deduce que el calculo debe ser llevado a cabo en los sectores de ambas señales donde sea confiable la medición, esto es los sectores donde la señal experimental no muestre tanta variación con la señal teórica, así por ejemplo la medición realizada por la crosscorrelación de 2.3 horas a pesar de ser la menor no es confiable por que se hizo en una parte de la curva donde se observa claramente que existen irregularidades obsérvese el período que abarca de la hora 200 a la 500, allí

ocurre una pérdida de energía en la señal experimental ya que las amplitudes no llegan a ser máximas y no conservan la forma de la envolvente, la crosscorrelación de 16 horas tampoco es confiable porque involucra el periodo anteriormente descrito, mientras que la mas confiable para escoger un valor de retardo es la de 7.8 horas debido a que ambas señales son muy parecidas en este intervalo al menos en sus envolventes y es un rango que esta cercano a la recurrencia de la mareas altas y bajas y menor al periodo de las semidiurnas cercanas a las 12 horas.

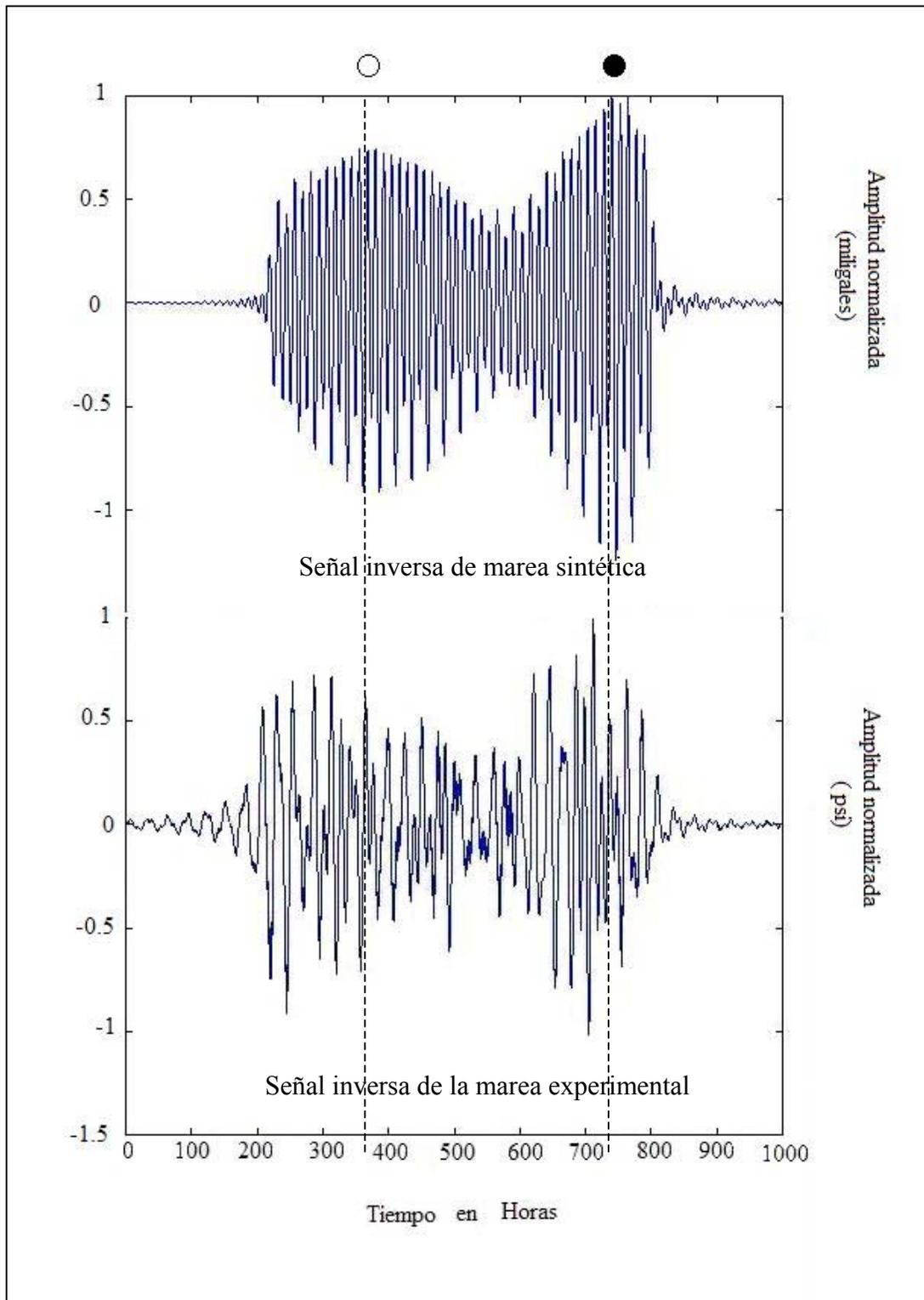


Figura 7.22 Comparación visual de las inversas de la señal experimental y sintética.

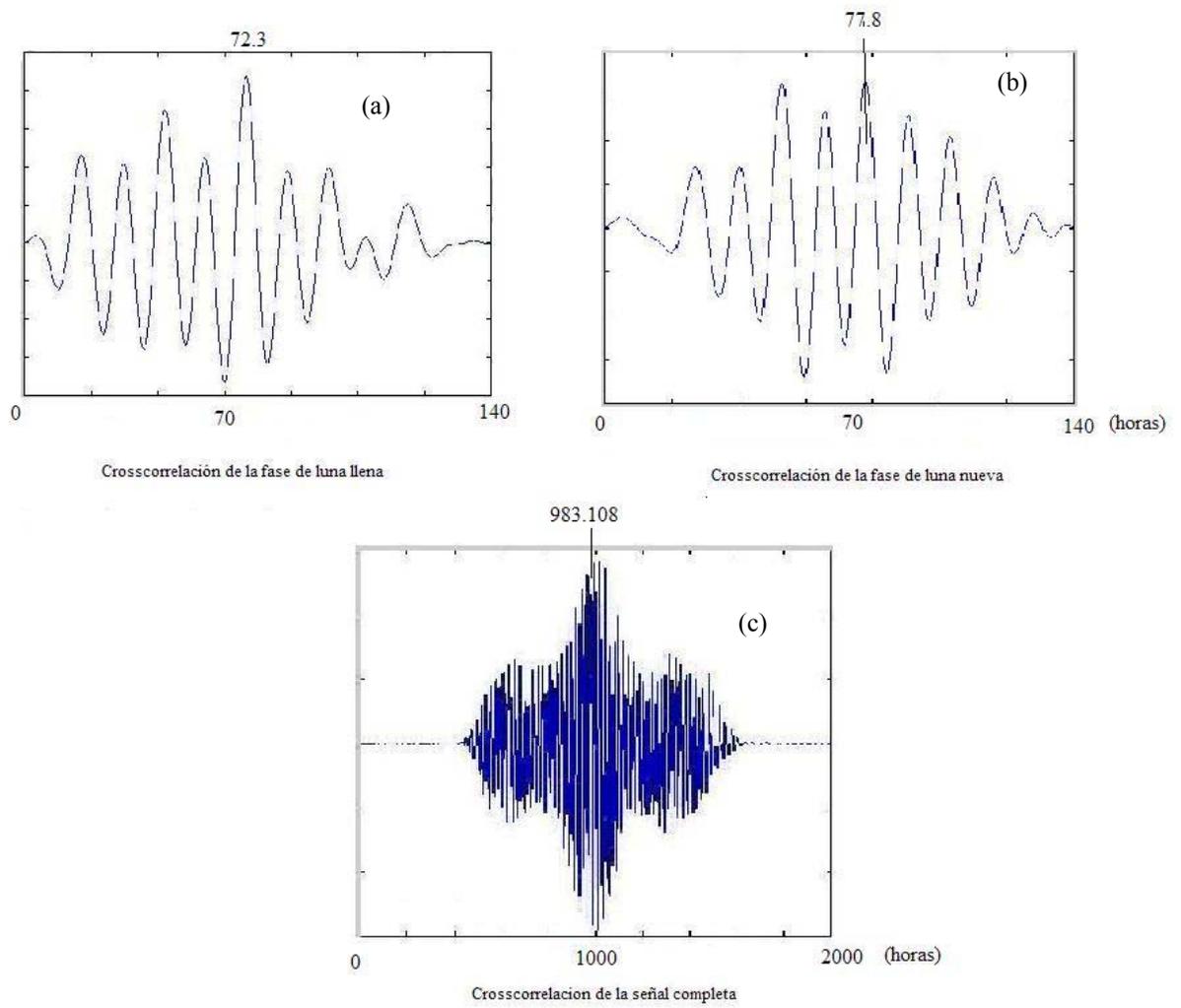


Figura 7.23 Crosscorrelación de las señales experimental y sintética.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

I.- Variación con la Latitud.

Se ha demostrado que para Venezuela es inadecuado el uso de un gradiente de presión hidrostática o normal de 0.433 psi/ft (Tabla 4.3). Este valor corresponde a una gravedad igual a 980.000 miligales; mientras que en Venezuela, las gravedades teóricas, varían entre 978.050 y 978.290. El valor más apropiado a utilizar, para estas gravedades es de 0.432 psi/ft.

La variación del gradiente en las latitudes venezolanas (0° - 14° aproximadamente) se encuentra a partir del cuarto decimal de la cifra anterior.

Si se requiere trabajar en detalle:

a) En las latitudes comprendidas entre 2° y 7° se puede utilizar el valor de 0.43238 psi/ft .(Sur de Venezuela y cuenca de Apure)

b) Para las latitudes entre 8° y 9° el valor de 0.43242 psi/ft (Figura 4.6). (Cuenca de Maracaibo y Cuenca de Oriente)

c) En las latitudes comprendidas entre 10° y 12° el valor de 0.43246 psi/ft. (Costa afuera y Norte de Venezuela)

Por lo que se sugiere utilizar 0.432 psi/ft. como el gradiente de presión en los yacimientos de las diferentes cuencas de Venezuela.

Se comete un error en la estimación de la presión de poros de 17.52 psi y de 42.05 psi a una densidad y profundidad constante en el esfuerzo vertical cuando se usa el valor

de 0.433 psi/ft como gradiente de presión y no el de 0.432 psi/ft adecuado para Venezuela.

Los cambios en la gravedad con la latitud influyen en los esfuerzos “in situ” y en las presiones de poros (Tabla 4.2). La variación de la presión hidrostática normal, teórica del ecuador a los polos, es de 45.55 psi, y la del esfuerzo vertical es de 110 psi. A una profundidad y densidad constante

II.- Variación con la profundidad.

La presión de poros no varía significativamente cuando se hace la gravedad variable con la profundidad, con respecto a los valores obtenidos cuando está permanece constante.

Al comparar el caso 1 del esfuerzo vertical con el caso 1 de la presión de poros, se puede notar que la tasa de crecimiento en unidades de presión es mucho mayor para el esfuerzo vertical que el de la presión de poros, pero esta vez la variación no es con la latitud sino con la profundidad (Figura 5.2).

El esfuerzo efectivo tiene una mayor tasa de crecimiento que el de la presión de poros, mientras que el esfuerzo horizontal tiene la menor tasa de crecimiento de los cuatro regímenes de esfuerzos; esto nos revela una banda de esfuerzos, donde el horizontal es el mínimo esperado (teóricamente hablando) y el vertical, es el máximo de todos.

Al ser comparados los casos 1 y 2 del esfuerzo vertical, podemos concluir que la diferencia es muy pequeña entre los dos, lo cual sugiere que considerar un valor constante de gravedad a medida que se profundiza es una muy buena aproximación, en lo que a estimación de esfuerzos se refiere.

En cuanto a la variación en el gradiente con la profundidad, también se puede concluir que se puede usar un valor constante de gradiente a lo largo del pozo, por lo dicho en la conclusión anterior.

III.- Variación en el Tiempo (Programa. de marea sintética).

Los códigos utilizados MT80 y ETGTAB predicen muy bien los ciclos de mareas vivas y de mareas muertas.

El ETGTAB es un programa que ofrece la facilidad de tener un mejor muestreo temporal, por lo que es más conveniente usarlo para resultados más precisos.

Ambos el MT80 y el ETGTAB también verifican la variación de la marea con la latitud y la longitud.

Al comparar datos sintéticos provenientes de ETGTAB y MT80 con datos reales se demostró que ambos programas son exactos en su predicción de mareas.

IV.- Estudio de señales de presión.

La presencia de una falla mecánica en el período de medición de la prueba, altera la tendencia creciente de la presión y perjudica el modelaje matemático del yacimiento, mientras que a través del análisis armónico de la señal de mareas se puede utilizar esta técnica en la zona de la curva desechada por los ingenieros, para hacer estimaciones de la fase, la cual es un indicador de propiedades físicas dentro del mismo.

La frecuencia a la cual ocurre la falla mecánica no afecta la señal de interés para la elaboración del Análisis Armónico

Los espectros obtenidos a través del Análisis Armónico revelan un ajuste perfecto de la componente M2 o régimen semidiurno de mareas presente en la zona. El ajuste de las otras componentes no es bueno en amplitud pero si lo es en frecuencia, así la señal experimental muestra las amplitudes en las diferentes bandas de frecuencias pero también aparece contaminada por otras frecuencias parásitas que no pudieron ser filtradas. En cuanto a la señal teórica, si se observa un espectro más limpio pero a excepción de M2 las amplitudes de las señales correspondientes a las otras componentes parecen estar atenuadas por alguna especie de filtro y sólo se permite el realce de la componente M2, sin embargo el ajuste de esta componente es bien exacto

La obtención de la inversa de Fourier para la señal experimental nos revela la captación y presencia del fenómeno en el yacimiento. Se recomienda la utilización de un sensor con una resolución, igual o menor a 0,01 psi, ya que las variaciones de mareas se encuentran cubiertas por ese rango.

A pesar de la evidente presencia de ruido en la señal obtenida, se obtuvieron dos ciclos mensuales marcados de las mareas vivas y muertas en la señal inversa experimental. El ruido de altas frecuencia en la señal puede ser causado por error en el instrumental electrónico, filtraje de algunas frecuencias, ruido propio del yacimiento, etc.

El desfase obtenido entre la señal experimental y la sintética es un indicador de la permeabilidad del yacimiento, aunque no son concluyentes los resultados de las crosscorrelaciones, ya que se esperaban valores muy parecidos en los tres sectores de las señales analizadas, un valor estimado de siete horas puede ser tomado como posible tiempo de retardo entre las señales. Debido al análisis de la señal al detalle y la coincidencia de un ciclo muy marcado en las dos curvas pero determinado de manera empírica, es decir por simple observación de la curva, esto introduce errores en la estimación del tiempo de retardo.

Se sugiere para otros estudios empezar con este análisis para determinar el tiempo de desfase o de retardo adecuado para las curvas.

El ciclo de mareas está presente en el yacimiento a la profundidad de 7000; así lo verifica el sensor de presión y la comprobación a través del análisis de Fourier de las diversas componentes armónicas de la marea, dejando el campo abierto para el desarrollo de nuevas investigaciones en el área, que den con una nueva técnica que permita obtener a través del desfase entre una señal medida y teórica valores descriptivos del yacimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andara, M., (1990) Estudio geoquímico sobre rocas madres de las formaciones La Luna y Apón en el pozo 14RN-2X, Campo La Villa, Edo. Zulia, Venezuela; Evidencias de migración primaria. Tesis de Maestría en Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, 98 p.

Blakely, R. (1990) *Potencial Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge Univ.Press. 40 p.

Bracho Magdaleno, C. (1988) *Diccionario de mareas y corrientes*. Caracas. Ministerio de la Defensa, Dirección de Hidrografía y Navegación de la Armada. 168 p.

Bredehoeft J., Jhon (1967) Response of Well-Aquifer Systems to Earth tides. *Journals of Geophysical. Rescarch* 72 (12): 3075 – 3087.

Dobrin, M. (1976) *Introduction to Geophysical Prospecting*. 3ra. Ed. New York Mc Graw Hill Book. 56 p.

Ford R. y J. Houbolt (1963) Las microfacies del Cretáceo de Venezuela occidental *Internat. Sed. Pretorg. Serv.*, 6:67, 109 Lám.; E.J.Brill, (Leiden). Holanda. Resumen (1966) en: *Asoc. Venezolana de Geol. Minas y Petróleo, Bol. Inform.*, 6/5): 151 p.

Garner, A, (1926) Suggested nomenclatura and correlation of the geological formations in Venezuela, *Am. Inst. Min. Metall. Eng. Tr.*, p. 677-684.

Gerhardt, K. (1897-1898) Beitrag zur Kenmtniss der Kreideformation in Venezuela und Peru, *Neues Jahr. Min. Geol. Palaonto*, 11: 65-117.

Grant Gross, M.(1990). Oceanography. Sexta Edición. Macmillan Publishing Company. Año 90. Pág. 97 – 107.

Hedberg H. y L. Sass (1937) Synopsis of the Geologic Formations of the western part of the Maracaibo, basin, Venezuela. Bol. Geol y Min. (Venezuela), 1 (2-4): 73-112.

Jonathan M. y B. Lawrence (1982) Fracture Orientation Analysis by the Solid Earth Tidal Strain Method. Society of Petroleum Engineers (SPE). 11070. 01-20.

Knauss J. (1997) Introduction to Physical Oceanography. Second Edition. Editorial Prentice Hall. 234-244.

Léxico estratigráfico Internet, Sutton 1946, p 1642. Disponible: [http: // www.intevep.pdv.com/ ibc 03/1170w.htm](http://www.intevep.pdv.com/ibc03/1170w.htm).

Liberal L., (1989) El geoide derivado del modulo gravitacional.

Longman I (1960). Journal of Geophysical Research Vol. 65 No.11. Institute of Geophysics University of California. Los Angeles. California. The interpolation of earth-tide records (65), 11.

Melchior P. (1966) Harmonic Analysis of earth tides. Methods in computational Physics, Vol. Academic Press. New York. Oxford Press. Pergamon Press.

Petróleos de Venezuela. Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela (texto en línea) Disponible: [http: // www.intevep.pdv.com/léxico.htm](http://www.intevep.pdv.com/léxico.htm) (Consulta: 2004, enero25).

Renz O. (1959) Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela occidental Bol. Geol. Caracas 5(10): 3-48. Resumen (1960): en Asoc. Venezolana Geol. Min y Petrol. Bol. Inform. 3(7): 209.

Robinson E. y T. Bell (1971) Tides in Confinet well – Aquifer Systems, J. Geophysical Research. Vol. 76 (8). (1971) 1857-1869.

Schlumberger Surencó, C.A. Weec Venezuela. 1997 Evaluación de pozos well evaluation conference (1997)

Schultz A. (1989) Monitoring Fluid movement with the borehole gravity meter, Geophysics. Vol. 54. No. 10 1.989. 1267-1273.

Thurman, H. (1994) Introductory Oceanography. Seventh edition. Macmillan Publishing Company. New York 1994 año de publicación. 252 y 277

Wannell M. y S. Morrison (1990) Vertical Permeability Measurement in New Reservoirs Using Tidal Pressure Changes. Society of Petroleum Engineers (SPE) 20532.35-46..

APÉNDICE A

Sistema Internacional de Unidades.

En este proyecto se utilizan las siguientes unidades físicas para el manejo de algunos cálculos.

A)– Para la gravedad

En el sistema internacional MKS son m/s^2

Los programas de mareas utilizan las unidades en $\frac{\eta m}{s^2}$ estas son equivalentes a 0.0001 miligales.

B) – Para las Presiones.

También en el Sistema Inglés se suele utilizar la libra por pulgada cuadrada como unidad de presión la cual es llamada Pound Square Inch (PSI)= libra por pulgada cuadrada

C) Distancia.

En la industria se suele utilizar la nomenclatura inglesa es decir se miden las distancias en pies (ft).

APÉNDICE B

Programa ETGTAB MT80

El Programa ETGTAB es una subrutina de un sistema de programas llamado ETERNA usado para el análisis de las mareas terrestres, creado este paquete de programas por el profesor Dr. H. –G. Wenzel. El ETGTAB es un programa de predicción de la marea Terrestre diseñado en lenguaje de programación FORTRAN 77.

El programa ETGTAB tiene una rutina muy sencilla de aplicación se usa bajo ambiente modos viene enmarcado dentro del paquete ETERNA por tanto hay que extraerlo de los archivos comprimidos ETER30D1.zip a ETER30D3.zip estos archivos conforman todo el paquete Eterna, una vez instalados en un directorio nombrado como se desee se debe verificar que estén instalados los siguientes archivos,

- ETGTAB.FOR.
- ETGTAB.INP.
- ETGTAB.OUT.
- ETGTAB.PRN.
- ETGTAB.TXT.
- ETGTAB2.EXE.
- ETGTAB3.EXE.

El archivo .FOR es el código fuente del programa ETGTAB posee otras subrutinas, que son llamadas dentro del código, el programa esta en idioma inglés.

El archivo .INP es el archivo de inicio del programa ETGTAB mediante este archivo se introducen los datos de entrada para la predicción de la marea, los datos que contiene este archivo son:

Latitud elipsoidal (en grados)

Longitud elipsoidal (en grados)

Altura elipsoidal en metros

La gravedad es en m/seg^2

El azimut es medido desde el norte en el sentido de las agujas del reloj

Componente de marea terrestre. Va del -1 al 9 puede conseguirse su significado físico en el manual del ETERNA.

Salida del potencial de mareas: va de 0 a 2 en esta tesis se utiliza el potencial 0

Epoca en la que desea iniciar la predicción de la marea los renglones que en la nomenclatura marcan son (año, mes, día, hora).

Número de horas es el tiempo durante el cual se desea realizar la predicción.

Intervalo de tiempo, el programa tiene resolución hasta de segundos, aquí se coloca el periodo de muestreo de la señal, es decir si quieres la señal a cada seg. o a cada hora, pero todo debe ser llevado a segundos.

Potencial de mareas 2 este varía de 0 a 3 y esta descrito en el manual del ETERNA.

Mareas para una Tierra rígida (índice de rigidez igual a 1).

Lo otro es un comentario que viene por defecto con el archivo ETGTAB.INP.

Luego salen descritas las distintas componentes de mareas usadas por el programa.

El archivo .OUT describe la salida del programa es un archivo con los mismos datos en el encabezado del .INP pero que trae al final del mismo los datos de predicción de mareas empezando con la primera columna tenemos el año luego le sigue el mes después el día, luego la hora militar y por último el valor predicho de marea terrestre en Nm/seg².

El archivo .PRN es un archivo de salida a impresora pero esto es para los viejos modelos.

El archivo .TXT es el manual en ingles del ETGTAB..

Los: EXE son las versiones ejecutables del programa se recomienda correr la versión 3 no se deben usar en la misma ejecución los dos programas a la vez, es decir si se ejecuta la versión 3 solo se debe trabajar con esta última versión.

¿Cómo empezar a utilizar el programa?

Antes de modificar el archivo de entrada ETGTAB.INP se debe guardar en un archivo aparte la información que trae por defecto ya que puede ser útil para hacer comparaciones con datos provenientes del eterna u otras pruebas de comparación.

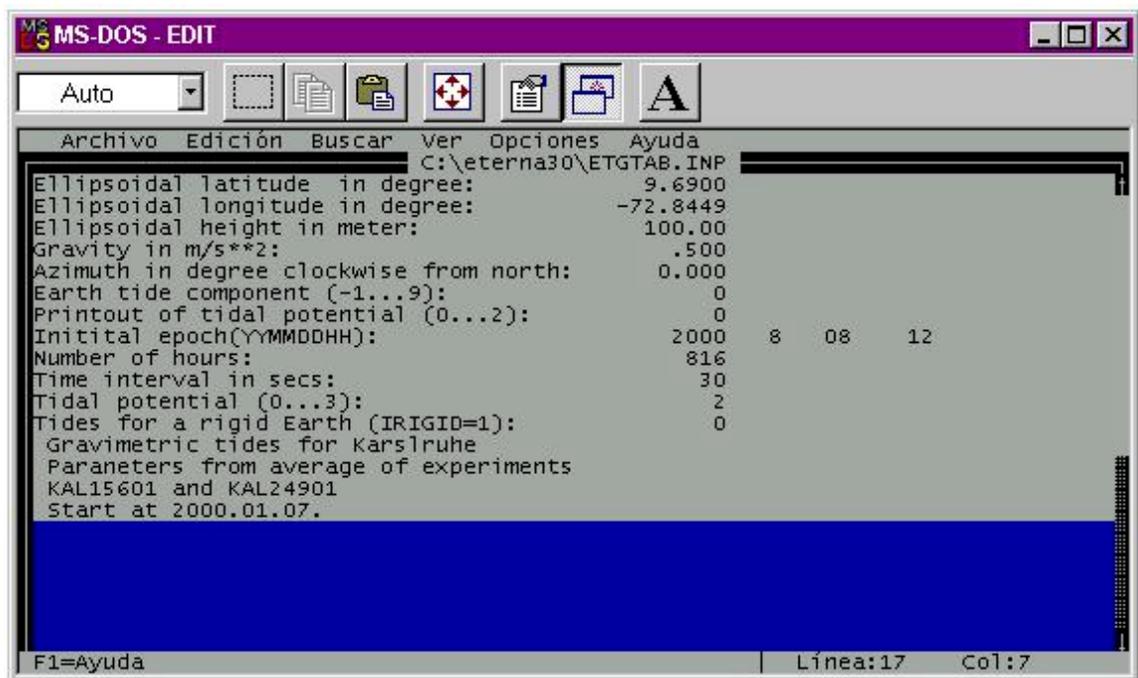
La mecánica para activar el programa es muy simple, es necesario correr el programa bajo sistema operativo MS-DOS y bajo ambiente Windows 98 al menos para esta versión ya que existen otras versiones pero no son muestras libres en la red.

Una vez ubicados en el directorio donde se descomprimen los archivos del ETERNA,

Y desde MS-DOS Se escribe el siguiente comando edit ETGTAB.INP, esto abre el archivo para ser editado y colocar los datos requeridos por el usuario. Una vez modificados los datos anteriormente descritos estos son los campos de latitud, longitud, etc. Se procede a grabar el archivo con el mismo nombre ETGTAB.INP y a regresar nuevamente al ambiente MS-DOS.

De regreso en MS-DOS se debe escribir en lo inmediato el comando ETGTAB 3 reacuérdesse que si se usa este comando no se podrá usar el ejecutable ETGTAB 2. Una vez activado el ETGTAB3 el programa comenzara a hacer las iteraciones necesarias para predecir la marea en el lugar requerido por el usuario.

Luego de terminadas las iteraciones, se deben de verificar los resultados en el archivo de salida ETGTAB.OUT allí quedan grabadas las predicciones de mareas, el contenido del archivo se explico con anterioridad.



Figura, B.1 Imagen del archivo ETGTAB.INP.

Aquí se observan los distintos parámetros necesarios para obtener la predicción de la marea a través del programa ETGTAB, mas adelante (Figura2) se observan las distintas componentes usadas por este programa para generar el modelo de mareas, como se puede observar la frecuencia M3 esta presente en este archivo Inp.

En el manual no se hace una referencia directa a la componente M3 es por esto que se necesita un estudio mas a fondo de este programa generador de mareas.

Linea	Parametro 1	Parametro 2	Parametro 3	Valor 1	Valor 2
14					
1	235	LONG		1.1500	0.0000
286	428	Q1		1.1398	-0.1700
429	438	O1		1.1479	0.1560
489	537	M1		1.1434	0.5290
538	592	P1K1		1.1352	0.2560
593	634	J1		1.1496	-1.6760
635	739	OO1		1.1456	0.8600
740	839	2N2		1.1585	4.4470
840	890	N2		1.1700	0.0060
891	947	M2		1.1810	1.9920
948	937	L2		1.1899	1.5590
988	1121	S2K2		1.1844	0.6590
1122	1204	M3		1.0568	0.9260
1205	1214	M4		1.0200	0.0000+

Figura B2 Componentes de mareas presentes en el programa ETGTAB.

Programa MT80.

El programa Mt80 al igual que el ETGTAB es un programa de predicción de mareas terrestres, la rutina que se utiliza es muy similar a la anterior, es decir se necesita de un archivo de entrada y uno de salida para los datos pero la diferencia esta en el proceso de ejecución del programa.

Para iniciar se necesita cargar un archivo de inicio el cual tiene los parámetros necesarios para arrancar el programa.

Este programa usa un modelador que posee 505 ondas (128 de largo período, 205 diurnas, 155 semidiurnas y 17 terdiurnas). La precisión de este programa al igual que la del ETGTAB es 2000 veces mejor que 5 Nm/seg^2 .

Este programa corresponde al tipo de los así llamados “mareas cero”. Esto significa que la constante de marea M_0S_0 es calculada con un factor de amplitud igual a uno. Esto significa que se supone una respuesta no elástica de la Tierra.

Archivo de entrada.

Registro de estación.

Este registro posee varias posiciones donde se introducen los datos que se desean estudiar para una explicación a detalle de los mismos se puede ver que es cada cosa en el manual de este programa.

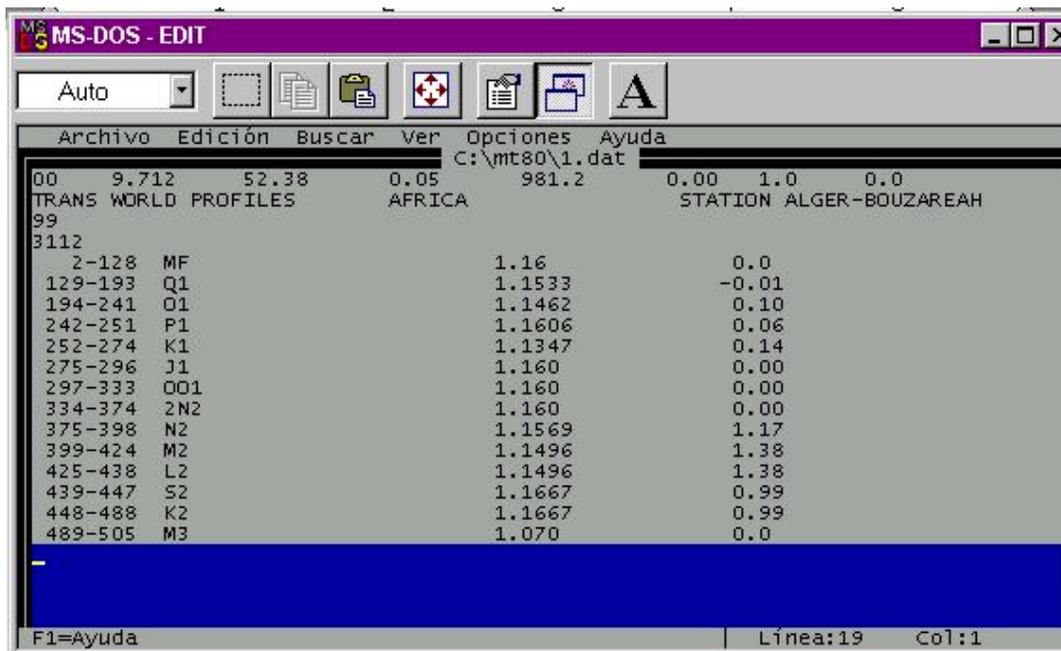


Figura B3 Datos de entrada del programa MT80.

Ejecución del programa.

Hay que hacer ciertos diálogos dentro de la rutina antes de ejecutar el programa estos son:

Nombre del archivo para la estación, el máximo de caracteres alfanuméricos que pueden colocarse son 25 caracteres.

Opciones por defecto: Si o No.

Si es la opción recomendada por facilidades de uso, pero si se escoge la opción del No, se deben agregar parámetros adicionales.

Introduce la tasa de muestreo 0= hora, 1 = 30 minutos, 2 = un minuto, 99= fin.

El programa debe preguntar la fecha de inicio y la de término.

El programa comienza a iterar después de esto, si se desea parar antes de tiempo escriba 99, y al final del mismo también.

La respuesta es impresa en el archivo mt80.out.

APÉNDICE C

Programa creado en matlab para generar las curvas.

```
load settotal.prn

dt = 30/3600;
df = 1/(2*30);
f=(0:df:262144)/262144;
Tmax=dt*524288-1;
Tiempo=(0:dt:Tmax);

Y1 =settotal(1:76000,5);
```

```

X1 =settotal(1:76000,1);

Sinte1 =settotal (1:76000,4)-mean(settotal (1:76000,4));

% Con esto se construye la curva de aproximación
% A es la recta de ajuste de todo el Build up

a = 0.1225.*(X1)+2970;

% S es la señal residual al restar la tendencia lineal

Y2 = (Y1-a+3.035)';

Y =Y2 (1,2000:71750);
Sinte2 =Sinte1 (2000:71750);

Exp = [zeros(1,226269) Y zeros(1,226269)];
Sinte = [zeros(1,226269) Sinte2' zeros(1,226269)];

FExp = fft(Exp,524288);
PFExp = FExp.*conj(FExp)/max(FExp.*conj(FExp));

FSinte = fft(Sinte,524288);
PFSinte = FSinte.*conj(FSinte)/max(FSinte.*conj(FSinte));

Tempor = [zeros(1,149) FExp(150:398) zeros(1,260746) zeros(1,260748)
FExp(521892:522140) zeros(1,148)];
Inver= IFFT (Tempor, 524288);

```

```

t=real (Inver);
datareal=t(200000:320000)/max(t);

Tempor1 = [zeros(1,149) FSinte(150:398) zeros(1,260746) zeros(1,260748)
FSinte(521892:522140) zeros(1,148)];
Inver1= IFFT(Tempor1,524288);
t1=real (Inver1);
datasinte=t1(200000:320000)/max(t1);

% DIURNAS
Q1 = 1/(26.37*3600);
O1 = 1/(25.82*3600);
N1 = 1/(24.86*3600);
P1 = 1/(24.07*3600);
K1 = 1/(23.93*3600);
OO1= 1/(22.30*3600);

% SEMIDIURNAS
N2 = 1/(12.66*3600);
M2 = 1/(12.42*3600);
L2 = 1/(12.19*3600);
S2 = 1/(12.00*3600);
K2 = 1/(11.97*3600);

Amplitudes = max (PFExp (160:540))*[14 41.5 13 19.3 58.4 15 19.1 100 12 46.6
12.7]/100
Componentes = [Q1 O1 N1 P1 K1 OO1 N2 M2 L2 S2 K2];

% Espectro fourier experimental normalizado.

```

Figure(3)

```
plot(f(160:540),PFExp(160:540/max(PFExp(160:540)))
```

```
hold on
```

```
plot(Componentes(1:11),Amplitudes(1:11),'r*').
```

% Espectro de Fourier sintético normalizado.

Figure(4)

```
plot(f(160:540),PFSinte(160:540/max(PFSinte(160:540))).
```

```
hold on
```

```
plot (Componentes(1:11),Amplitudes(1:11),'r*').
```

% Crosscorrelación de 16 horas.

```
cr16=xcorr (data sinte, data real);
```

```
plot(Tiempo (1:240001), cr16);
```

% inversa de la señal sintética.

```
Plot (Tiempo (1:120001), data sinte).
```

% inversa de la señal experimental.

```
Plot (Tiempo (1:120001), data real).
```