

CAPÍTULO 5 NIVELES DE AGUA Y FLUJO

1. INTRODUCCIÓN

El propósito de este capítulo es dar al hidrógrafo y al lector técnico la información básica requerida para comprender y aplicar los niveles de agua, productos derivados del nivel de agua y datums, y de las corrientes de agua para llevar a cabo operaciones de campo para ayudar los levantamientos hidrográficos y las actividades cartográficas. El hidrógrafo está preocupado no solo de la elevación de la superficie marina, que está afectada significativamente por las mareas, sino que también lo está por la elevación de la superficie de los lagos y los ríos, donde los fenómenos de marea pueden tener un efecto menor. El término “marea” es aceptado tradicionalmente y utilizado ampliamente por los hidrógrafos en conexión con la instrumentación utilizada para medir la elevación de la superficie del agua, si bien el término “nivel de agua” sería más correcto técnicamente. El término “corriente” similarmente es aceptado en muchas áreas en conexión con las corrientes de marea; sin embargo, las corrientes de agua son afectadas mayormente por mucho más que las fuerzas que producen las mareas. El término “flujo” es utilizado en vez de corriente.

Las fuerzas de mareas juegan un rol tan importante en completar la mayoría de los levantamientos hidrográficos que las fuerzas de producción de mareas y las variaciones de mareas básicas son sólo descritas en general con las referencias técnicas apropiadas en este capítulo. Es importante para el hidrógrafo comprender por qué las características de la marea, del nivel de agua y de la corriente de agua varían en tiempo y espacialmente, de manera que ello sea tomado en cuenta por completo para el planeamiento del estudio y de las operaciones que llevarán a cabo la producción exitosa de levantamientos precisos y de cartas.

Ya que los procedimientos y las aproximaciones para medir y aplicar los niveles de agua, mareas y corrientes varía dependiendo del país, este capítulo cubre los principios generales utilizando ejemplos documentados como sea necesario para la ilustración.

2. MAREAS Y NIVELES DE AGUA

2.1 Principios de las mareas y de los niveles de agua

Las mareas observadas en cualquier puerto dado son el resultado de muchos factores, incluyendo la respuesta del fondo del océano a las fuerzas de producción de mareas, a las modificaciones de la marea debido a los efectos de aguas poco profundas de bahías y ríos locales a los efectos regionales y locales del clima en los niveles de agua.

2.1.1 Fuerzas astronómicas de producción de mareas

En la superficie de la Tierra, la atracción gravitacional de la Tierra actúa en dirección interna hacia su centro de masa y esto mantiene las aguas del océano confinadas a esta superficie. Sin embargo, las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol, y la fuerza centrífuga del sistema Sol-Tierra-Luna, actúan externamente sobre las aguas del océano de la Tierra. Estas fuerzas externas son ejercidas como fuerzas de producción de marea o fuerzas de tracción. Sus efectos son superpuestos a la fuerza gravitacional de la Tierra y actúan para delinear las aguas del océano horizontalmente a varios puntos de la superficie de la Tierra.

Una marea alta es producida en aguas de océano por la acción “cumulativa” que resulta del flujo horizontal del agua hacia la región de máxima atracción de las fuerzas gravitacionales combinadas lunar y solar. Una marea alta adicional es producida en una posición en el lado opuesto de la Tierra, donde la fuerza centrífuga del sistema orbital predomina sobre la atracción gravitacional del Sol y de

la Luna. Las mareas bajas son creadas por un alejamiento compensado de las aguas de las regiones alrededor del centro de la Tierra entre estas dos protuberancias de mareas. La alteración de las mareas altas y bajas es causada por la rotación diaria (o diurna) del cuerpo sólido de la Tierra en relación a estas dos protuberancias de marea y a la depresión de la marea. Los cambiantes tiempos de llegada de cualquier dos mareas altas o bajas en cualquier ubicación son el resultado de factores numerosos. Las fuerzas de producción de marea básicas tienen dos componentes debido al Sol (solar) y a la Luna (lunar).

2.1.1.1 Origen de las fuerzas de producción de mareas

A un observador en la Tierra le parece que la Luna rota alrededor de la Tierra, pero en realidad la Luna y la Tierra rotan alrededor de su centro común de masa conocido como el *baricentro*. Los dos cuerpos astronómicos tienden a atraerse por la atracción gravitacional y simultáneamente a separarse por la fuerza centrífuga producida a medida que rotan alrededor del baricentro. La atracción gravitacional y centrífuga son iguales en magnitud y opuestas en dirección; por lo que la Tierra y la Luna no son haladas hacia sí mismas ni son separadas de ellas mismas. Hay un efecto similar para el sistema de la Tierra y el Sol, pero ellas son separadas y distintas a las de la Tierra y la Luna (por los componentes solares y lunares).

Estas fuerzas gravitacionales y centrífugas son balanceadas solamente en los centros de masa de los cuerpos individuales. En puntos sobre o dentro de los cuerpos, las dos fuerzas no están en equilibrio, dando resultado a las mareas del océano, atmósfera y litosfera. En la cara de la Tierra que mira la Luna o el Sol, una fuerza de producción de marea neta (o diferencial) actúa en la dirección de la atracción gravitacional de la Luna o del Sol o hacia la Luna o el Sol. En la cara de la Tierra directamente opuesta a la Luna o al Sol, la fuerza de producción de marea neta actúa en dirección a la mayor fuerza centrífuga o lejos de la Luna o el Sol.

2.1.1.2 Fuerza centrífuga

El baricentro del sistema de la Tierra/Luna está en un punto aproximado de 1.700 km por debajo de la superficie de la Tierra, en el lado hacia la Luna, y a lo largo de una línea que conecta los centros individuales de masa de la Tierra y la Luna (Figura 5.1). El centro de masa de la Tierra describe una órbita (E1, E2, E3...) alrededor del baricentro (G) justo a medida que el centro de masa de la Luna describe su propia órbita mensual (M1, M2, M3...) alrededor de este mismo punto.

A medida que la Tierra rota alrededor del baricentro, la fuerza centrífuga producida en el centro de masa de la Tierra es dirigida fuera del baricentro en la misma manera en la que un objeto enrollado con una cuerda gira alrededor de la cabeza de alguien ejerciendo un forcejeo en la mano que lo sostiene. Debido a que el centro de masa de la Tierra está al lado opuesto del baricentro a la Luna, la fuerza centrífuga producida en el centro de masa de la Tierra es alejada de la Luna. Todos los puntos dentro o sobre la superficie de la Tierra experimentan la misma magnitud y dirección de esta fuerza centrífuga. El hecho es indicado por la dirección común y la longitud de las flechas representando la fuerza centrífuga (F_c) en los puntos A, B y C en la Figura 5.1 y las flechas delgadas en estos mismos puntos en la Figura 5.2. De manera similar, el baricentro del sistema de la Tierra/Sol está en un punto bien adentro del Sol porque el Sol tiene más masa en comparación con la Tierra; sin embargo la misma teoría se aplica.

Es importante notar que la fuerza centrífuga producida por la rotación diaria de la Tierra en su propio eje no tiene consecuencias en la teoría de las mareas. Este elemento no juega una parte en la creación de las fuerzas de producción de mareas ya que la fuerza en cualquier ubicación particular permanece constante con el tiempo, de manera que la superficie del agua está siempre en equilibrio con respecto a éste.

Los círculos sólidos y respunteados representan las secciones de cruce cercanas al ecuador a través de la Tierra, contienen el plano de la órbita de la Luna al rededor del baricentro (G). Los Puntos E1, E2, E3 y M1, M2, M3 son las posiciones correspondientes de los centros de masa de la Tierra y la Luna respectivamente.

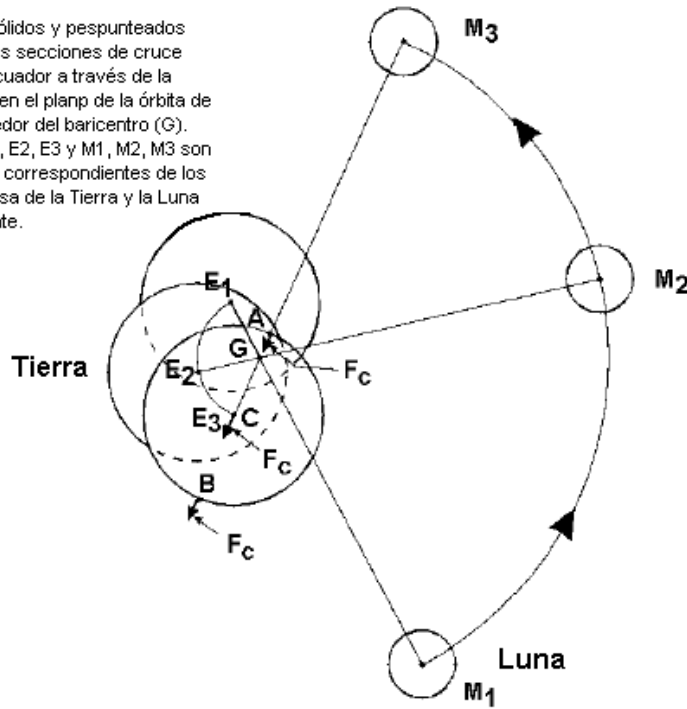
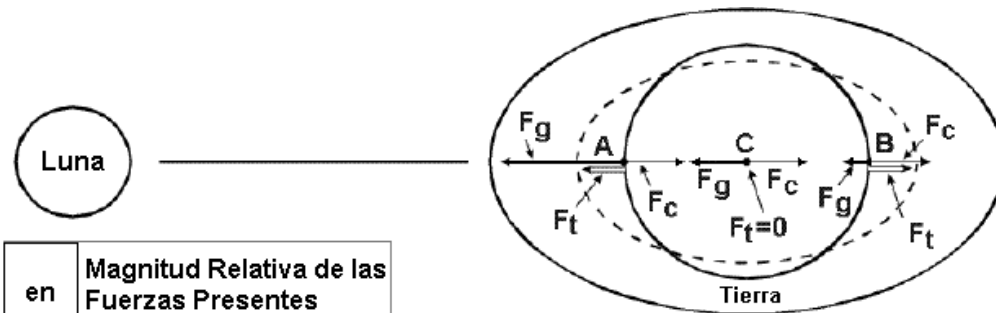


Fig. 5.1

Tipo de Fuerza	Designación
F_c = fuerza centrífuga debido a la revolución de la Tierra al rededor del baricentro	flecha delgada
F_g = fuerza gravitacional debido a la Luna	flecha gruesa
F_t = fuerza resultante del levantamiento de marea debido a la Luna	flecha de doble punta



en	Magnitud Relativa de las Fuerzas Presentes
A	$F_g > F_c > F_t$ \checkmark \parallel \checkmark
C	$F_g = F_c > 0$ \checkmark \parallel \wedge
B	$F_g < F_c > F_t$

Una sección de cruce norte-sur a través del centro de la Tierra en el plano del ángulo de hora de la Luna; el elipse respunteado representa un perfil a través del esferoide componiendo la fuerza de marea envolvente; el elipse sólido muestra el efecto resultante en las aguas de la Tierra

Fig. 5.2

2.1.1.3 Fuerza gravitacional

Mientras que el efecto de la fuerza centrífuga externa es constante en todos los puntos de la Tierra, el efecto de la fuerza gravitacional producido por otro cuerpo astronómico cambia de lugar en lugar. Esto es porque la magnitud de la fuerza gravitacional ejercida varía con la distancia del cuerpo atrayente. Entonces, en la teoría de las mareas, otra variable de influencia es introducida, basada en las distancias diferentes de varios puntos de la superficie de la Tierra desde el centro de masa de la Luna. La atracción gravitacional relativa ejercida por la Luna en varias posiciones en la Tierra es indicada en la Figura 5.2 con las flechas identificadas con F_g que son más gruesas que aquellas que representan los componentes de la fuerza centrífuga.

Semejante al hecho de que la propia fuerza centrífuga de la Tierra no juega papel en la producción de mareas, los efectos de la fuerza gravitacional de la Tierra no juegan papel directo en el origen de las mareas. Una vez más, esto es debido a que la fuerza gravitacional de la Tierra en cualquier ubicación particular permanece constante con el tiempo.

2.1.1.4 Fuerzas de producción de mareas diferenciales

La fuerza centrífuga que actúa en el centro de la Tierra como el resultado de su giro alrededor del baricentro es igual y opuesta a la fuerza gravitacional ejercida por la Luna en el centro de la Tierra. Esto se indica en el punto C en la Figura 5.2 con las flechas delgadas y gruesas de igual tamaño, apuntando en direcciones opuestas. El resultado neto de esta circunstancia es que la fuerza de producción de mareas (F_t) en el centro de masa de la Tierra es cero.

El punto *sublunar*, Punto A en la figura 5.2, está aproximadamente a 6.400 kms más cerca de la Luna que el punto C. Aquí, la fuerza producida por la atracción gravitacional de la Luna es mayor que la fuerza gravitacional en C debido a la Luna; ya que la fuerza centrífuga es en todas partes igual y opuesta a la atracción gravitacional de la Luna en el centro de masa de la Tierra, la atracción gravitacional en el punto A sobrepone la fuerza centrífuga, para una fuerza neta en dirección a la Luna. Esto está indicado en la Figura 5.2 por la flecha de doble punta. La marea resultante en el lado de la Tierra hacia la Luna es conocida como la *marea directa*.

En el lado opuesto de la Tierra, el *punto antipodal*, Punto B, está cerca de los 6.400 km más retirado de la Luna que el punto C, la fuerza gravitacional de la Luna es menor que la de C; ya que la fuerza gravitacional en el punto B es mayor que la atracción gravitacional de la Luna en el punto C, la fuerza resultante de producción de mareas en este punto es una vez más dirigida lejos del centro de la Tierra. La fuerza es indicada con la flecha de doble punta en el punto B. La marea producida en el punto *antipodal* es conocida como *marea opuesta*.

Existe también una estructuración similar de fuerzas diferenciales en el sistema Tierra/Sol.

2.1.1.5 Fuerza de atracción

Las fuerzas de producción de mareas tienen una magnitud de sólo cerca de 9 millonésimos de la atracción gravitacional de la Tierra. Las fuerzas de producción de mareas, por lo tanto, son totalmente insuficientes para notablemente levantar el agua en contra de la atracción de la gravedad de la Tierra. En su lugar, las mareas son generadas por el componente horizontal de las fuerzas de producción de mareas. En cualquier punto de la superficie de la Tierra, la fuerza de producción de mareas puede ser resuelta en dos componentes – uno vertical, o perpendicular a la superficie de la Tierra, y otro horizontal, o tangencial a la superficie de la Tierra; ya que el componente horizontal no se opone de ninguna manera a la gravedad, puede actuar para desplazar partículas de agua libremente sobre la superficie de la Tierra hacia los puntos *antipodal* y *sublunar*.

El componente horizontal, conocido como el componente de fuerza de atracción (desplazamiento), es el mecanismo actual para producir las mareas. La fuerza de atracción es cero en los puntos *sublunar* y

antipodal, ya que la fuerza de producción de mareas es completamente vertical en estos puntos; entonces, no hay componente horizontal. Cualquier agua acumulada en estas ubicaciones por flujo de desplazamiento de otros puntos de la superficie de la Tierra tiende a permanecer en una configuración estable, o en una “protuberancia” de marea. Entonces existe una tendencia constante para que el agua sea desplazada desde otros puntos de la superficie de la Tierra hacia el punto *sublunar* (A en la Figura 5.2) y su punto *antipodal* (B en la Figura 5.2), y para ser apilado en estos puntos en dos protuberancias de mareas. Como un caso especial de la Ley de Gravedad Universal de Newton, la fuerza de producción de mareas varía inversamente al cubo de la distancia al centro de masa del cuerpo atrayente desde un punto dado en la superficie de la Tierra.

Dentro de una banda alrededor de la Tierra aproximadamente a medio camino entre los puntos *sublunar* y *antipodal*, la fuerza de atracción es también cero, ya que la fuerza de producción de mareas es directamente vertical. Hay, por lo tanto, una tendencia para la formación de una depresión estable en esta región.

2.1.1.6 La envolvente de la fuerza de marea

Si las aguas oceánicas fueran a responder exclusivamente a las fuerzas de tracción y la Tierra estuviera cubierta de agua sin continentes, la superficie del agua se aproximaría a la forma de un esferoide alargado. El eje mayor del esferoide estaría a lo largo de una línea que conecte los centros de la masa de la Tierra y de la Luna, el eje menor estaría centrado en ángulo recto con respecto al eje mayor. Las dos protuberancias de la marea y las depresiones de marea están representadas en esta envolvente de las fuerzas por las direcciones de los ejes mayor y menor respectivamente. Desde un punto de vista puramente teórico, la rotación diaria de la Tierra sólida en relación a estas dos protuberancias de marea y la depresión pueden ser concebidas como la causa de las mareas lunares. En relación al Sol, las protuberancias resultantes y las depresiones pueden concebirse como la causa de las mareas solares.

A medida que la Tierra rota, uno puede esperar idealmente encontrar una marea alta seguida de una marea baja en el mismo lugar 6 horas después, luego la segunda marea alta después de las 12 horas y así sucesivamente. Este sería el caso cercano si la Tierra libre de continentes, sin obstáculos estuviera cubierta de agua con profundidad uniforme, si la fuerza de marea de la Luna pudiera ser considerada exclusivamente, la posición de la Luna sería fija e invariable en la distancia y en la orientación relativa en relación a la Tierra y al Sol y si no hubiera otra influencia aceleradora o retardadora afectando los movimientos de las aguas de la Tierra; sin embargo esto está lejos de la situación verdadera.

Primero, la envolvente de la fuerza de marea producida por el efecto de la Luna es acompañada por, e interactúa con, una fuerza de marea producida por el Sol. La fuerza de mareas que ejerce el Sol es la resultante de la atracción gravitacional del Sol y la fuerza centrífuga creada por la revolución de la Tierra alrededor de la masa de centro del sistema Tierra-Sol. La posición de esta envolvente de la fuerza cambia con la posición orbital relativa de la Tierra en relación al Sol; debido a la gran diferencia entre las distancias promedio de la Luna y el Sol desde la Tierra (384.400 km y 150.000.000 km respectivamente), la fuerza de producción de mareas de la Luna es aproximadamente 2.5 veces la del Sol, aunque el Sol es mucho más grande que la Luna.

Segundo, existe un amplio rango de variables astronómicas en la producción de mareas. Algunas de éstas son las distancias cambiantes de la Luna desde la tierra y de la Tierra desde el Sol, el ángulo que la Luna en su órbita forma con el ecuador de la Tierra, el ángulo en el que el Sol aparece en la órbita anual alrededor de la Tierra y de la fase variable de la Luna con respecto al Sol y la Tierra. Algunas de los principales tipos de mareas que resultan de estas influencias puramente astronómicas que están descritas más abajo.

Tercero, otros efectos vienen al caso, causando que el nivel del agua difiera de la marea inducida astronómicamente. Estos incluyen las restricciones del flujo del agua causado por los continentes y los efectos meteorológicos, entre otros.

2.1.2 Características de las mareas

Las características reales de las mareas en localidades alrededor de la Tierra difieren significativamente de las mareas envolventes discutidas anteriormente. Primero que todo, el agua es un fluido casi viscoso, que cumple con su repuesta a las fuerzas generadoras de mareas. Asimismo, la Tierra no es una esfera lisa con agua uniformemente profunda cubriéndola en toda su extensión. Los movimientos de marea son afectados por la fricción con el fondo oceánico y con otras corrientes oceánicas; los continentes interrumpen, restringen y reflejan los movimientos de marea; la forma y el tamaño de los fondos oceánicos acentúan o disminuyen varios componentes de las fuerzas de producción de mareas.

El ascenso y descenso de la marea no ocurren a una velocidad uniforme. A partir de la bajamar, la marea comienza a subir muy lentamente al principio, con un incremento constante de velocidad que se mantiene alrededor de 3 horas, cuando la velocidad es máxima. El ascenso continúa alrededor de 3 horas más, con un constante decrecimiento de velocidad hasta la pleamar. La marea bajante sigue un patrón similar de incremento y decrecimiento de velocidad. Cuando se representa gráficamente el ascenso y descenso de la marea, se puede ver la forma aproximada de una curva de seno. En cualquier ubicación, sin embargo, el ascenso y descenso de la marea, y en consecuencia la forma de la curva, será caracterizada por una variedad de factores. Estos factores variarán considerablemente de lugar en lugar. De estas características, tres pueden ser consideradas como el principio constituyente de las características de la marea. Estos son los tres factores; el tiempo de la marea, la amplitud de la marea y el tipo de la marea. El hidrógrafo debe entender y considerar cada una de estas tres características para completar y aplicar las reducciones de mareas a los sondeos.

2.1.2.1 Tiempo de la marea

Una luna estacionaria parecería que atraviesa el meridiano en un punto dado una vez al día; pero, ya que la Luna gira alrededor de la Tierra en la misma dirección en la que la Tierra está rotando, cualquier punto de la Tierra debe rotar realmente 12.5° extra aproximadamente cada día para igualar a la Luna. Estos 12.5° requieren de cerca de 50 minutos, resultando en “un día lunar” de 24 horas y 50 minutos.

El tiempo de la marea se refiere al tiempo de ocurrencia de la pleamar y de la bajamar en relación al pasaje del meridiano de la Luna. Esta característica de la marea en un lugar específico es descrita por los intervalos “*lunitidales*” de la pleamar y bajamar. El intervalo lunitidal es el tiempo transcurrido entre un pasaje meridiano de la Luna y la pleamar o bajamar. Los intervalos lunitidales no son constantes a lo largo de cualquier meridiano dado. Los intervalos varían, basados en la interrupción de la onda de marea por las masas de tierra y por la resistencia del fondo oceánico a medida que la onda se mueve en aguas pocas profundas.

Los intervalos no son constantes, aun en un lugar determinado, pero estos varían periódicamente dentro de ciertos límites. Esta variación limitada en el intervalo lunitidal resulta de la interacción entre las fuerzas de marea de la Luna y el Sol. Entre Luna nueva y el primer cuarto, y entre la Luna llena y el tercer cuarto, esta interacción puede causar la aceleración en los tiempos de llegada de la marea. Entre el primer cuarto y la Luna llena, y entre el tercer cuarto y la Luna nueva, la interacción puede resultar en un rezago de la llegada de la marea.

Los intervalos lunitidales son definidos en términos del pasaje de la Luna sobre el meridiano de Greenwich y el pasaje de la Luna sobre el meridiano de la longitud local. Estos son conocidos respectivamente como el intervalo lunitidal de Greenwich y el intervalo lunitidal local. Los intervalos Greenwich son más útiles para relacionar los tiempos de mareas en un lugar con los de otro lugar. El

tiempo de la marea es importante para el análisis y predicción de las mareas y en el cálculo de los correctores de las zonas de mareas.

2.1.2.2 Amplitud de la marea

La diferencia en altura entre pleamar y bajamar consecutivas en un lugar determinado es conocida como la amplitud. En el océano abierto, la altura real de la cresta de la onda de marea es relativamente pequeña (usualmente de 1 m o menos) y es uniforme. Es sólo cuando las crestas de la marea se mueven a las aguas poco profundas, contra las masas de tierra, y en los canales de confinamiento que la gran amplitud de marea y las variaciones notables en la amplitud son aparentes.

La amplitud de la marea en un lugar en particular no es constante, sino que varía día a día. Parte de esta variación es causada por los efectos del viento y del clima, pero mayormente es un fenómeno periódico relacionado con las posiciones del Sol y de la Luna en relación a la Tierra, en este cambio de día a día, la marea responde a tres variaciones, cada una asociada con un movimiento particular de la Luna.

Efectos de Fase Lunar: Mareas de Sicigias y Mareas de cuadratura – En la mayoría de los lugares, la fase de la Luna tiene el mayor efecto sobre la amplitud de la marea. Se ha notado que las mareas originadas por los efectos combinados de las fuerzas de tracción generadas por el Sol y la Luna; debido a la posición cambiante de la Luna en relación a la Tierra y al Sol (Figura 5.3) durante sus fases de ciclo mensual, las fuerzas de tracción generadas por la Luna y el Sol actúan de distinto modo a lo largo de una línea común y en los ángulos cambiantes relativos a cada uno.

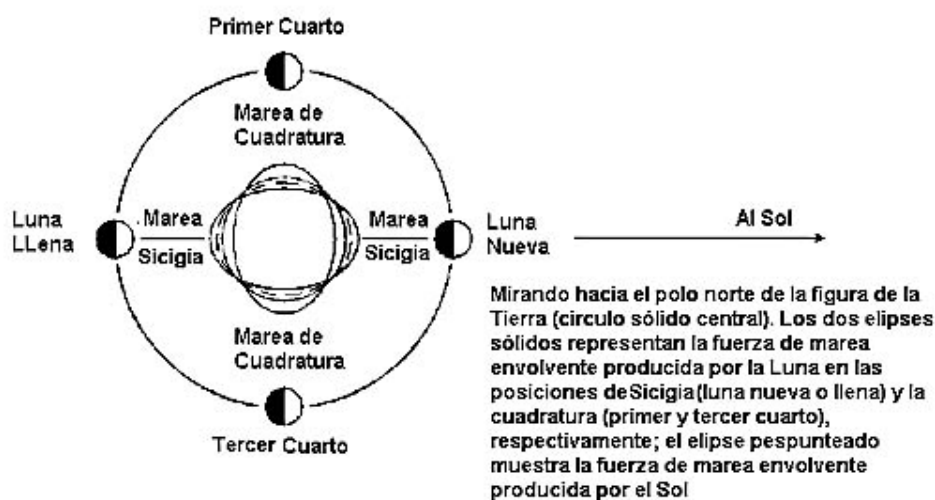


Fig. 5.3

Cuando la Luna está en la fase nueva y en la llena (ambas posiciones se llaman sicigia), las atracciones gravitacionales de la Luna y el Sol actúan para reforzarse mutuamente; a medida que el resultante o la fuerza combinada de marea es mayor en todos los lugares que muestran una pleamar o una bajamar consecutivas. Dichas mareas mayores al promedio resultante de las posiciones sicigia de la Luna son conocidas como mareas Sicigias – Un término que implica una “subida” del agua y no tiene ninguna relación con el momento del año.

En las fases del primer y tercer cuarto (cuadratura) de la Luna, las atracciones gravitacionales de la Luna y del Sol sobre las aguas de la Tierra son ejercidas formando un ángulo recto entre sí. Cada fuerza tiende a contrarrestar la otra. En la envolvente de la fuerza de marea que representa estas fuerzas combinadas, se reducen los valores de fuerza máxima y mínima. Las mareas altas son más bajas del promedio y las bajas son más altas. Estas mareas de amplitud disminuida se llaman mareas de cuadratura, de la palabra Griega “escaso”.

Efectos de Paralaje (de la Luna y el Sol)- Ya que la Luna sigue un patrón elíptico (Figura 5.4), la distancia entre la Tierra y la Luna variará a través del mes en cerca de 50.000 km. La atracción gravitacional de la Luna para las aguas de la Tierra cambiará en proporción inversa al cubo de la distancia entre la Tierra y la Luna, de acuerdo con la variación de la Ley de Gravedad de Newton mencionada anteriormente. Una vez cada mes, cuando la Luna está más cerca de la Tierra (perigeo), las fuerzas generadoras de mareas serán más altas de lo normal, por lo que se producirán mareas de amplitud por encima del promedio. Aproximadamente 2 semanas después, cuando la Luna (en apogeo) está más alejada de la Tierra, la fuerza de producción de marea lunar será más pequeña y las amplitudes de mareas serán menores al promedio. De igual manera, en el sistema Sol-Tierra, cuando la Tierra está más cerca al sol (perihelio), cerca del 2 de enero de cada año, las amplitudes de marea aumentarán y cuando la Tierra está más lejos del Sol (afelio), alrededor del 2 de julio, las amplitudes de marea se reducirán.

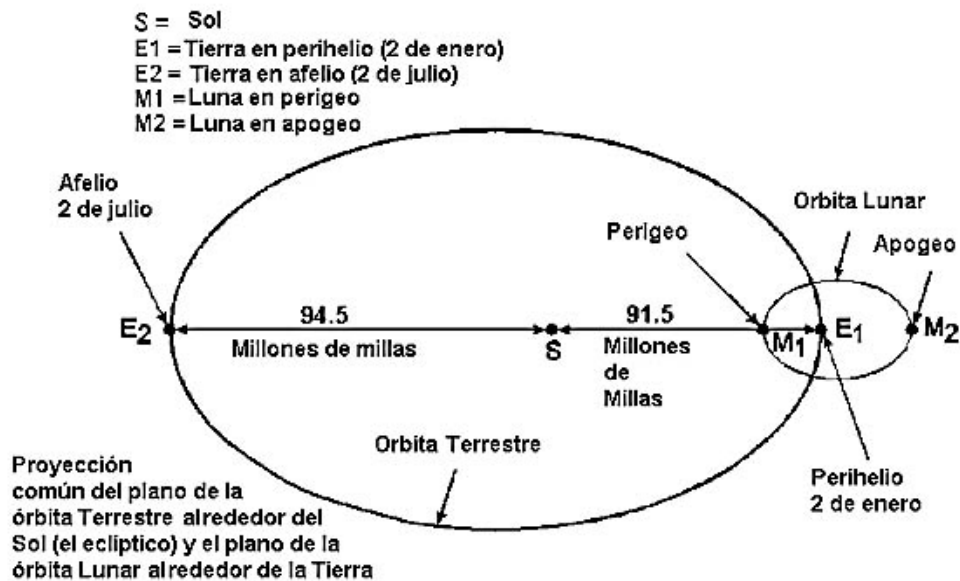


Fig. 5.4

Cuando el perigeo, perihelio y la luna nueva o la luna llena ocurren al mismo tiempo aproximadamente, dan como resultado amplitudes de marea considerablemente grandes. Cuando el apogeo, afelio y el primer o tercer cuarto de la Luna coinciden aproximadamente al mismo tiempo, ocurren normalmente amplitudes de mareas considerablemente reducidas.

Efectos de Declinación Lunar: La Desigualdad Diurna - El plano de la órbita de la Luna está inclinado sólo en 5° del plano de la órbita de la Tierra (la eclíptica) y entonces la Luna en su revolución mensual alrededor de la Tierra permanece muy cerca de la eclíptica.

La eclíptica está inclinada 23.5° con respecto al ecuador de la Tierra, luego el movimiento del Sol al norte y sur del ecuador, produce las estaciones. De manera similar, la Luna, al hacer una revolución alrededor de la Tierra una vez al mes, pasa de una posición de distancia angular máxima al norte del ecuador a una posición de distancia angular máxima sur del ecuador durante cada medio mes. Esto es *declinación*.

Dos veces al mes, la Luna cruza el ecuador. En la Figura 5.5, esta condición se muestra por la posición respunteada de la Luna. La envolvente de la fuerza de marea correspondiente dada por la Luna está dibujada, en perfil, por el elipse respunteado. Las mareas que ocurren cuando la Luna está

cerca del ecuador son conocidas como *mareas ecuatoriales*, mientras aquellas que ocurren cuando la Luna está cerca de su máxima declinación norte o sur son conocidas como *mareas tropicales*.

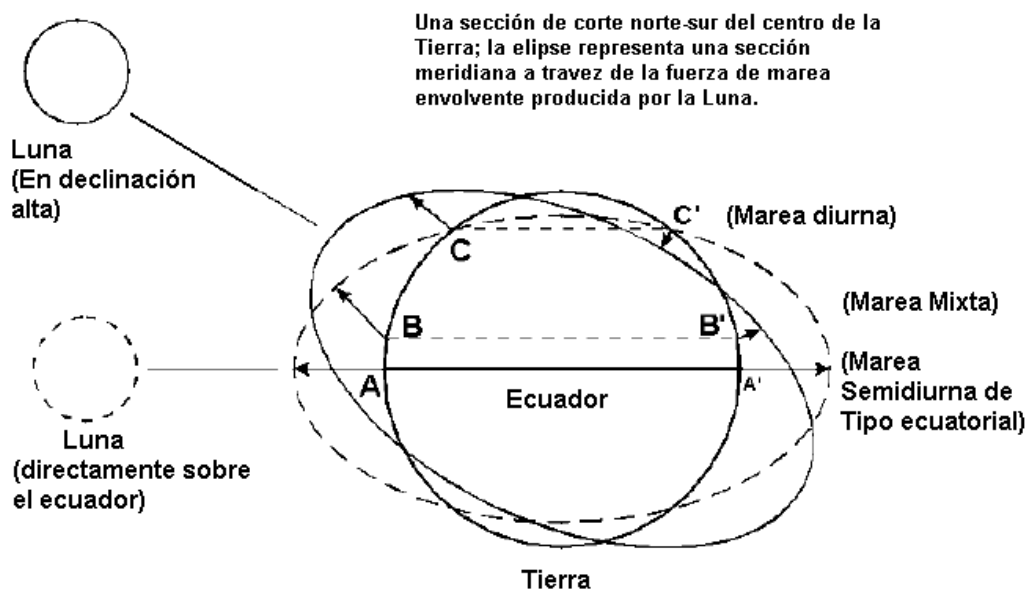


Fig. 5.5

Variabilidad – Los efectos de fase, paralaje y declinación no se muestran en todas partes en igual medida, aunque todos ocurren en todas partes de la Tierra. Las desigualdades de fase son comúnmente las mayores, pero en cualquier área en particular cualquiera de las tres variaciones puede ejercer la influencia predominante en la variación de la amplitud de la marea. El mes de las fases Lunares, el *mes sinódico* es de aproximadamente 29,5 días; el mes de distancia Lunar, el *mes anomalístico*, es de aproximadamente 27,5 días; y el mes de declinación Lunar, el *mes trópico* es de 29,3 días. Como resultado, entonces, se obtiene la variación total considerable en la amplitud de la marea que ocurre en cualquier lugar como resultado de las relaciones cambiantes progresivas de las tres variaciones entre sí. En Seattle, por ejemplo, la amplitud media de la marea es de 2,3 m, pero las amplitudes individuales en un día particular puede variar desde menor de 1,5 m a más de 4,5 m.

La amplitud de marea es objeto de otras variaciones periódicas (por ejemplo, las diferencias del paralaje solar resaltado anteriormente), pero las tres variaciones discutidas antes son las principales. El hecho de que estas variaciones principales completen su ciclo en 29,5 días o en menos es la principal razón por la que el hidrógrafo debe operar las estaciones clave de mareas por un mínimo de 30 días. Aunque la variación de la amplitud de un período de 30 días a otro cambiará un poco, cualquiera de los 30 días consecutivos en combinación con las estaciones de largo plazo será suficiente para la preparación de las reducciones de mareas hidrográficas. Una desviación de largo plazo importante en la amplitud de marea es resultado del cambio lento y variable en la orientación de la órbita de la Luna llamada la regresión de los nodos Lunares. Esta variación provoca una lenta diferencia medible en la amplitud de marea. Esta desviación resalta la necesidad de usar los factores nodales o correcciones nodales cuando se hagan los análisis armónicos o las predicciones y es importante en la determinación de los datums de mareas (ver sección 2.1.4).

2.1.2.3 Tipos de mareas

De las tres características principales, la fundamental es la del tipo de mareas. Si las mareas en dos lugares son del mismo tipo, pero difieren en tiempo o en amplitud, la marea en un lugar se puede relacionar simplemente y precisamente a la otra marea. Esta similitud es la base de la habilidad del higrógrafo para conceder datums de sondeo y para calcular los reductores de nivel de agua precisos en áreas donde una serie relativamente corta de observaciones de mareas han sido obtenidas. Por otra parte, si el tipo de marea en los dos sitios difiere el hecho de que el tiempo o la amplitud pueda ser la misma no indica necesariamente una relación simple entre los dos sitios. Las diferencias en tiempo y en amplitud de la marea son netamente diferencias en grados, pero diferencias en el tipo de mareas son las diferencias en la naturaleza básica de la misma.

El tipo de marea se refiere a la forma característica de pleamar o bajamar como lo revela la curva de marea. Aunque la curva de marea para cualquier lugar particular será diferente en algunos aspectos de los de cualquier otro lugar, las curvas de marea se pueden agrupar dentro de tres clases o tipos. Estos tipos son mareas semidiurnas, diurnas o mixtas.

Refiriéndonos a la figura 5.5, los puntos A y A' están a lo largo del eje mayor de esta elipse, la altura de la pleamar representada en A es la misma de la que ocurre a medida que este punto rota a la posición A' casi 12 horas más tarde. Cuando la Luna está sobre el ecuador – o cuando la declinación produce efectos similares sobre la fuerza en los puntos A y A', las dos pleamares y las dos bajamares en un día dado son similares en altura en cualquier lugar. La pleamar y la bajamar sucesivas son entonces casi espaciadas igualmente en el tiempo y ocurren uniformemente dos veces al día. Esto es conocido como el tipo de *marea semidiurna*. Una curva semidiurna de pleamar versus tiempo se muestra en el diagrama de arriba de la Figura 5.6. El tipo de marea semidiurno es una en la que el ciclo completo de pleamar y bajamar se completa en medio día. Hay dos pleamares y dos bajamares en un día de 24 horas 50 minutos. Para ser clasificados como la marea semidiurna, los dos ciclos de marea diarios deben parecerse a sí mismos de manera que, aunque no sean idénticos, las dos pleamares no se diferencien mucho y las dos bajamares no se diferencien mucho.

Sin embargo, con el cambio de la distancia angular de la Luna por encima o por debajo del ecuador (como se muestra en la figura 5.5), la envolvente de la fuerza de marea producida por la Luna está inclinada, y comienzan a producirse diferencias entre las alturas de las dos mareas diarias. Variaciones en las alturas de marea que resultan de los cambios en el ángulo de declinación de la Luna y la dirección de la fuerza gravitacional da origen a un fenómeno conocido como desigualdad diurna.

En la Figura 5.5, el punto B está debajo de un abultamiento de la envolvente de la fuerza de marea. Medio día después, en el punto B', se encuentra nuevamente dentro de un abultamiento, pero la altura de la marea no es tan grande como en B. Esta situación produce que dos veces en el día las pleamares o bajamares muestren alturas desiguales. Este tipo de marea, que muestra una fuerte desigualdad diurna, es conocida como *marea mixta*. (Ver el diagrama del medio en la Figura 5.6). El tipo de marea mixto es uno en el cual dos pleamares y dos bajamares ocurren cada día, pero en el cual hay marcadas diferencias entre las dos pleamares o entre las dos bajamares del día. Este tipo de marea es denominado *marea mixta* porque tiene las propiedades de una mezcla de las mareas semidiurnas y diurnas.

Distribución de las Fases de Marea

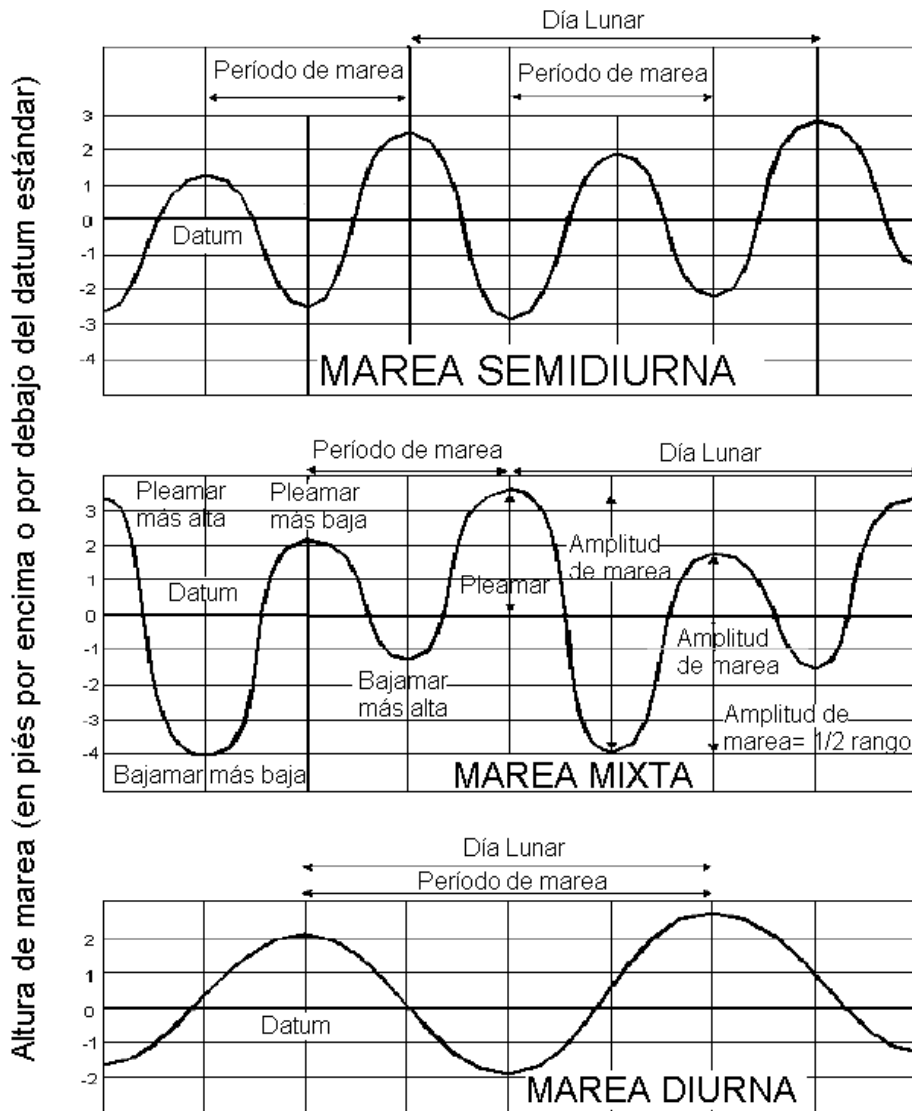


Fig. 5.6

Finalmente, como se muestra en la Figura 5.5, el punto C se ve que está por debajo de una porción de la envolvente de la fuerza de marea. Medio día después, sin embargo, a medida que este punto rota hacia la posición C', se ve que está por encima de la envolvente de la fuerza de marea. En este lugar, sin embargo, las fuerzas de marea presentes producen sólo una pleamar y una bajamar cada día. El tipo diurno resultante se muestra en el final del diagrama de la Figura 5.6. El tipo diurno de marea describe aquellas mareas en las que una pleamar y una bajamar ocurren en un día lunar. En este tipo de marea, el período de pleamar, y también el de bajamar, es de aproximadamente 12 horas de forma opuesta a las 6 horas de los períodos de las mareas semidiurnas.

Ejemplos de cada uno de los tres tipos de mareas se muestran en la Figura 5.6, usando estos tres días de registros de mareas de las Hampton Roads, Virginia; San Francisco, California y Pensacola, Florida. La línea horizontal a través de cada curva representa el nivel medio del mar y la magnitud de la pleamar y de la bajamar sobre y por debajo de la media del nivel del mar es indicada por la escala a la izquierda.

La curva más alta, de Hampton Roads, ilustra el tipo de marea semidiurna. Dos pleamares y dos bajamares ocurrieron cada día, las mareas de la mañana y de la noche difieren relativamente en muy poco. La curva de abajo, de Pensacola, ilustra el tipo de marea diurna, una pleamar y una bajamar ocurrieron en el día. La curva de San Francisco ilustra una forma de tipo de marea mixto. Dos pleamares y dos bajamares ocurrieron cada día, pero las mareas de la mañana difieren considerablemente de las de la tarde. En este caso en particular, la diferencia se ve en las pleamares y en las bajamares.

La diferencia entre las mareas correspondientes a la mañana y a la tarde, o desigualdad diurna, surge primariamente del hecho de que la órbita de la Luna está inclinada hacia el plano del ecuador. Esta inclinación resulta de la existencia de las fuerzas de producción de marea diurna y semi diurna. Estas fuerzas afectan ascenso y descenso real del nivel del agua en diferentes grados en diferentes lugares, mayormente como un resultado a la respuesta local y de la cuenca a las fuerzas y por lo tanto resultan diferentes magnitudes de la desigualdad diurna. De hecho, la distinción entre las mareas mixtas y las semidiurnas está basada completamente en la diferencia de magnitud de la desigualdad diurna.

La Figura 5.6 ilustra la curva de marea de San Francisco, que es de tipo mixta. Si bien hay desigualdad diurna en las pleamares y en las bajamares, la desigualdad en las bajamares es mayor. En Hampton Roads, la desigualdad, aunque no muy grande se muestra principalmente en las pleamares. Como se ilustra en la figura 5.7, la desigualdad puede verse principalmente en las bajamares, en las pleamares o pueden aparecer por igual en las pleamares y en las bajamares. También es importante que la desigualdad diurna es una característica del tiempo de la mareas así como de las altura de la marea. A medida que la desigualdad de la altura varía de lugar en lugar y día a día, la duración de la pleamar y de la bajamar y el intervalo lunitidal también varía.

Para diferenciar las dos mareas en un día, se le han dado nombres fijos a cada una de las mareas. De las dos pleamares, la más alta es llamada "Pleamar más alta" (HHW) y la más baja, "pleamar más baja" (LHW). De la misma forma, las dos bajamares son llamadas "bajamar más baja" (LLW) y "bajamar más alta" (HLW). (Ver figura 5.6). Como medida de la desigualdad, los términos "desigualdad diurna de pleamar" (DHQ) y "desigualdad diurna de bajamar" (DLQ) son usados. El DHQ es definido como la mitad de la diferencia entre las medias de las pleamares más altas y de las pleamares más bajas y el DLQ es definido como la mitad de la diferencia entre las medias de las bajamares más bajas y las bajamares más altas.

Esto puede ser mejor comprendido como la diferencia entre la media de la pleamar y la media de la pleamar más alta, y la diferencia entre la media de la bajamar y la media de la bajamar más baja, respectivamente.

El estudio de una serie mensual de mareas, como en las curvas mostradas en la Figura 5.7, mostrará que la desigualdad diurna también varía en magnitud en relación a la declinación de la Luna, la desigualdad es la menor cuando la Luna está cerca del ecuador, como estuvo en este mes desde el 3 al 5 y del 18 al 20, y siendo la mayor cuando la Luna está cerca de la declinación máxima norte o sur, como estuvo del 11 al 13 y del 25 al 27.

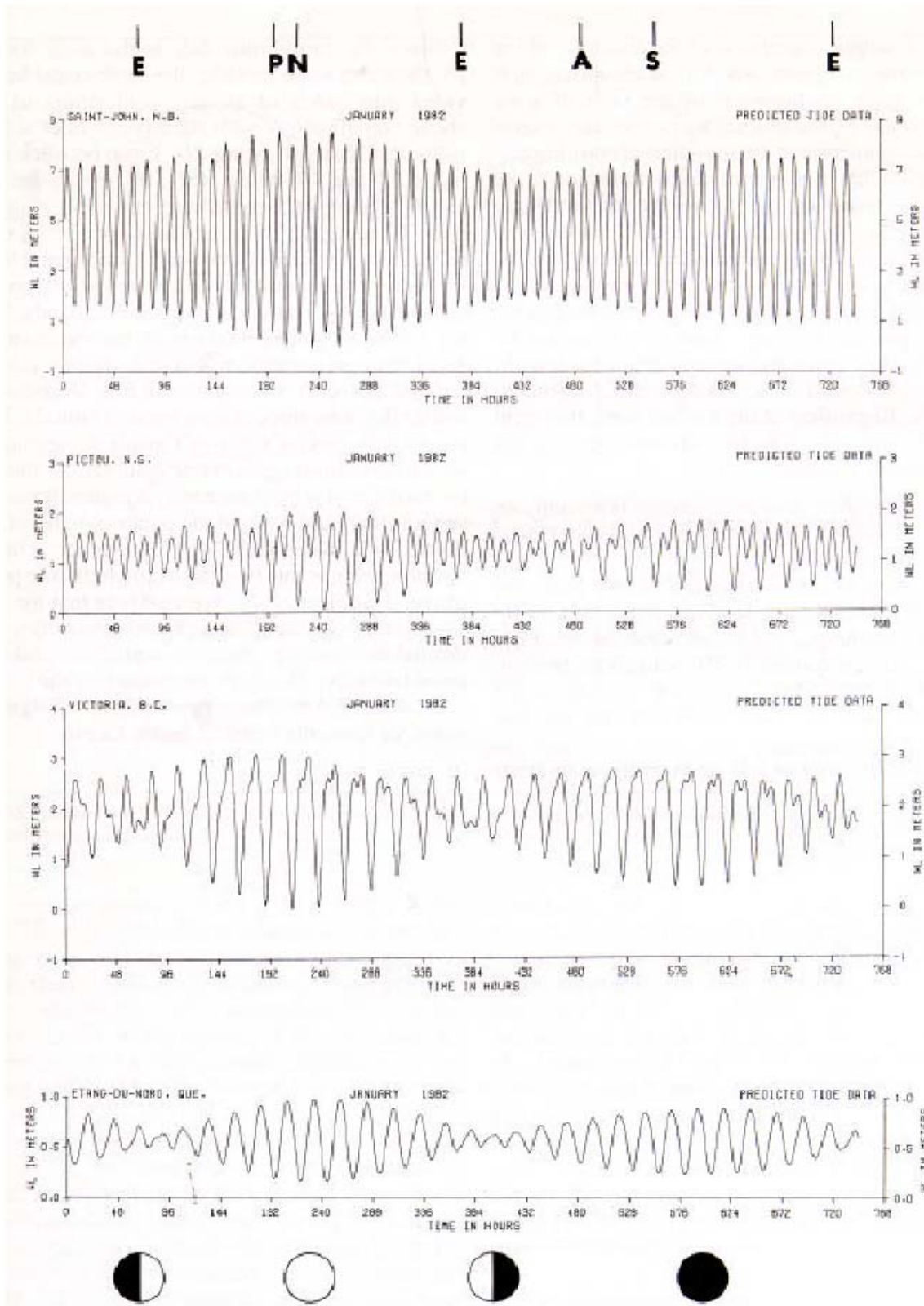


Fig. 5.7

2.1.2.4 Efectos de cuenca y de costa

A pesar de que las fuerza combinadas del sol y de la Luna son las que fijan el movimiento de la onda de marea, frecuentemente es el tamaño y la forma de la cuenca del océano la que controla las características de la marea. Por ejemplo, Pensacola, Florida no está cerca del polo – la región en la que la Figura 5.5 registraría mareas diurnas – pero que sin embargo tiene una inequívoca marea diurna. De forma similar, San Francisco y Hampton Roads están a casi la misma latitud, pero tienen diferencias notorias en las características de mareas. Muy parecido al agua en una bañera que se puede hacer que se mueva de extremo a extremo, las oscilaciones de marea en una cuenca de océano o en un mar restringido se pueden acentuar por el período natural de resonancia de la cuenca. La cuenca del Océano Pacífico acentúa el componente diurno de las mareas, dando como resultado mareas diurnas o mixtas muy fuertes. El Atlántico, por otro lado, acentúa el componente semidiurno de las mareas. Como un ejemplo más localizado, mucho del Golfo de México responde principalmente a los componentes de marea diurnos.

El tipo de marea predominante puede cambiar en distancias relativamente cortas. Por ejemplo, la costa este de Florida muestra mareas semidiurnas, la mayor parte de la costa oeste de Florida muestra mareas mixtas y la mayor parte del panhandle de Florida tiene mareas diurnas.

Ciertas configuraciones costeras y de fondo marino pueden aumentar enormemente la amplitud de la marea. Muy parecido a cuando una ola de viento corona y se rompe al llegar a la playa, una ola de marea también aumenta en altura a medida que encuentra aguas poco profundas al acercarse a la línea de costa. El examen de las amplitudes de mareas en estaciones costeras casi siempre mostrará el aumento de la amplitud a medida que la marea se mueve hacia arriba de una bahía o un canal. El Canal Cook en Alaska, un cuerpo de agua inclinado con forma de embudo es particularmente un buen ejemplo. A medida que la marea se mueve hacia adentro en el Golfo de Alaska, su amplitud aumenta de 3 m aproximadamente en la entrada a 10 metros cerca de la cabeza en Anchorage. Sobre Anchorage, en el brazo Turnagain el canal se estrecha y se hace menos profundo. En los momentos de las mareas más altas, la pleamar va desde el brazo contra la última corriente de reflujos y se levanta en una pared vertical de agua que llega casi a los 2 m de altura. Esta pared de agua generada de marea es conocida como un *macareo*. Macareos, olas de marea o bores de mareas ocurren en varios ríos o estuarios alrededor del mundo donde la amplitud de la marea es mayor en la configuración de la costa y el fondo marino es el ideal.

2.1.3 Variaciones del nivel de agua no ocasionadas por la marea

Los cambios en el nivel de agua observado a lo largo de las costas se deben no sólo a las fuerzas de marea sino que también son llevados por la variedad de otras fuerzas sobre un amplio rango de escalas de tiempo. En las frecuencias más altas, los niveles de agua pueden ser afectados por tsunamis, seiches y ondas de tormenta. Los cambios del viento local y de la presión barométrica pueden tener un gran efecto, especialmente en aguas poco profundas. El ascenso del agua debido vientos dirigidos hacia la costa y baja presión barométrica generalmente causarán que los niveles de agua estén por encima de los predichos mientras que los vientos dirigidos fuera de la costa y la presión barométrica alta tienden a tener el efecto opuesto. Fuertes patrones meteorológicos estacionales tendrán efectos en los niveles del mar mensuales. Los efectos del ENSO (Oscilación del Sur El Niño) en la media mensual de los niveles del mar en el Océano Pacífico son notables en particular. Los efectos de corto plazo y estacionales también se encuentran en la marea de los estuarios con fuertes corrientes de río y son debidos a las características de la descarga de cada una de las vertientes y controladas por los embalses aguas arriba. Los Grandes Lagos y otros lagos importantes son sensibles a los ciclos anuales de evapo-transpiración y a la pérdida o ganancia del volumen de agua neto. Las variaciones de tiempo en los patrones de circulación oceánica y las desviaciones en los remolinos del océano también pueden afectar los niveles de la costa. Dependiendo de la escala espacial del evento meteorológico, los efectos pueden verse en la cuenca, regionalmente o sólo localmente. El hidrógrafo necesita estar generalmente alerta de estas dependencias al planificar o llevar a cabo las operaciones

de levantamiento y de distinguir cualquier anomalía en las medidas del nivel de agua dadas por causas climatológicas o naturales comparadas con las medidas del mal funcionamiento.

2.1.4 Marea y Datums del nivel de agua

El hidrógrafo debe ser capaz de relacionar todas las profundidades medidas sin importarle el estado de la marea o el nivel del agua en el momento del sondeo con un plano común o datum. El datum utilizado para reconocer alturas o profundidades para aplicaciones marinas es un datum vertical llamado “datum de nivel de agua”. Para los datums derivados de las mareas, la mayoría son calculados sobre, o referenciados en, períodos específicos de 19 años o épocas de datum de marea. El período de 19 años es importante como se discutió en la sección 2.1.2.2, debido a la modulación de 19 años de los componentes lunares de la variación a largo plazo en el plano de la órbita lunar llamado la regresión de los nodos lunares.

El datum de nivel de agua al que los sondeos en un levantamiento en particular hacen referencia es conocido como el “datum de sondeo”. El datum al que las profundidades en una carta se refieren es conocido como el “datum de carta”. Un datum de nivel de agua es llamado un “datum de marea” cuando está definido en términos de una cierta fase de marea. En las aguas costeras de Estados Unidos, la Media de la bajamar más baja (MLLW) es usada para los sondeos y para el datum de las cartas. La MLLW es calculada de la tabulación de las observaciones de la marea, en este caso el promedio de la bajamar más baja de cada día lunar por un período de 19 años. En la actualidad los Estados Unidos refieren todos sus datums de marea calculados de las observaciones de marea a la *Nacional Tidal Datum Epoch* (NTDE) Epoca Nacional de Datum de Marea 1983-2001 y actualiza la NTDE sólo después del análisis del cambio de la media relativa del nivel del mar. En contraste, algunos Datums de Cartas se derivan de análisis armónicos de observaciones y de series de tiempo construidas de las predicciones de marea por períodos de 19 años. El Datum de la Carta Canadiense es la superficie de la Bajamar más baja correspondiente a las grandes mareas o LLWLT que contiene al datum utilizado anteriormente de la Marea Normal más Baja (LNT). Las cartas Británicas ahora utilizan una Carta Datum de la Marea Astronómica más Baja (LAT) basada en la marea más baja predicha que se espera que ocurra en un período de 19 años. El LAT se determina en una ubicación particular al realizar un análisis armónico de las observaciones, luego se utilizan los componentes armónicos de resultado en una ecuación de predicción para pronosticar la elevación de la marea predicha más baja en el período de 19 años. El uso del LAT se ha adoptado para el uso internacional por la Organización Hidrográfica Internacional (OHI). Los análisis armónicos han sido también utilizados para determinar otros Datums de Cartas. Los Datums de Cartas usados en algunas Cartas de Almirantazgo Británico eran de Nivel Medio de las Bajamares de Sicigias (MLWS) y Bajamares de Sicigias de la India (ISWL). Las MLWS y las ISWL se derivan de sumatorias de las amplitudes de varias componentes armónicas mayores bajo el Nivel Promedio del Mar local.

En lugares donde hay muy poca o ninguna marea, se utilizan otros datums de nivel de agua. En el Mar Negro, El Promedio del Nivel del Mar o el Nivel Promedio del Agua es usado. En los Grandes Lagos de Canadá y de los Estados Unidos se utilizan Datums de Bajamar (LWD) fijos para cada lago basado en el análisis de los promedios mensuales durante los estados de bajamar. En lagunas sin mareas y en bahías en la costa de los Estados Unidos donde el área transita de marea a sin marea, una LWD es utilizada la cual es determinada al restar 0.2 m de la Media Local del Nivel del Mar derivada de las observaciones y ajustada al período de 19 años.

Existe una variedad de Datums de Cartas empleados en ríos con marea. En los Estados Unidos, los Datums de las Cartas se han obtenido de los análisis de las mediciones durante los estadíos en que el río esta bajo en un período de tiempo y luego tomados para propósitos de cartografía. Ejemplos de estos son el Datum del Río Hudson y el Datum del Río Columbia derivados del MLLW basado en observaciones durante los estados de río más bajos durante el año.

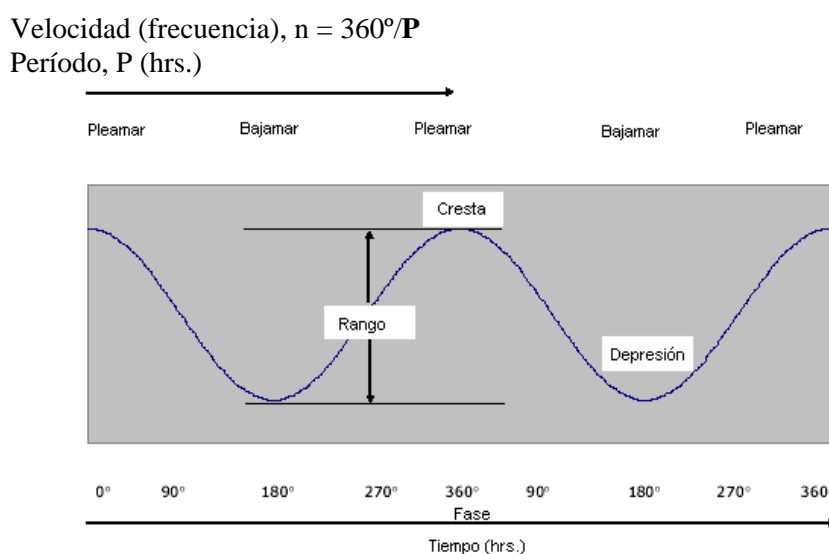
El datum de nivel de agua es un plano local de elevación que se aplica solamente en el área específica donde se han hecho las mediciones de nivel. Bien sea de marea o de no marea, es permanentemente

referido a la tierra al nivelar el medidor del nivel de agua a una red local de marcas de nivelación. Los procedimientos de cálculo para determinar los datums de marea son explicados luego en este capítulo. Los datums de Nivel de agua son completamente distintos a los datums geodésicos verticales. Por ejemplo, Los Estados Unidos y Canadá utilizan el Datum Vertical de norte América de 1998 (NAVD88) y el Datum de los Grandes Lagos Internacional de 1985 (IGLD85) como los datums verticales para propósitos geodésicos. La relación entre el NAVD88 (o del IGLD 85) y la media local del nivel del mar o la media del nivel de agua varía considerablemente de lugar en lugar. De hecho, es imposible transferir un datum de marea de un lugar a otro con el nivel geodésico, sin considerar las condiciones de marea locales. La red geodésica establece, sin embargo, las relaciones entre las muchas estaciones de marea y sus datums de elevaciones de marea alrededor del continente Norte Americano, y puede ser usado para recuperar un datum de marea local conectado si las marcas del banco de marea son destruidas, esto requiere de las conexiones de nivel o de las conexiones de GPS entre las redes geodésicas de las marcas de nivelación de marea.

2.1.5 Análisis armónico y predicción de marea

Cada uno de los movimientos generadores de marea descritos en las secciones anteriores puede ser representado por una simple curva de coseno como se ilustra en la Figura 5.8., el eje horizontal representa el tiempo y el vertical representa la magnitud de la fuerza generadora de mareas. Las crestas muestran los tiempos de los máximos en la fuerza generadora de mareas y las depresiones las mínimas. Por ejemplo en la Figura 5.8, en el sistema Sol-Tierra, el medio día, con el Sol encima, es la primera cresta. Seis horas más tarde ocurre un mínimo en las depresiones. El segundo máximo es a la media noche con la segunda cresta. Otra depresión aparece al amanecer y luego se regresa a la cresta original del medio día.

Cada uno de los movimientos generadores de marea, representados por una simple curva de coseno, es conocido como un componente de marea, el componente de la marea o el componente armónico. Una letra o letras y normalmente un subtítulo se utilizan para denominar cada componente. El componente de marea descrito anteriormente, por ejemplo, llamado el componente semidiurno Solar Principal, es designado con el S_2 . El componente semidiurno Lunar Principal es designado con el M_2 . S es para el Sol y M es para la Luna, el $_2$ significa que hay dos ciclos de marea completos para cada ciclo astronómico. Entonces, se dice que éstas son componentes semidiurnas. Las componentes se describen por su período de marea (el tiempo entre máximos), P . El período del S_2 es de 12.00 horas solares (hr.) y el período de la M_2 es de 12.42 horas solares:



Tomado de S. Hicks (2004)

Fig. 5.8 “La curva de marea visualizada como en forma de onda”

En el trabajo de las mareas, cada componente (curva coseno) es descrito con más frecuencia por su velocidad (o frecuencia en grados por hora). La curva coseno está dividida en 360° (desde cresta a cresta). La velocidad n de la componente es $360^\circ/P$. Por lo tanto, para S_2 es $n = 360^\circ/12.00 = 30^\circ/\text{hr}$; para M_2 , $n = 360^\circ/12.42 = 28.984^\circ/\text{hr}$.

Existe un número infinito de componentes para describir casi todas las perturbaciones en los movimientos relativos del Sol, la Luna y la Tierra (incluyendo la distancia y los aspectos declinatorios) Sin embargo, después de cerca de 37, los efectos de esos movimientos al representar las mareas reales son extremadamente pequeños en la mayoría de las ubicaciones de los Estados Unidos. Para áreas de mareas complejas dentro de los estuarios, como los de Anchorage, Alaska, Filadelfia, y Pensilvania se toma más de cien componentes para describir adecuadamente la curva de mareas. Estos componentes adicionales son artefactos que combinan las componentes diurnas y semi diurnas fundamentales para producir componentes de alta frecuencia (de 3 a 13 ciclos al día) que tratan de describir los efectos no lineales complejos de la fricción del fondo marino y de las aguas poco profundas.

Las representaciones de los eventos astronómicos y del desarrollo de sus períodos y velocidades son esenciales al comprender las técnicas de análisis armónicas. El desarrollo de las aguas poco profundas de fricción y de las componentes compuestas de marea está fuera del alcance de este capítulo.

El componente semidiurno Principal Solar, S_2 , representa la Tierra girando relativamente al Sol. La Tierra rota una vez en 24 horas solares promedio o ya que la vuelta alrededor del mundo es de 360° ; va a una velocidad de $360^\circ/24 = 15^\circ/\text{hr}$. Sin embargo, existe un máximo en la fuerza de producción de marea solar bajo el Sol y otra vez en el lado opuesto (media noche). Entonces, el período (máximo a máximo) del componente es de 12 horas solares promedio y la velocidad es: $S_2 360^\circ/12 = 30^\circ/\text{hr}$.

El componente semidiurno Principal Lunar, M_2 , representa la Tierra girando relativamente a la Luna. Ya que la Luna se mueve hacia el este, se toma 24.8412 horas solares promedio para tener la Luna encima. Otra vez, hay dos máximos en el día lunar, entonces el período es de sólo 124.206 horas solares promedio y su velocidad es: $M_2 360^\circ/12.4206 = 28.984^\circ/\text{hr}$.

El S_2 y el M_2 entran en la fase (máxima de alineación) y fuera de fase (máxima de alineación de una con la mínima de otra) para producir mareas de sicigia y mareas de cuadratura, respectivamente (Figura 5.3). Las mareas de sicigia ocurren en los momentos de luna llena y de luna nueva mientras que las mareas de cuadratura ocurren en los momentos de primer y tercer cuarto de luna. La revolución de la Luna alrededor de la Tierra relativa la Sol toma 29.5306 días (llamado el mes sinódico o una lunación). Ya que hay dos máximas, las mareas sicigias ocurren cada $29.5306/2 = 14.765$ días y las mareas de cuadratura ocurren cada 7.383 días después de las sicigias.

El componente semidiurno Elíptico Lunar mayor, N_2 , y el componente semidiurno Elíptico Lunar menor, L_2 , son dos componentes diseñadas para simular el ciclo del perigeo al perigeo. Estos son componentes completamente artificiales en contraste con las S_2 y M_2 que tienen relaciones realistas con las envolventes solar y lunar de las fuerzas generadoras de mareas. El perigeo al perigeo ocurre cada 27.5546 días (el mes anomalístico) o cada 661.31 horas solares promedio. La velocidad del perigeo al perigeo es de $360^\circ/661.31 = 0.544^\circ/\text{hr}$. Esto es un evento lunar y la velocidad de M_2 es de $28.984^\circ/\text{hr}$. Las velocidades de los componentes son, entonces:

$$N_2 28.984 - 0.544 = 28.440^\circ/\text{hr}.$$

$$L_2 28.984 + 0.544 = 29.528^\circ/\text{hr}.$$

Entonces, cuando N_2 y L_2 están en fase cada 27.5546 días (mes anomalístico) se suman al M_2 para simular la proximidad cercana de la Luna (perigeo). También, 13.7773 días después están fuera de fase simulando el apogeo (la luna a la distancia más lejána).

El componente diurno Luni-Solar Declinacional, K_1 , y el componente diurno Lunar-Solar Declinacional Principal, O_1 , son también componentes artificiales designados para estimular el ciclo de máxima declinación a la máxima declinación de la luna. El norte máximo al norte máximo ocurre cada 27.3216 días (mes tropical) o 655.72 horas solares promedio. Sin embargo, las declinaciones norte y sur producen el mismo resultado. El ciclo norte al sur (y del sur al norte) es $655.12/2 = 327.86$ horas. La velocidad es de $360^\circ/327.86 = 1.098^\circ/\text{hr}$. Las velocidades de los componentes, ya que ellos modifican M_2 , serán la velocidad de M_2 más y menos la velocidad del ciclo norte y sur. Ya que el máximo se siente sólo una vez al día a medida que la tierra gira, las velocidades del componente son la mitad de la suma y la diferencia:

$$K_1 (28.984 + 1.098)/2 = 15.041^\circ/\text{hr}.$$

$$O_1 (28.984 - 1.098)/2 = 13.943^\circ/\text{hr}.$$

Entonces, cuando K_1 y O_1 están en fase, cada 13.6608 días (la mitad del mes tropical, es decir, el mes respecto al equinoccio vernal), suman al M_2 para simular la declinación máxima de la Luna norte o sur. Cuentan para la desigualdad diurna resultante de la Luna (las dos pleamar y/o las dos bajamar son desiguales en altura cada día lunar) y, en los extremos, las mareas diurnas (una pleamar y una bajamar cada día lunar)

El componente diurno Luni-Solar Declinacional, K_1 , y el componente diurno Lunar-Solar Declinacional Principal, P_1 , están diseñados para estimular el ciclo de la declinación máxima a la máxima declinación del Sol. El norte máximo al norte máximo ocurre cada 365.2422 días (año tropical) o 8765.81 horas solares promedio. Sin embargo, las declinaciones norte y sur producen los mismos resultados. El ciclo norte al sur (y del sur al norte) es de $8765.81/2 = 4382.91$ hrs. La velocidad es de $360^\circ/4382.91 = 0.082^\circ/\text{hr}$. Las velocidades de los componentes, a medida que modifican S_2 , serán la velocidad de S_2 más y menos la velocidad del ciclo norte y sur. Como el máximo se siente sólo una vez a medida que la tierra gira, las velocidades del componente son la mitad de la suma y la diferencia:

$$K_1 (30.000 + 0.082)/2 = 15.041^\circ/\text{hr}.$$

$$P_1 (30.000 - 0.082)/2 = 14.959^\circ/\text{hr}.$$

Entonces, cuando K_1 y P_1 están en fase cada 182.62 días (la mitad del año tropical, es decir, el año con respecto al equinoccio vernal), suman a S_2 para simular la declinación máxima del Sol norte o sur. Estos componentes también contribuyen a la desigualdad diurna.

Las magnitudes teóricas relativas de los componentes son también de interés. Se debe recordar, sin embargo, que son calculados de las fuerzas generadoras de mareas y no son necesariamente los valores en las mareas observadas. Están basados en el valor, uno, para M_2 , ya que M_2 es normalmente el componente dominante. Los valores de magnitud relativa, junto con los períodos de los componentes ($360^\circ/\text{velocidad}$), son:

M_2	1.00	12.42 hrs.
S_2	0.46	12.00 hrs.
O_1	0.41	25.82 hrs.
K_1	0.40	23.93 hrs.
N_2	0.20	12.66 hrs.
P_1	0.19	24.07 hrs.
L_2	0.03	12.19 hrs.

2.1.5.1 Análisis armónico

El proceso matemático de obtener la amplitud y la fase de una componente a la vez a partir de una serie de tiempo observada se llama análisis armónico. Al conocer los períodos de los componentes, es posible retirarlos, garantizando que haya una serie lo suficientemente larga. Generalmente, es

preferible un año pero un mes puede dar resultados adecuados con las mareas semi diurnas dominantes. Los análisis estándar están hechos para 37 componentes por parte de los Estados Unidos., aunque muchos de ellos pueden ser muy pequeños en muchas de las estaciones.

De un análisis armónico de las series de nivel de agua observada, se obtiene dos valores para cada componente de marea. La Amplitud, distancia vertical entre el nivel promedio de marea y el nivel de la cresta (cuando se grafica como una curva de coseno) es uno de los valores. El otro es el retardo de fase (Epoca). El retardo de fase es la cantidad de tiempo que pasa desde el evento astronómico máximo al primer máximo de su correspondiente componente de marea. Usualmente es expresado en grados de una curva coseno completa (360°) de ese componente. Estos dos valores se conocen como las constantes armónicas y están ilustradas en la Figura 5.9. Se debe recordar que estas son únicas para la ubicación de la estación particular de la que se derivan. También, las constantes armónicas son tratadas como una constante aunque en el estricto sentido no lo son porque los valores calculados son afectados por el ruido en la señal, la longitud de las series analizadas, etc. Las constantes aceptadas que son utilizadas son consideradas los mejores estimaciones de los valores actuales (desconocidos). Cuando cualquier evento natural o proyecto de ingeniería ocurre, como una erosión, deposición, una draga o una construcción de rompeolas, que tiene el potencial de causar alteraciones mayores en la topografía adyacente se deben hacer nuevas mediciones y nuevos análisis armónicos.

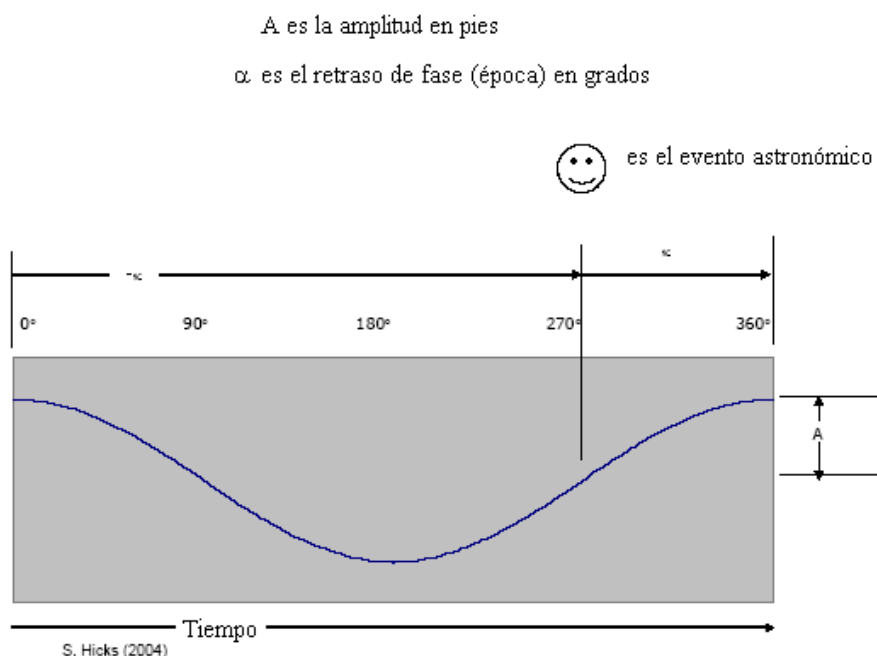


Fig. 5.9 “La amplitud y el retraso de fase del componente armónico”

2.1.5.2 Predicción de mareas

Para predecir las mareas, digamos para un año calendario, es necesario conocer las constantes armónicas (amplitudes y retrasos de fase) para los componentes de cada ubicación para las que desee hacer las predicciones. Estas se obtienen de análisis armónicos de la marea observada en cada estación descrita anteriormente. Los ajustes se hacen para las configuraciones astronómicas al principio del año. Conociendo el retraso de fase de cada componente de los análisis armónicos, el primer máximo de cada curva coseno ocurre después del evento por la cantidad de su retraso de fase. La amplitud de cada curva coseno es la encontrada desde el análisis armónico.

Finalmente, a cada hora del año, las alturas de todas las curvas coseno son sumadas. Cuando se grafica, la curva resultante es normalmente muy similar (en forma y tamaño) a la curva original observada.

Las fechas de ocurrencia y las alturas de las pleamares y de las bajamares son consideradas predicciones para el año siguiente, el vasto número de predicciones es posible al aplicar las correcciones de aquellas estaciones para los que las constantes han sido determinadas – Las Estaciones de Control Primarias (Estaciones de Referencia). Las estaciones subordinadas (aquellas sin constantes armónicas) se refieren a sus Estaciones de Referencia cercanas por las constantes empíricas. Entonces, las predicciones son obtenidas también para estas Estaciones Subordinadas.

El tipo de marea en una ubicación dada es mayormente una función de las declinaciones del Sol y de la Luna. Las declinaciones están constantemente variando de manera que el tipo de marea cambia durante el mes y el año en muchas ubicaciones. Un sistema de clasificación más riguroso está disponible al usar las amplitudes de los componentes mayores de cada ubicación. Cuantitativamente, donde la razón de las amplitudes de las componentes ($K_1 + O_1$) sobre ($M_2 + S_2$) es menor que 0.25, la marea se clasifica como semi diurna; donde la razón es de 0.25 a 1.5, la marea es mixta mayormente semi diurna; donde la razón es de 1.6 a 3.0, la marea es mixta mayormente diurna; y donde la relación es mayor que 3.0, es diurna.

Las características de la desigualdad diurna y su variación quincenal se pueden explicar al considerar la combinación de los componentes diurnos y semidiurnos que resultan de las fuerzas de producción de mareas diurnas y semi diurnas. Como se representa en la Figura 5.10, donde el componente semidiurno está representado por una línea de puntos y el componente diurno está representado por la línea pespunteada, la marea resultante, mostrada por la línea completa es claramente la suma de los dos componentes.

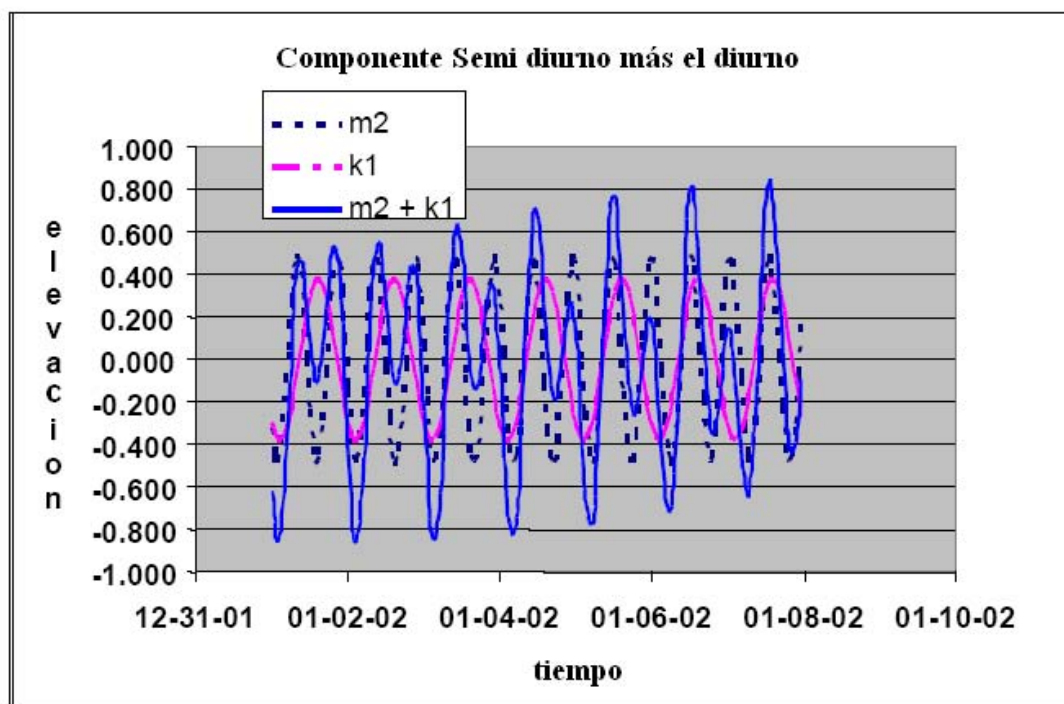


Fig. 5.10

Los rangos relativos de los componentes en cualquier ubicación, así como los tiempos relativos de los dos componentes, dependen no sólo de la magnitud relativa y de la fase de las fuerzas productoras de mareas sino también de las características hidrográficas de la cuenca de marea y del área local. Por esta razón, las mismas fuerzas productoras de marea pueden dar resultado a distintos tiempos relativos y rangos de los componentes diurnos y semidiurnos en diferentes lugares. La Figura 5.10 muestra el simple caso donde los rangos de dos componentes son iguales, pero el tiempo relativo de las altas y bajas varía. En cada caso, hay una desigualdad diurna considerable, pero hay profundas diferencias en la fase de la marea que muestra la desigualdad. En el diagrama de arriba, donde las bajamares ocurren

al mismo tiempo, la desigualdad diurna es mostrada en las bajamares. Y en el diagrama de más abajo, donde los dos componentes están en el nivel del mar promedio al mismo tiempo, la desigualdad es mostrada de igual forma en las altas y las bajas. Estos tres diagramas muestran las tres clases generales en las que la desigualdad diurna de las alturas de marea es agrupada.

En mareas que ocurren en la actualidad, no sólo los tiempos de los componentes tienen diferentes relaciones, sino que los rangos de los dos componentes también difieren. Refiérase al diagrama de más abajo en la Figura 5.10. Si el rango de este componente semidiurno (línea de puntos) permanece como se muestra, pero el rango del componente diurno (línea pespunteada) se hace más grande, se puede ver que la bajamar más baja será más baja, y la bajamar más alta será más alta. Cuando el rango del componente diurno se vuelve el doble del componente semidiurno, la pleamar más baja y la bajamar más alta serán igual a la altura, resultante una marea que tiende a desaparecer. A medida que el rango del componente diurno aumenta más, sólo habrá una pleamar y una bajamar en un día, una marea diurna. Combinando los efectos de tiempo y rango, se convierte en que si el rango del componente diurno es menor que 2 veces el del componente semidiurno, habrá dos pleamares y dos bajamares diariamente, si el rango diurno es de entre 2 y 4 veces el semi diurna puede haber dos pleamares y dos bajamares o puede haber sólo una pleamar y una bajamar en un día, y si el rango diurno excede 4 veces el semidiurno, sólo una pleamar y una bajamar ocurrirá en un día.

Se debe notar que las magnitudes de ambas fuerza diurna y semi diurna varían durante un mes, las anteriores son las más grandes en la declinación máxima norte y sur, la última alcanzando el máximo cuando la Luna está sobre el Ecuador. La marea en un lugar dado, por lo tanto, exhibe los grados variantes de desigualdad dentro de cualquier período de dos semanas.

En realidad, existen más de 70 componentes de marea que se combinan para producir la marea resultante. De estos, hay cuatro componentes semidiurnos mayores y tres componente diurnos mayores que son combinados en los componentes semidiurno y diurno de la Figura 5.11.

Cada componente es basado en el movimiento de la Tierra, la Luna y el Sol, o la combinación de ellos. El componente más importante completan su ciclo en un mes y todo las componentes, hasta las más insignificantes, completan su ciclo en 18,6 años aproximadamente. El período de 19 años de operación requerido para ser designado como una estación de marea primaria está basada en este horario. El período de 19 años completos se utiliza más que el ciclo de 18,6 años, ya que las variaciones de estaciones son a veces más grandes que algunos de los componentes astronómicos menores.

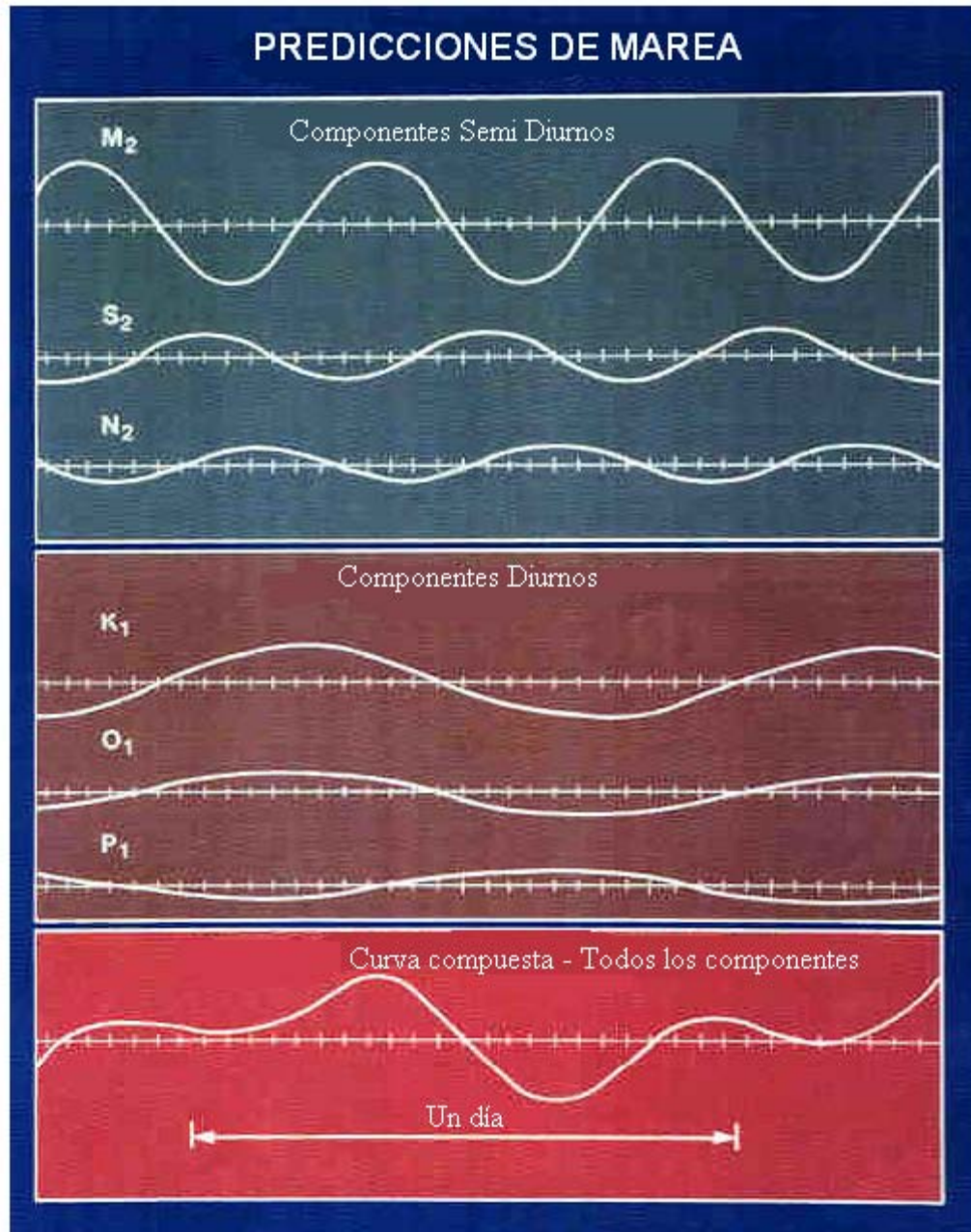


Fig. 5.11

2.2 Funciones de apoyo operacional

Esta sección cubre los requerimientos del nivel del agua y del datum vertical para el apoyo operacional de los levantamientos hidrográficos. El propósito de este apoyo está resumido en las siguientes áreas funcionales:

- a. nivel de marea y de agua requerido en la planificación;
- b. desarrollo preliminar de la zonificación del nivel de agua o marea;
- c. Operación del control de la estación de nivel de agua;
- d. Instalación, operación y retiro de la estación de nivel de agua suplementaria;
- e. Control de calidad de los datos, procesado y tabulación;
- f. Calculo del datum de nivel de agua y de marea y recuperación del datum;
- g. Generación de los reductores de nivel de agua y zonificación final de marea.

2.2.1 Consideraciones de error calculado

Los reductores de nivel de agua pueden ser un corrector importante para los sondeos para reducirlos relativamente al datum de la carta particularmente en áreas de aguas poco profundas con relativamente altas amplitudes de marea. Los errores asociados con los reductores de nivel de agua deben ser calibrados con otros errores de sondeo para asegurarse que el calculo total de error no se exceda. La contribución permitida de error para las mareas y los niveles de agua para el error total calculado del levantamiento típicamente está entre .20 m y 0.45 m dependiendo de la complejidad de las mareas.

El error total de las mareas y de los niveles de agua puede ser considerado como que tiene los componentes de error de:

- a. El error de medición del calibrador/sensor y el error de proceso para referir las medidas a la estación de referencia. (Ver IHO S-44 5a edición 2008 Capitulo 3) El error de proceso también incluye el error de interpolación del nivel de agua en el momento exacto de los sondeos. Un estimado de un error de proceso típico es de 0.10 m en el 95% del nivel de confianza.
- b. El error de cálculo de los primeros datums de reducción de marea y para el ajuste de los períodos de 19 años para las estaciones de corto plazo. A medida que las series de tiempo son más cortas, es menos exacto el datum, es decir, el error es más grande. Una estación de control inapropiada también disminuye la exactitud. La NOAA ha determinado que el error estimado del datum de marea ajustado basado en un mes de datos es de 0.08 m para las costas del Atlántico y del Pacífico y de 0.11 para las costas del Golfo de México (en el 95% de nivel de confianza).
- c. El error en la aplicación de la zonificación de la marea. La zonificación de marea es la extrapolación y/o la interpolación de las características de marea desde un(os) punto(s) conocido(s) en la orilla hasta un área de levantamiento deseada usando diferencias de tiempo y cocientes de amplitud. A mayor extrapolación/interpolación, mayor será la incertidumbre y el error. Los estimadores de error típico asociados con la zonificación de marea son 0.20 m a un nivel de confianza de 95%. Sin embargo los errores para esta componente pueden exceder fácilmente los 0.20 m si las características de la marea son muy complejas, o no muy bien definidas, y si hay efectos de meteorología diferenciales definidos en los niveles de agua a lo largo del área de levantamiento.

2.2.2 Planificación de los requerimientos del nivel de agua y marea

La planificación del apoyo de nivel de agua y marea para los levantamientos hidrográficos requiere la atención para cada una de las siete áreas funcionales listadas anteriormente. En el contexto de la operación de levantamiento completa y de la generación del producto final, la planificación incluye:

- a. La determinación de todo el cálculo de error;
- b. El estudio de las características del nivel de agua y marea y del medio ambiente meteorológico y oceanográfico;
- c. La determinación de cuales estaciones de control usar y cual control vertical existente está en el área, ubicación, logística y período de tiempo de las estaciones de nivel de agua a corto plazo y el equipo incluyendo, GPS y los conectores de datum geodésico.
- d. Construcción de los esquemas de zonificación;
- e. Desarrollo de la colección de datos operacional, control de calidad y procesado de datos y funciones de análisis;

- f. Desarrollo de la zonificación final y de los procedimientos de determinación de datum, la aplicación de los reductores de nivel de agua para las hojas hidrográficas y la estimación del cálculo final de error.

La planificación de proyecto intenta minimizar y balancear estos tipos de error potenciales a través del uso y la especificación de los registradores precisos de nivel de agua, la optimización de la mezcla de zonificación requerida, el número de localización de estaciones requerido y la longitud de las observaciones requeridas dentro de límites prácticos del área de levantamiento y de la duración del levantamiento. Los límites prácticos dependen de las características de marea del área y lo apropiado a la línea de costa para la instalación y la operación de los registradores apropiados de nivel de agua.

El hidrógrafo debe planificar las operaciones para asegurar la colección de series de datos continuas y válidas. Cualquier rompimiento en la serie de medición del nivel de agua afecta la precisión de los cálculos del datum. Las interrupciones en los datos también dan resultado al incremento de error en los reductores de marea cuando la interpolación es requerida para dar los datos al momento de los sondeos. En un sitio de medición crítico donde los datos de medición del nivel de agua no pueden ser transmitidos o monitoreados durante las operaciones hidrográficas, un sensor independiente de respaldo o un sistema de colección de nivel de agua redundante debe ser instalado y operado durante el proyecto.

La ubicación de las estaciones de marea está seleccionada para cumplir con dos grupos de criterios. Primero, la cobertura adecuada, las estaciones deben ser suficientes en número y apropiadamente distribuidas para mostrar precisamente el régimen de nivel de agua y marea para el área de levantamiento. Segundo, los sitios específicos deben ser apropiados para la medición precisa del rango completo de los niveles de agua experimentados.

La densidad y la distribución de los registradores de marea dependen de los cambios en las características del nivel de agua (usualmente de marea) del área estudiada. La medición de la marea es generalmente planificada para identificar cada cambio de 0.1 m en la amplitud para áreas de 3 m o menos de amplitud de marea, cada 0.2 m de cambio en amplitud para áreas con más de 3 m de amplitud de marea y para identificar cada 0.3 de cambio de hora en el intervalo Greenwich.

Al determinar los requerimientos de la cobertura, las características de marea son primero evaluadas en un sentido geográfico general. El tipo de marea y los cambios en el tipo (semidiurno, diurno, o mixto) son analizados. La fuente desde la que la marea avanza en el área es determinada y la fuerza de la marea es evaluada relativamente a las influencias estacionales y meteorológicamente localizadas. Las áreas de transición de los regimenes de marea y no-mareal son particularmente importantes, ya que las áreas de régimen no-marea reciben un tratamiento diferente para la determinación del datum de bajamar.

Luego, las características de marea son evaluadas en un contexto geográfico localizado. Los cambios complejos ocurren a la marea a lo largo de entradas poco profundas, pantanos extensos y constricciones angostas. Las lagunas pueden cortar la corriente de la marea en la bajamar y el flujo constante de un río afecta la marea en todos los estados. En bahías grandes de comparativamente baja profundidad teniendo una amplitud pequeña de marea, el viento tiene un efecto considerable en el tiempo y en la altura de la marea. Esto es también cierto en estrechos de ríos o largas costas donde el agua es baja. La influencia del hombre como en mamparos, en las dragas, diques, recepciones tomas hidroeléctricas y en las prácticas de administración del nivel de agua pueden tener distintos impactos.

Luego de este análisis, las ubicaciones aproximadas de las estaciones son definidas. Las estaciones son requeridas usualmente en ambos lados de unos impedimentos importantes a la corriente marina, en intervalos frecuentes en cada área de costa y en los alcances altos angostos de las riveras de marea; en la cabecera de la navegación o el límite del levantamiento de todos los ríos y riachuelos; y en ambos lados de las transiciones desde la marea a la no-marea o entre las mareas diurnas, mixtas y semi diurnas. El área de levantamiento es usualmente encerrado con estaciones para que la

extrapolación de los reductores del nivel de agua no es requerido. Cuando se estudia aproximaciones de canal expuestos donde las profundidades no son más grandes que el calado de las naves, los datos del nivel de agua dado de un registrador a bordo puede no ser lo suficientemente preciso para la reducción de los sondeos. En dichos levantamientos, una estación temporal en una estructura costa afuera puede ser muy deseable. También, la cobertura del solapamiento es normalmente planificada, para que al menos dos estaciones estén operando para cualquier porción dada en el área de estudio. Este solapamiento ayuda a la interpolación de los propósitos de la zonificación y da algunos datos de respaldo en caso que un registrador no funcione apropiadamente.

En muchos casos, la información histórica esta disponible para ayudar a la planificación de la cobertura del nivel de agua. La información de la estación primaria y secundaria, así como los datos del nivel de agua y marea de estudios hidrográficos anteriores, dan buenas indicaciones de cuanto y de aproximadamente donde se necesitan las estaciones de marea para un nuevo levantamiento. Donde no exista información histórica el planificador debe estimar los requerimientos por el análisis de datos para las áreas cercanas con características fisiográficas similares. En estas situaciones, es prudente errar en el sitio de demasiadas estaciones en vez de ser incapaz de dar control satisfactorio para el área completa de levantamiento. Los sondeos adquiridos con insuficiente control de marea no pueden ser corregidos con los datos de los registradores instalados después del levantamiento.

2.2.3 Zonificación preliminar de nivel de agua y marea

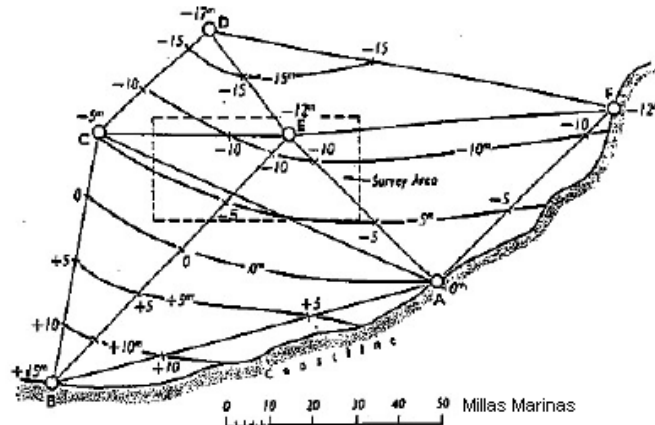
La zonificación de nivel de agua y marea es una herramienta utilizada para extrapolar e interpolar la marea o las variaciones de nivel de agua desde la estación de nivel de agua más cercana al área de levantamiento. En muchos casos, la interpolación o la extrapolación no es necesaria y los factores de corrección de nivel de agua son dados directamente del registrador de nivel de agua referenciado al Datum de la Carta. En la mayoría de los casos, las estaciones existentes no están cerca del área de estudio o no se pueden instalar las suficientes estaciones de nivel de agua en un sentido práctico para darle control a todas partes. Los errores estimados en la extrapolación y la interpolación de los niveles de agua deben estar balanceados con el error total estimado. A mayor cantidad de estaciones que puedan ser instaladas en el área de estudio, menor error de zonificación. A mayor cantidad de estaciones requeridas, mayor costo y complejidad logística de las operaciones.

Las técnicas descritas anteriormente proporcionaran los factores de corrección en la vecindad inmediata de una estación de marea. En muchos casos, el área de estudio estará entre dos o más estaciones, cada cual tiene una diferente amplitud de marea. En estas situaciones, los factores de corrección del área intermedia deben ser interpolados en las zonas de corrección de las estaciones cercanas. En la mayoría de los casos, la zonificación derivada de las mareas predichas será adecuada para este propósito. Sin embargo, si la zonificación predicha no está disponible o se ha demostrado que es incorrecta, el hidrógrafo puede preparar cartas cotidal o de isoamplitud en el campo desde los niveles de agua preliminares.

Una carta cotidal contiene líneas de iguales intervalos lunitidales con respecto a Greenwich. Para la zonificación en el campo, las cartas cotidales son usualmente dibujadas para mostrar líneas de igual tiempo de altura o de bajamar antes o después del tiempo relevante en una estación de marea de referencia.

Las cartas de isoamplitudes contienen líneas de igual amplitud de marea. Para el uso en el campo, las líneas son usualmente marcadas con razones relativos a la estación de referencia. Estas relaciones con el registrador de referencia facilitan de esta forma la preparación de los factores de corrección en la manera. Las figuras 5.12 y 5.13 son ejemplos de las cartas cotidales y de isoamplitud de una bahía hipotética en la que el levantamiento se está haciendo.

CONSTRUCCION DE UNA CARTA COTIDAL CON CURVAS DE TIEMPO



CONSTRUCCION DE UNA CARTA COTIDAL CON CURVAS DE AMPLITUD

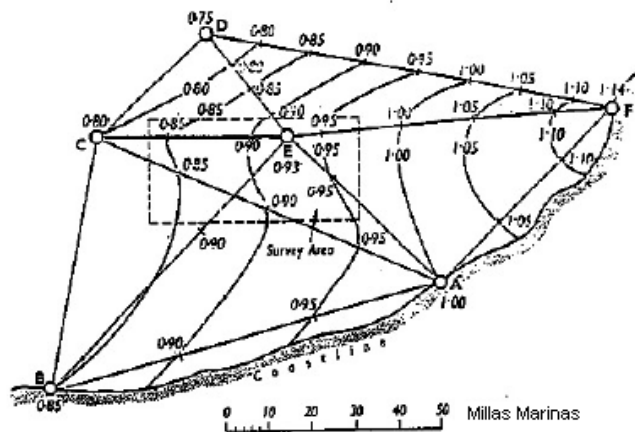


Fig. 5.12 and 5.13

Carta Cotidal – las cartas cotidales están generalmente construidas usando herramientas de dibujo GIS. El siguiente es un simple manual de ejemplo para ilustrar algunos de sus fundamentos. Para construir una carta cotidal, el hidrógrafo debe delinear la estación de referencia y todas las estaciones de marea secundarias, terciarias y de corto plazo en el área de estudio. Para mejores resultados, el área de estudio debe estar dentro de un triángulo equilátero o un cuadrilátero formado por las estaciones de marea. Para cada estación el tiempo de llegada de la pleamar y de la bajamar es anotado antes o después del tiempo de llegada a la estación de referencia. En algunos casos, las diferencias de tiempo son las mismas para la pleamar y la bajamar.

Para simplificar, este caso está mostrado en la Figura 5.12. , en muchos casos, sin embargo, las cartas cotidales separadas para pleamar y bajamar son requeridas. Las estaciones adyacentes y opuestas se conectan con líneas rectas. Intervalos periódicos a lo largo de cada línea son entonces interpolados y marcados. Los segmentos de tiempo utilizados dependen de la amplitud de marea y de la precisión deseada para los reductores. Para la mayoría de las áreas, 10 min. es un intervalo apropiado para seleccionar. Las marcas de intervalo correspondientes a lo largo de cada línea están conectadas con una curva leve como se muestra en la Figura 5.12. Cuando dos puntos interpolados entran en

conflicto, se le da preferencia a la marca a lo largo de la línea más corta y a las marcas en las líneas que las curvas interceptan más cerca de la perpendicularidad. En muchos casos, las áreas de estudio son tan complejas que dibujar líneas de interpolación en las estaciones conectores no es práctico y las líneas cotidales son ubicadas por el oceanógrafo usando herramientas GIS.

Cartas de Isoamplitud – Como se muestra en la Figura 5.13, la carta es diseñada como en la carta cotidal. En vez de tiempos se anotan las amplitudes de marea y la razón de amplitud a la estación de referencia. Cada línea de conexión es interpolada por incrementos, normalmente de 0.1 m de amplitud o el incremento de razón equivalente. Líneas suaves de isoamplitud son entonces dibujadas a través de los puntos correspondientes en cada línea, dando prioridad en la misma manera de las líneas cotidales.

Cartas de Zonificación – La carta de zonificación está construida al sobreponer la carta cotidal en la carta de isoamplitud. El hidrógrafo puede entonces seleccionar las regiones para aplicar los correctores de amplitud y de tiempo a la estación de referencia de altura y tiempo. Al revisar las figuras 5.12 y 5.13 se revelará que las líneas cotidales y las de isoamplitud no son paralelas. Esta diferencia en orientación es típica en la mayoría de las áreas y casi siempre resultan en zonas correctoras de forma irregular que no pueden ser operacionalmente eficientes. Para los propósitos de simplificar los correctores de campo preliminares, sin embargo, el hidrógrafo puede ajustar el tamaño y la forma de las zonas y acomodar la situación operacional. Por ejemplo, si un sistema de sondeo de líneas este-oeste estuviera planificado, podría ser más eficiente para alterar las zonas en bandas este-oeste a lo largo de la bahía. Se convierte en un problema de juicio al balancear las consideraciones operacionales con la necesidad de exactitud y precisión. Sin importar la zona seleccionada por el hidrógrafo en el campo, sin embargo, la zona final estará basada en un análisis completo de los niveles de aguas observados y serán designados para máxima precisión.

Zonificación Costa Afuera – Cuando es imposible, como para los sondeos costa afuera, encerrar un área de estudio con las estaciones de marea, las zonas de nivel de agua deben ser seleccionadas con consideraciones más teóricas... Cuando la plataforma continental es extensa y la onda de marea se aproxima paralela a la orilla, como lo hace en la mayor parte de la costa este de los Estados Unidos, la marea llegará costa afuera antes que costa adentro. En otras costas, como en la costa oeste de los Estados Unidos, la onda de marea es casi perpendicular a la orilla con el tiempo mínimo diferencias costa afuera de amplitud. Para los factores de corrección de sondeo de costa afuera, los estimados de tiempo y las correcciones de amplitud a ser aplicadas a las estaciones de marea costeras pueden ser hechos de cartas cotidales existentes o de modelos de marea oceánica existentes.

2.2.4 Operación de la estación de control de nivel de agua

Las estaciones de control de nivel de agua son aquellas que ya han aceptado datums calculados para ellas y que están típicamente en operación durante el levantamiento. Estas pueden ser operadas por la agencia o el país que ejecuta el levantamiento o mantenidas por otra entidad. Estas estaciones de control son típicamente utilizadas como referencias para la predicción de mareas, como recursos directos de los factores de corrección de nivel de agua durante las operaciones de levantamiento, como recurso de control de datos a los que los correctores de zonificación son aplicados y controlan la comparación simultánea con estaciones de corto plazo para la recuperación de datums o la determinación de datums. Estas estaciones de control de largo plazo son usualmente parte de la red de estaciones de mareas y de nivel de agua nacional de la nación.

2.2.5 Requisitos para estaciones de nivel de agua suplementarias

Estas estaciones son utilizadas para dar datos de series de tiempo durante las operaciones de levantamiento, las referencias de datum de marea y la zonificación de marea que influyen en la producción de factores de corrección finales de nivel de agua para áreas específicas de levantamiento. Las ubicaciones de las estaciones y los requisitos pueden ser modificados luego del reconocimiento de la estación o a medida que las operaciones del levantamiento progresan.

La duración de la adquisición de los datos continua debe ser de un mínimo de 30 días excepto para las zonas de calibración. La adquisición de los datos es de al menos 4 horas antes de comenzar las operaciones del levantamiento hidrográfico hasta 4 horas después de terminar las operaciones de levantamiento hidrográfico y/o la verificación de la línea de la costa en las áreas donde se aplica. Las estaciones identificadas como estaciones de “30 días” son las principales estaciones subordinadas para el establecimiento del datum, contando con que los reductores de marea para un proyecto dado y para el análisis armónico del que se obtienen las constantes armónicas para calcular la predicción de marea. En estas estaciones, los datos deben ser recolectados a través de un período de estudio completo en áreas específicas para las que se han solicitado y no menos de 30 días continuos se necesitan para la determinación del datum de marea preciso. Adicionalmente, los registradores suplementales o de respaldo pueden ser también necesarios basados en la complejidad de las hidrodinámicas y/o la severidad de las condiciones ambientales del área del proyecto.

La instalación de una estación de medición suplemental completa de nivel de agua constituirá de lo siguiente:

- a. La instalación del sistema de medición de nivel de agua (sensores de nivel de agua, sensores auxiliares de medición (si se requieren), una Plataforma de Recolección de datos (DCP) o un registro de datos y un transmisor satelital (si está instalado) y la estructura de apoyo para el DCO y el sensor, y una escala de mareas (si se necesita).
- b. La recuperación y/o instalación de un número mínimo de marcas de nivelación y una conexión de nivel entre las marcas de nivelación y los sensores de nivel de agua y la escala de marea según sea apropiado para la instalación y el desmontaje de los registradores. Las mediciones del GPS estático debe ser hecha a un subconjunto de las marcas de nivelación.

2.2.5.1 Sistemas de medición de nivel de agua

2.2.5.1.1 Plataforma de recolección de datos y sensor de nivel de agua

Varios tipos de sensores de nivel de agua y de configuraciones de estaciones son posibles. Hay varios tipos de sensores de nivel de agua que son usados por varios países para apoyar los levantamientos hidrográficos. Los Estados Unidos utilizan sensores acústico como registrador principal y sensores digitales de presión a gas (burbujas de nitrógeno) para el control del registrador principal y como estación suplementaria, ver la Figura 5.14. Muchos otros tipos de sistemas con flotadores o de presión interna no ventilados son utilizados alrededor del globo.

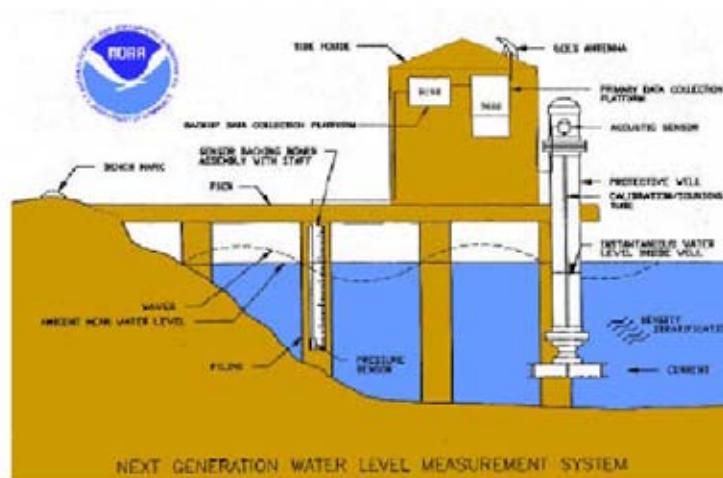


Fig. 5.14

La amplitud de medición del sensor debe ser mayor a la amplitud esperada del nivel de agua. Los sistemas de sensores o registradores deben estar calibrados antes del estudio y la calibración debe ser revisada antes de retirarla de las operaciones. La precisión estándar de la calibración debe ser verificable con las normas nacionales o internacionales. La resolución de los sensores de nivel de agua requerida es una función de la amplitud de marea del área en la que los estudios hidrográficos son planificados. Para amplitudes de marea menores o iguales a 5 m la resolución del sensor de nivel de agua debe ser de 1 mm o mejor; para la amplitud de marea entre 5 m y 10 m, la resolución del sensor de nivel de agua requerido debe ser de 3 mm o mejor; y para una amplitud de marea mayor a 10 m, la resolución del sensor del nivel de agua requerido debe ser de 5 mm o mejor que éste.

Los sistemas de adquisición de datos deben adquirir y guardar las mediciones de nivel de agua en períodos de tiempo requeridos para la tabulación de las variaciones importantes en los niveles de agua. Para las mareas, Los Estados Unidos usan 6 minutos de intervalos para asegurar que la tabulación de la pleamar y la bajamar estén lo más cercanas a la décima de una hora. Otros intervalos de muestreo pueden ser apropiados para los lagos y las áreas sin mareas, aunque el intervalo de muestra debe ser suficientemente corto para medir la acción del seiche. Muchos sensores emplean intervalos de muestro de altas velocidades para luego dar un informe sobre los datos de la muestra observada. Los sistemas de NOAA usan un promedio de 3 minutos de muestreo de mayor frecuencia en los sensores para derivar puntos de 6 minutos de intervalo de datos. Los patrones de muestra estadística y de desviaciones estándar son entonces utilizados como parámetros de control de calidad. Los registros de datos de nivel de agua deben tener una precisión de reloj dentro de un minuto al mes. Conociendo las fuentes de error para cada sensor será manejado apropiadamente a través de mediciones auxiliares y/o algoritmos de corrección. Los ejemplos de dichos errores son las variaciones de la densidad de agua para los registradores de presión, la corrección de presión barométrica para los sistemas no ventilados, las diferencias de temperatura de aire en el sondeo para los sistemas acústicos y la alta frecuencia de la acción de la ola y las corrientes de la más alta velocidad de todos los tipos de sensores.

Para las aplicaciones del datum de marea, es importante que los sensores y registradores estén cuidadosamente mantenidos con la revisión de calibración frecuente o cambios de ciclo de los sensores calibrados para las instalaciones de largo plazo. El sensor “cero” debe ser relacionado precisamente con la escala de marea y/o las marcas de nivelación a través de comparaciones entre la escala de marea y el medidor o directamente la nivelación entre el sensor y las marcas de nivelación. La estabilidad vertical del “cero” del sensor física e interna, debe ser monitoreada y cualquier movimiento tomado en cuenta en la reducción de los datos y en el cálculo del datum.

El hidrógrafo debe instalar un mareómetro en la estación si la medida de referencia de un sensor (cero en el calibrador) no puede ser directamente nivelado a las marcas de nivelación local, es decir, el orificio se encuentra sobre el fondo marino en el caso de los registradores de presión a base de burbujas. Aunque el calibrador pueda ser nivelado directamente, las lecturas del mareómetro son requeridas aún para la evaluación de las variaciones en el desempeño del calibrador debido a las variaciones de densidad en la columna de agua en el tiempo. El mareómetro debe ser montado independientemente al sensor de nivel de agua para que la estabilidad del mareómetro o los sensores se mantenga. El mareómetro no debe montarse en el mismo lugar donde se monte el sensor de nivel de agua. El mareómetro debe ser verticalizado. Cuando se unan dos o más escalas de mareómetro para formar uno mayor, el hidrógrafo debe tener extremo cuidado para asegurar que la precisión de el mareómetro a toda su longitud. El desnivel entre el cero de la regla y el soporte del sensor debe ser medido cuando se instalan y cuando se levanta la estación dejando constancia de los resultados en las planillas de documentación.

2.2.5.1.2 Escala o Regla de Marea

En áreas de gran amplitud de marea y playas de gran pendiente (como en Cook Inlet y en el Golfo de Maine), la instalación y mantenimiento de la escala de marea puede ser extremadamente difícil y costosos. En estos casos, la instalación física de las escalas de marea puede ser sustituida por la

nivelación sistemática de la orilla del agua a la marca de nivelación más cercana. La marca de nivelación se convierte en la “referencia altimétrica” y la diferencia de elevación de la orilla del agua se convierte en la “lectura de la escala de marea”.

Cuando se utilizan los sensores de presión, por ejemplo, una serie de comparaciones entre mareógrafos y escalas de marea en una porción importante de un ciclo de marea debe ser requerida al comienzo, con intervalos frecuentes durante el despliegue y al final de éste.

Las observaciones de las escalas de marea y los mareógrafos al comienzo y final del despliegue debe ser al menos cada tres horas y las observaciones periódicas durante el despliegue debe ser de una hora.

En general, el mareógrafo y la escala de marea deben leerse simultáneamente y grabados una vez al día (mínimo tres días de un período de siete) durante toda la duración de la medición del nivel de agua. El promedio de las diferencias entre la escala de marea y el mareógrafo debe ser aplicado a las medidas de nivel de agua para relacionar los datos al “cero” de la escala. Las comparaciones frecuentes entre la escala de marea y el mareógrafo (al menos tres veces a la semana y ocho al mes) durante el despliegue debe ser requerida para ayudar a asegurar la estabilidad de la medida y para minimizar los errores de procesado. Un alto número de lecturas independientes de la escala de marea disminuye la incertidumbre de transferir las medidas a la estación de referencia y las marcas de nivelación. Si logísticamente, no es práctico tener un observador de la marea local o para la parte de campo visitar la estación porque el área de estudio está a una gran distancia de la estación, entonces cuando se hagan las visitas, una serie de muestreos de varias lecturas de la escala de marea debe hacerse en un período de pocas horas en lugar de una sola lectura.

Si la regla de marea se encuentra destruida durante el relevamiento, entonces se debe instalar una nueva para el período restante del levantamiento y se deben calcular los desniveles del mareómetro al registrador con nuevas observaciones entre ellos.

2.2.5.1.3 Marcas de nivelación y nivelación

Una red de marcas de nivelación es una parte integral de cada estación de medida de nivel de agua. Una marca de nivelación es un objeto físico o conjunto de marcadores (monumento) diseñado para la estabilidad y usado como referencia de los datums verticales y horizontales. Las marcas de nivelación en la vecindad de una estación de medida de nivel de agua son usadas como la referencia de los datums de marea local derivados de los datos de nivel de agua. La relación entre las marcas de nivelación y el sensor del nivel de agua o escala de marea están establecidos por el nivel de diferencia. Ya que las medidas del registradores están referenciadas a las marcas de nivelación, la calidad global de los datums es en parte dependiente de la calidad de la instalación de la marca de nivelación y de la calidad de la nivelación entre el nivel de agua y la marca de nivelación.

2.2.5.1.4 Número y tipo de marcas de nivelación

El número y el tipo de las marcas de nivelación requeridos dependen de la duración de las medidas de nivel de agua.

Cada estación típicamente tiene una marca de nivelación designada como la marca de nivelación primaria (PBM), que debe ser nivelada a cada vuelta. La PBM es típicamente la marca más estable en proximidad cercana a la estación de medida de nivel de agua. La marca de nivelación más deseable para las observaciones de GPS tendrán un despeje de 10° sobre el horizonte en la vertical y 360° en forma horizontal alrededor de la marca. Si el PBM es determinado como inestable, otra marca debe ser designada como PBM. La fecha de cambio y la diferencia de elevación entre el PBM anterior y el nuevo deben ser documentadas. Para las estaciones instaladas para más de un mes, deben establecerse de 3 a 5 marcas de nivelación o recuperadas y niveladas para cada estación.

2.2.5.1.5 Nivelación

Al menos nivelaciones de tercer orden deben ser hechas en las estaciones subordinadas de corto plazo operadas por menos de un año. Las nivelaciones se deben hacer entre los sensores de los niveles de agua o las escalas de marea y el número requerido de marcas de nivelación cuando la estación de medida del nivel de agua sea instalada, modificada (es decir, el sensor de nivel de agua es reparado o remplazado), para propósitos de delimitación o antes de desmontarlo. En cualquier caso, las nivelaciones son requeridas en intervalo máximo de seis meses durante la operación de la estación y son recomendados luego de tormentas fuertes, huracanes, terremotos, para documentar la estabilidad (ver estabilidad más abajo).

Los niveles de delimitación para el número apropiado de marcas (cinco para estaciones de un mínimo de 30 días) son requeridos si las mareas suaves requieren de 30 días o más antes del desmontaje planeado de los registradores aplicables o después de 6 meses para las estaciones de recolección de datos de proyectos hidrográficos de largo plazo.

2.2.5.1.6 Estabilidad

Si existe un movimiento no resuelto del sensor del nivel de agua o el cero de la escala de marea relativo al PBM, de una nivelación a la otra, mayor a 0.010 m, el hidrógrafo debe verificar el movimiento aparente nivelando otra vez las nivelaciones entre el “cero” del sensor o escala de marea y la PBM. Este estimado de 0.010 m no debe ser confundido con las tolerancias de cierre usadas para el orden y la clase de la nivelación.

2.2.5.1.7 Observaciones de GPS en las marcas de nivelación

Los levantamientos con GPS estáticos deben ser hechos como mínimo en de una marca de nivelación, preferiblemente en dos marcas si el tiempo y los recursos lo permiten, en cada estación de nivel de agua subordinada instalada/ocupada para la hidrografía. Los levantamientos de GPS deben realizarse en estaciones de nivel de agua simultáneamente con la ocupación de las marcas del NAVD 88, si es posible, para lograr las transferencias de datum de nivel de agua usando alturas ortométricas derivadas por GPS.

Los levantamientos de alta precisión con GPS diferencial estático requieren de un receptor GPS de calidad geodésica, frecuencia doble, receptor GPS de cobertura completa con un mínimo de 10 canales para rastrear los satélites GPS. Una antena de anillo obturador es preferible, sin embargo, cualquier antena de calidad geodésica de suelo puede usarse. Más importante que el tipo de antena es que las mismas antenas o las antenas idénticas deben ser usadas durante las sesiones de observación completas. Si no, se debe aplicar una corrección para la diferencia de los patrones de la fase de la antena (patrones de fase modelados). Esto es extremadamente crítico para obtener resultados verticales precisos. La longitud del cable de la antena entre la antena y el receptor debe ser mantenido al mínimo cuando sea posible; 10 metros es la longitud típica del cable. Si se necesita un cable más largo, el cable debe ser fabricado de cable coaxial de pérdida baja (RG233 para hasta 30 metros y RG214 para más de 30 metros).

La marca de nivelación más deseable para las observaciones de GPS tendrá un despeje vertical de 10° sobre el horizonte y 360° en la horizontal alrededor de la marca. Las marcas establecidas recientemente deben ser colocadas en los lugares que tienen las autorizaciones necesarias, si es posible.

Los datos meteorológicos (temperatura del aire, presión barométrica y humedad relativa) necesitan ser recolectados, si están disponibles, durante las observaciones de GPS. Los datos meteorológicos deben ser recolectados en o cerca del centro de la fase de la antena. Todo el equipo debe ser revisado periódicamente para la apropiada calibración.

2.2.5.2 Documentación de la estación

El paquete de documentación:

- a. Instalación de una estación
- b. Desempeño de los niveles limitantes
- c. Reparación y mantenimiento del registrador
- d. Desmontaje de la estación

La documentación de la estación generalmente incluye, pero no está limitada a lo siguiente:

- a. Documentación de la prueba de calibración de una fuente independiente que no sea el fabricante para cada sensor usado para recolectar el nivel de agua o los datos auxiliar
- b. Un informe sobre la estación documentando la información de la configuración de la estación y los meta datos relacionados;
- c. Sección nueva o actualizada de la carta náutica o el mapa equivalente indicando la ubicación exacta de la estación, mostrando el número de la carta o el nombre del mapa y la escala.
- d. Croquis de gran escala de la estación y archivo compatible de GIS digital en un diskette mostrando la ubicación relativa del mareógrafo, escala de marea (si la hay), marcas de nivelación y objetos de referencia mayores encontrados en las descripciones de las marcas de nivelación. El croquis debe incluir una flecha indicando la dirección norte, un bloque de título, latitud y longitud (derivado del GPS portátil) del mareógrafo en todas las marcas de nivelación.
- e. Descripción nueva o actualizada de cómo llegar a la estación desde un punto geográfico mayor.
- f. Fotografías de los componentes de la estación y de las marcas de nivelación. Fotografías digitales son mejores. Como mínimo, las fotografías deben mostrar una impresión del sistema de medida del nivel de agua en la instalación incluyendo los sensores y el fondo del calibrador; una vista frontal de la escala de marea (si la hay); vistas múltiples de los alrededores y otras vistas necesarias para documentar la ubicación; fotografías de cada marca de nivelación, incluyendo una vista de la ubicación y un acercamiento para ver la marca de nivelación. Todas las fotografías deben ser anotadas y referenciadas con el nombre de la estación, número, ubicación y fecha de la fotografía.
- g. Descripción y notas de recuperación de las marcas de nivelación
- h. Registros de la nivelación y resumen de los niveles, incluyendo información del instrumento de nivelación.
- i. La hoja de trabajo del cálculo del datum calibrado o la hoja de trabajo de la diferencia de la escala de marea / mareógrafo como sea apropiado mostrando como el sensor “cero” es referenciado a las marcas de nivelación.

2.2.6 Procesado de los datos y la tabulación

2.2.6.1 Control de calidad de los datos

El producto final requerido usado en la generación de los factores de corrección de marea y para la determinación del datum de marea es una serie de datos continuos de intervalos discretos de datos de nivel de agua para el período de tiempo de hidrografía deseado y por un período mínimo de tiempo

especificado del cual derivar los datums de marea. (Nota: este intervalo de tiempo discreto es típicamente de 6 a 10 minutos pero para propósitos de discusión, se usará 6 minutos). El intervalo de datos de nivel de agua de 6 minutos de los registradores debe ser controlado en su calidad para evitar datos inválidos o sospechosos como revisión final previa a la generación del producto y a su aplicación. Esto incluye la revisión de las separaciones de datos, las discontinuidades de los datos, los cambios de datums, los puntos de datos defectuosos, puntos de datos fuera de las tolerancias esperadas como los valores máximo y mínimo esperados y de redes anómalas en las elevaciones de marea causadas por la deriva del sensor o el movimiento vertical de los componentes de la estación de mareas y de las marcas de nivelación.

El control de calidad debe incluir las comparaciones de datos simultáneos de mareógrafos de respaldo, las mareas predichas o datos de estaciones cercanas, como sea apropiado. La edición de los datos y el relleno de espacios deben usar algoritmos y procedimientos de sondeo matemáticamente documentados y se deben hacer una auditoria para rastrear todos los cambios y las ediciones de los datos observados. Todos los datos deducidos deben estar resaltados apropiadamente. Las mediciones de nivel de agua de cada estación deben estar relacionadas a un datum en común llamado Datum de Estación. El Datum de Estación es un datum arbitrario y no debe confundirse con un datum de marea como el MLLW. Todas las discontinuaciones, brincos u otros cambios en el registro del registrador (referirse a la guía de usuario del registrador) que pueden ser originadas por el movimiento vertical de cualquiera de los mareógrafos, escalas de marea, o marcas de nivelación deben estar documentados en su totalidad. Para evitar confusiones todos los datos debe grabarse en UTC (Tiempo Coordinado Universal – También conocido como Hora Meridiana Greenwich- GMT) y las unidades de medida deben ser denotadas apropiadamente en todas las copias físicas y archivos digitales.

2.2.6.2 Procesado de datos y tabulación de la marea

El intervalo de tiempo de 6 minutos de los datos de nivel de agua es usado para la tabulación estándar de los productos generados. Estos productos incluyen los tiempos y las alturas de las pleamares y las bajamares, las alturas cada hora, los niveles de agua máximo y mínimo mensual y los valores promedio mensuales para los parámetros necesarios. Ejemplos de estas tabulaciones de productos se pueden ver en la Figura 5.15 para las estaciones de marea. Los tiempos y alturas de la pleamar y la bajamar deben derivarse del ajuste de la curva de los datos tomados a intervalos de 6 minutos. Para propósitos de la tabulación de la pleamar y la bajamar y no del ruido no mareal de alta frecuencia, las pleamar y bajamar sucesivas deben ser calculadas del promedio de las alturas cada hora en cada mes calendario de los datos. Los datos deben ser tabulados y referidos al datum de la estación que puede ser el cero de una regla, el datum arbitrario de una estación mareográfica, el MLLW, etc., sobre la duración total de la serie de observaciones. Las descripciones de los procedimientos generales utilizados en la tabulación se encuentran en el Glosario de Mareas y Corrientes, Manual de Observaciones de Marea y la Planificación de Datums de Marea.

2.2.6.3 Edición de los datos y especificaciones del llenado de brechas

Cuando no están disponibles los datos del sensor de respaldo, no se deben llenar las brechas de datos en los 6 minutos si las brechas son mayores a un tiempo de 3 días consecutivos. El llenado de las brechas debe usar procedimientos y algoritmos de sondeo matemáticamente y científicamente documentados y se debe hacer una auditoria para rastrear todo el llenado de brechas en los datos observada. Las brechas mayores de 3 horas deben usar fuentes de datos externos como los datos de una estación cercana. Todos los datos generados del proceso de llenado de brechas deben marcarse como deducida. Individualmente las alturas de cada hora, las pleamar y bajamar, y los promedios diarios derivados de los datos deducidos deben ser marcados como deducidos.

2.2.6.4 Cálculo del promedio mensual

Cuando la tabulación de las mareas cubre períodos de tiempo mensuales los promedios mensuales de los distintos parámetros de marea se calculan para el uso subsiguiente en la determinación del datum de marea y para el control de calidad de los datos a largo plazo. El nivel del mar promedio mensual,

por ejemplo, es un parámetro importante para comprender la tendencia de largo período del nivel del mar y las variaciones estacionales de los niveles de agua. Para propósitos del cálculo del promedio mensual, los promedios mensuales no deben ser calculados si las brechas en los datos son mayores a tres días consecutivos.

Fig. 5.15 “Ejemplo de la Tabulación de Marea”

Enero 28 2003 08:24 DATOS DE PLEAMARES/BAJAMARES Octubre, 2002

Servicio Oceánico Nacional (NOAA)

Estación: 8454049

T.M.: 0 W

Nombre: QUONSET POINT, RI

Unidades: Metros

Typo: Mixta

Datum: Estación de Referencia

Nota: > Pleamar más alta/Bajamar más baja

[] Marea Deducida Calidad: Verificada

Pleamar			Bajamar		Pleamar			Bajamar	
Dia	Hora	Altura	Hora	Altura	Dia	Hora	Altura	Hora	Altura
1	7.5 <20.2	8.037 8.071	2.4 <12.9	7.326 7.197	16	<9.7 <21.3	[8.292] 8.782	2.6 14.6	7.394 7.563
2	8.8 <21.4	8.000 8.176	2.6 <14.3	7.173 7.066	17	10.6 <22.8	8.345 8.323	<6.0 <15.4	7.470 7.245
3	9.5 <22.3	8.233 8.314	3.2 <15.6	7.157 7.049	18	10.7 23.3	8.257 8.230	4.0 16.7	7.248 7.196
4	10.5 <23.1	8.525 8.599	4.1 <16.3	7.163 7.057	19	<11.8 <23.4	8.296 8.292	<4.3 17.1	7.140 7.204
5	<11.5 23.8	8.632 8.466	4.4 <17.1	7.109 6.873	20	12.4	8.209	<5.0 <17.5	7.066 6.994
6	12.2	8.477	<5.8 18.2	6.670 6.832	21	0.4 <12.8	[8.128] 8.297	5.8 18.1	7.036 7.090
7	<0.5 <13.3	8.582 8.819	<6.4 19.2	6.961 6.969	22	0.9 <13.4	8.142 8.216	<6.5 19.0	6.999 7.040
8	1.3 <14.0	8.457 8.644	6.9 <20.1	6.888 6.877	23	1.4 <13.7	[8.075] [8.180]	<6.9 <19.1	7.013 6.915
9	2.3 <14.9	8.355 8.631	<7.9 20.9	6.852 6.986	24	2.1 <14.7	7.934 8.164	7.3 19.9	6.969 7.093
10	3.4 <15.8	8.316 8.497	<8.2 21.2	6.969 7.086	25	2.9 <15.4	[7.993] 8.156	<8.0 <20.3	7.047 7.136
11	4.3 <16.7	8.240 8.455	<9.4 22.1	7.129 7.305	26	3.8 <16.2	[8.061] 8.607	8.3 23.5	7.204 7.389
12	5.2 <17.7	8.295 8.462	<10.3	7.380	27	4.6 <17.1	7.974 8.216	<9.1 21.9	7.090 7.348
13	5.9 <18.7	8.266 8.344	0.5 11.8	7.481 7.461	28	5.4 <17.9	7.860 8.008	<10.5	7.064
14	6.8 <20.1	8.077 8.161	<2.2 <12.7	7.401 7.190	29	6.2 <18.6	7.949 8.042	1.5 <11.6	7.243 7.109
15	8.3 20.9	8.156 8.273	2.0 <14.1	7.349 7.344	30	7.3 <20.0	[8.052] [8.154]	<1.5 13.0	7.197 7.211
					31	8.3 <20.7	8.215 8.290	2.1 <14.1	7.239 7.222

Marea más Alta: 8.819 13.3 Hrs Oct 7 2002

Marea más baja: 6.670 5.8 Hrs Oct 6 2002

Promedio Mensual: MHHW 8.357
MHW 8.272
MTL 7.707
DTL 7.724
MSL 7.668
MLW 7.141
MLLW 7.091

DHQ 0.085
GT 1.266 HWI 0.42 Hrs
MN 1.131 LWI 6.13 Hrs
DLQ 0.050

2.2.7 Cálculo de los Datums de marea

Un datum es llamado un datum de marea cuando está definido por cierta fase de marea, Los datums son datums locales y no deben extenderse en áreas que tienen características hidrográficas diferentes sin medidas de sustento. Con el propósito de que puedan ser recuperadas cuando se les necesite, estos datums están referenciados a los puntos fijos llamados marcas de nivelación.

Procedimientos básicos:

- a. Hacer observaciones – Los datums de marea están calculados de observaciones continuas del nivel de agua en longitudes de tiempo específicas. Las observaciones están hechas en ubicaciones específicas llamadas estaciones de referencia. Cada estación consta de un registrador o sensor de nivel de agua, una plataforma de recolección de datos o un registrador de datos y un sistema de transmisión de datos y de un grupo de marcas de nivelación establecidas en la vecindad de la estación de referencia. El Servicio Oceánico Nacional de los Estados Unidos (NOS) recolecta los datos de nivel de agua en intervalos de 6 minutos.
- b. Tabular la marea – una vez que las observaciones de nivel de agua están controladas en calidad y cualquier brecha pequeña rellenada, los datos son procesados al tabular las pleamares y las bajamares y las alturas horarias para cada día. Los parámetros de la marea de estas tabulaciones de marea diarias son entonces reducidas a los valores promedio, típicamente en una base a un mes calendario en registros de períodos más largos o en unos pocos días o en semanas para registros de corto plazo.
- c. Cálculo de Datums de marea – Los primeros datums de reducción de marea están determinados directamente por los valores promedio de los parámetros de marea en 19 años NTDE (Nacional Tidal Datum Epoch), *Tiempo nacional de Datum de Marea*. Los datums de marea equivalentes a NTDE son calculados de estaciones de referencia que operan por períodos de corto plazo a través de la comparación de los datos simultánea entre la estación de corto plazo y la de largo plazo.
- d. Cálculo de las Elevaciones de las Marcas de Nivelación – Una vez que los datums de marea sean calculados de las tabulaciones, las cotas son transferidas a puntos fijos elegidos sobre la tierra, mediante nivelación geométrica mientras dure la operación de la estación mareográfica. Las elevaciones y descripciones de las marcas de nivelación son difundidas por la NOS a través de su hoja de publicación de marcas de nivelación para cada estación. Las conexiones entre las elevaciones de datum de marea y las elevaciones geodésicas son obtenidas después de la nivelación de las marcas de nivelación y las marcas de nivelación geodésicas. Tradicionalmente, esto se ha logrado usando el nivelador diferencial, sin embargo las técnicas de levantamiento de GPS pueden ser también utilizados (NGS, 1997).

Las ubicaciones de las estaciones de marea están organizadas en una jerarquía:

- a. Estaciones de control de marea son generalmente aquellas que han sido operadas por 19 o más años, se espera que operen continuamente en el futuro y son usadas para obtener un registro continuo de los niveles de agua en una localidad. Las estaciones de control de marea están ubicadas para dar el control de datum para las aplicaciones nacionales y están ubicadas en tantos lugares como sea necesario para el control del datum.
- b. Estaciones de Nivel de Agua Secundarias son aquellas que han sido operadas por menos de 19 años pero más de una año y tienen una vida útil limitada. Las estaciones secundarias dan control en las bahías y estuarios donde los efectos de marea

localizados no son reconocidos en la estación de control más cercana. Las observaciones en una estación secundaria no son suficientes usualmente para una determinación precisa e independiente de los datums de marea, pero cuando se reducen en comparación con las observaciones simultáneas en una estación de control de marea apropiada se puede obtener resultados muy satisfactorios.

- c. Estaciones de nivel de agua Terciarias son aquellas que han sido operadas por más de un mes pero menos de un año. Las estaciones de medida de nivel de agua de corto plazo (secundarias y terciarias) pueden tener su datos reducida o equivalente a los datums de marea de 19 años a través de comparaciones matemáticas simultáneas a una estación de control cercana.

Las estaciones de marea de control o primarias, las secundarias y las estaciones terciarias están ubicadas en lugares estratégicos para la cobertura de la red. El criterio de selección del sitio incluye la cobertura espacial de los cambios importantes en las características de la marea tales como: Cambios de tipo de marea, cambio en la amplitud de marea, cambios en el tiempo de marea, cambios en el promedio diario del nivel del mar y cambios en la tendencia de largo plazo del nivel del mar. Otros criterios incluyen la cobertura de las áreas de navegación críticas y las zonas de transición, los sitios históricos, la proximidad a la red geodésica y la disponibilidad de las estructuras existentes, como muelles apropiados para la ubicación del equipo científico.

Procedimiento de Comparación Simultánea:

Conceptualmente, los siguientes pasos necesitan ser completados para calcular el equivalente datum de marea NTDE en las estaciones de corto plazo utilizando el método de comparación de observaciones simultáneas:

- a. Seleccionar el período de tiempo en el que las comparaciones simultáneas se van a hacer;
- b. Seleccionar la estación de control de marea apropiada para la estación subordinada de interés;
- c. Obtener los datos simultáneos de las estaciones subordinadas y de control y obtener o tabular las mareas y calcular los promedios mensuales, apropiadamente;
- d. Obtener los valores de los datums de marea aceptados (relativos a la NTDE en los Estados Unidos, por ejemplo) en la estación de control;
- e. Calcular las diferencias promedio y/o los cocientes (apropiadamente) en los parámetros de marea entre las estaciones de control y subordinadas en el período de comparación simultánea;
- f. Aplicar las diferencias promedio y los cocientes calculadas en el paso e, anteriormente, para los valores aceptados en la estación de control para obtener los valores NTDE equivalentes o correctos para la estación subordinada.

Cálculo de las Elevaciones de marcas de Nivelación.

Una vez que se hayan calculado los datums de marea a partir de las tabulaciones, las cotas son transferidas a las marcas de nivelación establecidas en tierra a través los desniveles obtenidos por nivelación geométrica entre el cero del sensor de mareas y los puntos fijos durante la operación de la estación (NOS Especificaciones y cumplimientos, 2000). Las conexiones entre las elevaciones de datum de marea y las elevaciones geodésicas son obtenidas después de nivelar las marcas de nivelación de la marea y la red de marcas de nivelación geodésicas. Tradicionalmente, éste ha sido

logrado utilizando un nivel diferencial, sin embargo las técnicas de levantamiento de GPS también pueden usarse (NGS, 1997).

2.2.7.1 Recuperación de Datum de marea

Cuando las estaciones de marea son instaladas en sitios históricos, las mediciones deben ser efectuadas para “recuperar” los datums de marea establecidos a través de nivelación geométrica que debe ser realizada referenciando el registrador de marea o cero de la regla a más de uno de los puntos fijos existentes con cota establecida. Con este proceso, la elevación MLLW publicada es transferida a las diferencias de nivel al “nuevo” registrador o mareómetro y comparadas con la elevación MLLW calculada con la nueva dará en el mismo “cero”. Los factores que afectan la recuperación del datum (es decir, las diferencias entre los datums nuevo y viejo) incluyen la longitud de cada serie de datos usadas para calcular los datums, la ubicación geográfica, las características de marea en la región, la longitud de tiempo en las recuperaciones, las tendencias de nivel del mar en la región y la estación de control usada. Basado en todos estos factores, la recuperación del datum puede esperarse que varíe de +/- 0.03 m a +/- 0.08 m. Por lo que, este proceso también sirve como procedimiento de control de calidad muy útil. Luego de efectuar una recuperación de datum exitosa y de establecer la estabilidad de la marca de nivelación, el valor histórico del Promedio más Bajo de la Bajamar (MLLW) debe ser usado como el datum operacional de referencia para los datos de un calibrador durante las operaciones de levantamiento hidrográfico.

2.2.7.2 Control de calidad de los Datums

Es esencial para el control de calidad del datum de marea tener procedimientos de procesado y nivelación de datos llevando a cabo a su extensión máxima. Se debe tener cuidado al calcular los datums de marea en los sistemas ribereños o en regiones de regimenes de marea desconocida. Las comparaciones marea-a-marea entre los datos de la estación subordinada y la de control normalmente detectarán las diferencias anormales que deben ser investigadas para determinar el mal funcionamiento del registrador o un movimiento del sensor. Los datums deben ser establecidos para más de una marca de nivelación. Las diferencias en elevación entre las marcas de elevación basadas en una nueva nivelación deben estar de acuerdo con las diferencias establecidas previamente en las hojas de marcas de nivelación publicada. Cualquier cambio en las diferencias de elevación debe estar conciliado antes de usar en cualquier procedimiento de recuperación de datum. La precisión del datum en una estación subordinada depende de varios factores, pero la disponibilidad y la elección de una estación de control adecuada de características de mareas similares, promedio de nivel de marea diaria y de similares variaciones estacionales del promedio del nivel del mar y similar tendencia de nivel de marea son las más importantes. La longitud de las series también va a determinar la precisión. A medida que las series sean más largas, el datum será más exacto y será mayor el control de calidad y la confianza ganados al analizar numerosas diferencias promedio mensuales entre las estaciones subordinada y la de control. En las estaciones históricas re-tomadas para las que se han hecho las recuperaciones de datums, los datums actualizados deben ser calculados de las series de tiempo nuevas y comparadas con los datums históricos a medida que el levantamiento se hace.

2.2.7.3 Relaciones de los Datums geodésicos

Los datums de marea son datums locales verticales que pueden cambiar considerablemente dentro de un área geográfica. Un datum geodésico es fijado a un plano de referencia para el control vertical de las elevaciones de la superficie. El Datum Vertical de Norte América de 1988 (NAVD 88) es el datum de referencia geodésico aceptado del Sistema de referencia Espacial Nacional Geodésico y es oficialmente apoyado por el Estudio Geodésico Nacional (NGS) con una red de GPS operando continuamente en las estaciones de referencia. La relación de los datums de marea con el NAVD tiene muchas aplicaciones hidrográficas, de dibujo costero y de ingeniería incluyendo el monitoreo del cambio del nivel del mar y el desarrollo de los sistemas de visualización de la carta electrónica GPS y de información etc. En algunos países, el datum local del Nivel del mar Promedio (MSL) ha sido confundido en el tiempo con el datum de referencia geodésico nacional porque los datums geodésicos

eran derivados originalmente de las medidas MSL en los mareógrafos. Sin embargo ya que el nivel del mar relativo ha cambiado con el movimiento de tierra vertical y el incremento global del nivel del mar, los datums geodésicos fueron desconectados del MSL oceanográfico local. El NAVD88, por ejemplo, uso sólo una estación de marea de referencia inicial y no es considerada una MSL de datum correlacionado.

Las marcas geodésicas existentes en la vecindad de una estación de marea subordinada deben ser investigadas y recuperadas. Una rutina de investigación está disponible en <http://www.ngs.noaa.gov>. Una conexión de nivel ortométrico y elipsoidal de GPS es necesaria en la estación de marea subordinada que tiene marcas de nivelación geodésicas localizadas en las cercanías. Las elevaciones de altura del NAVD88 para las marcas de nivelación publicada están dadas en las unidades de altura ortométrica Helmert por el NGS. Las precisiones de la red elipsoide GPS están clasificadas conformes a 2 cms o 5 cms de precisión estándar (Referirse al Memorando técnico de la NOAA NOS NGS-58). En el presente, las alturas elipsoides GPS que conformes a los 2 cms de estándar de precisión son requeridas para los contratos de proyectos de levantamiento hidrográfico. Refiérase a la sección 4.2.8 Observaciones GPS y la Guía de usuario para las Observaciones GPS, NOAA/NOS, actualizada en enero 2003.

Es preferible una conexión de nivel ortométrico a un vínculo elipsoidal GPS, donde sea aplicable, para derivar las alturas NAVD 88. Una conexión ortométrica se necesita si cualquiera de las marcas geodésicas (hasta cinco marcas) están localizadas dentro de un radio de 0.8 km de la estación de marea subordinada. Si las marcas apropiadas se encuentran en la base de datos del NGS, y están más lejos de esos 0,8 km hasta 10 km de la estación subordinada, entonces se necesita el GPS para derivar las alturas del elipsoide. Si no se encuentra un mínimo de cinco marcas de nivelación a 1 km de la estación subordinada, o no se encuentran las marcas geodésicas en la base del NGS a los 10 km de la estación subordinada, entonces se debe instalar, describir, conectar por niveles cinco nuevas marcas de nivelación, y las observaciones GPS deben ser tomadas en al menos una de las cinco marcas. (Refiérase a la Guía de Usuario para las Descripciones escritas de las Marcas de Nivelación, NOAA/NOS, Actualizada en enero 2002, Guía de Usuario para las Observaciones GPS, NOAA/NOS, Actualizada en enero 2003, y las Sección 4.2.8 Observaciones GPS). Al menos dos marcas de nivelación geodésicas deben ser usadas para validar la nivelación o la conexión de la altura del elipsoide GPS para propósitos de control de calidad.

2.2.8 Zonificación final y reductores de marea

Los datos relativos a la MLLW de las estaciones subordinadas instaladas específicamente para el levantamiento, o de las estaciones de control primarias, apropiadamente, deben ser aplicados para reducir los datos del sondeo al datum de la carta, directamente o indirectamente a través de una técnica de corrección conocida como la zonificación de marea. Las series de datos, directas o corregidas, relacionadas al MLLW u otras LWD aplicables a referencias de sondeo hidrográfico al datum de la carta son denominadas “reductores de marea” o “reductores de nivel de agua”

2.2.8.1 Construcción de los esquemas de zonificación de marea final

Ya que las características de marea varían espacialmente, los datos de los registradores de nivel de agua desplegados pueden no ser representativos de los niveles de agua en el área de estudio. La zonificación de marea debe ser implementada para facilitar la provisión de series de tiempo de datos de nivel de agua relativa al datum de la carta para cualquier punto en el área de estudio como las predeterminadas. Los requerimientos de precisión son mantenidos para el componente de medida de nivel de agua del levantamiento hidrográfico. El NOS actualmente utiliza el método de “zonificación discreta de marea” para las operaciones, donde las áreas de levantamiento están divididas en un esquema de celdas donde los bordes tienen características comunes de marea. El requisito mínimo para cada nueva celda es que se produzca un cambio de 0.06 m en la amplitud promedio de la marea y un retardo de 0.3 horas en la curva de marea (Intervalos de pleamar y bajamar de Greenwich). Las

correcciones de fase y de amplitud para los datos apropiada de la estación de marea deben ser asignadas a cada celda.

La zonificación preliminar, que está basada en los datos de la estación de marea histórica y en el estuario disponible y en los modelos de marea global, es referida a una estación de referencia de predicciones aplicables para su utilización durante el trabajo de campo. Para el procesado final, la zonificación preliminar debe ser remplazada por la “zonificación final” que es una refinación basada en los nuevos datos recolectados en las estaciones subordinadas durante el estudio. Con el esquema final de zonificación, las correcciones para cada zona deben ser derivados de una estación subordinada especialmente instalada para el estudio en vez de la estación de referencia utilizada para la zonificación preliminar. Los errores de zonificación deben minimizarse para que cuando se combinen con errores de medición del nivel de agua actual en el registrador y los errores en la reducción del datum de la carta, el error total de los factores de corrección de marea esté dentro de las tolerancias especificadas. El esquema de zonificación final y todos los datos utilizados en su desarrollo deben estar documentados y entregados.

2.2.8.2 Archivos de factores de corrección de marea y nota final de marea

Los datos de series de tiempo verificados, recolectados en las estaciones subordinadas apropiadas, están referidos al promedio del NTDE de la bajamar más Baja (Datum de la carta) a través de los procedimientos de cálculo del datum. Los datos de series de tiempo recolectados en intervalos de seis minutos y reducidos al datum de la carta como se especificó, de los registradores subordinados operados durante el levantamiento, deben ser usados directamente o corregidos con el empleo de un esquema de zonificación para que los reductores de marea estén dentro de las tolerancias especificadas. Una Nota Final de Marea debe ser entregada para cada hoja hidrográfica con información como cual zonificación final de marea debe ser aplicada a cuales estaciones para obtener los reductores de marea finales. Un ejemplo de la Nota Final de Marea y del gráfico de la zonificación de marea final se encuentra en las Figuras 5.16 y 5.17.

Fig 5.16 “NOTA FINAL DE MAREA y CARTA FINAL DE ZONIFICACION DE MAREA”

FECHA: diciembre 22, 1999

SEDE HIDROGRAFICA: Pacífico

PROYECTO HIDROGRAFICO: OPR-P342-RA-99

HOJA HIDROGRAFICA: H-10910

LOCALIDAD: 6NM Noroeste de cape Kasilof, AK

PERÍODO DE TIEMPO: Julio 22 –Agosto 20, 1999

ESTACION DE MAREA USADA: 945-5711 Cape Kasilof, AK

Lat. 60° 20.2'N Lon. 151° 2.8'W

PLANO DE REFERENCIA (PROMEDIO DE BAJAMAR MÁS BAJA): 0.000 metros

ALTURA DE PLEAMAR SOBRE EL PLANO DE REFERENCIA: 5.850 metros

COMENTARIOS: ZONIFICACION RECOMENDADA:

Utilizar zonas identificadas como: CK394, CK395, CK399, CK400, CK401, CK407, CK408, CK409, CK434, CK435, CK441, CK442, CK443, CK467, CK468, CK469, CK470, CK477, CK480, CK481, CK482, CK483, CK493 y CK494.

Ir a los anexos para información de zonificación

Nota 1: Los datos de series de tiempo dados están tabulados en unidades métricas (Metros) relacionados a la MLLW y al GMT.

Nota 2: Nikiski, AK sirvió como control de datum para las estaciones de marea subordinadas y para la zonificación de marea en este levantamiento hidrográfico. Los datums aceptados para esta estación han sido actualizados recientemente y han cambiado significativamente de los valores anteriores.

El NTDE utilizado para calcular los datums de marea en las estaciones de marea es el 1960-78 NTDE. Tradicionalmente, el NTDE ha sido ajustado cuando la tendencia a cambios significativos en el promedio de nivel del mar (MSL) fue encontrada en los análisis de las estaciones del NWLON. Las épocas son actualizadas para asegurar que los datums de marea son los más exactos y prácticos para la navegación, las aplicaciones de levantamiento y de ingeniería y reflejan las condiciones locales existentes del nivel del mar. Por ejemplo, los análisis de las tendencias del nivel del mar muestran que una nueva NTDE es necesaria y los esfuerzos están en camino de actualizar el 1960-1978 NTDE a un período de 19 años más recientes.

Nota: Este ejemplo de Nota Final de Campo y de Carta e Zonificación de Marea final fue escrito en diciembre 1999, en esa fecha el NTDE era 1960-1978, ahora el nuevo NTDE es 1983-2001.

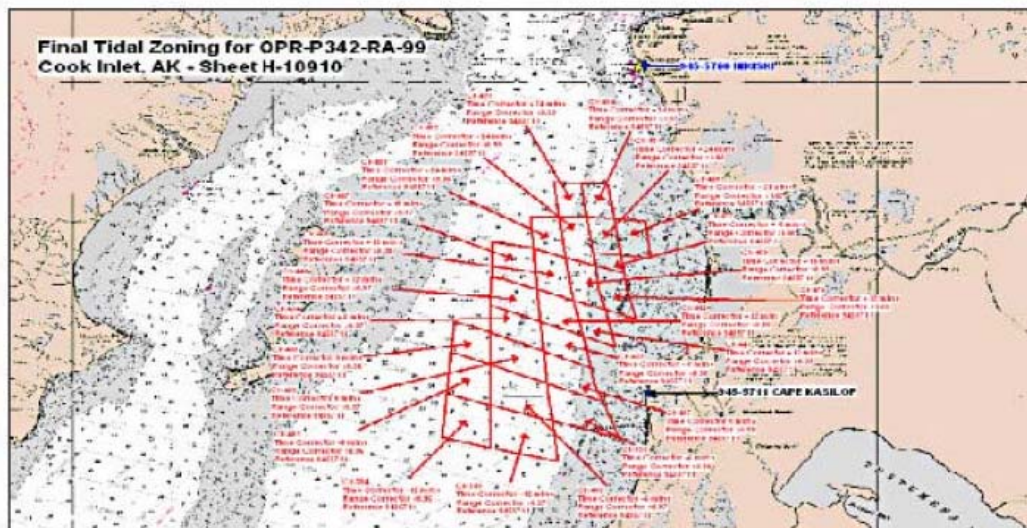


Fig. 5.17

Las mediciones de nivel de agua finales observados deben ser reportadas como alturas en metros en tres decimales (Ej. 0.001 m). Todas las alturas deben ser referidas al datum de la estación y deben ser referidos al UTC. Los datos de serie de tiempo del factor de corrección final de marea debe ser referidos al MLLW y debe ser referenciados al UTC.

Los datos brutos del nivel de agua original y también los correctores usados para convertir los datos al datum de la carta debe ser retenida hasta que se notifique por escrito o al menos dos años después de que el levantamiento se complete. Todos los algoritmos y las conversiones utilizadas para entregar correcciones deben ser respaldadas completamente por las calibraciones, mantenimiento, documentación, registros de nivelación e ingeniería de sondeo/prácticas oceanográficas. Los sensores para las mediciones usados para convertir los datos (ej. presión a altura) deben ser calibrados y mantenidos para el período total de registro de nivel de agua.

2.2.9 Uso del GPS cinemático para el control vertical

La tecnología de utilizar GPS cinemático para el control vertical en el levantamiento hidrográfico se esta volviendo mucho más común después de haber sido objeto de investigaciones durante varios años. El GPS cinemático es una forma de posicionamiento con una precisión en la vertical de 1 cm, el cual usa primariamente la fase de la onda portadora de los observables en el cual las correcciones diferenciales son formuladas conjuntamente con un receptor móvil GPS (o sea, una nave o un lanzamiento) y al menos una estación base estática.

El GPS cinemático necesita un marco de referencia horizontal y vertical exacta para determinar una posición precisa en cada sondeo, relacionada al NAD83 (por ejemplo), y para determinar una profundidad exacta de cada sondeo como el MLLW, el LAT u otro datum de carta local apropiado. El caso de determinar la separación entre el datum vertical del GPS cinemático diferencial y el datum de la carta local es importante de resolver para cada área de estudio. La separación no es constante y puede ser muy compleja. No son bien conocidos y pueden necesitar de mediciones adicionales para comprender la complejidad de la geodesia en el área así como las características de marea. Las relaciones constantes pueden ser adecuadas en áreas de estudio pequeñas, la interpolación simple en otras, o los modelos de interpolación complejos y los esquemas de zonificación continuo pueden ser requeridos. Los datums de marea, la batimetría y la geodesia deben ser puestos en el mismo marco de referencia vertical antes de las operaciones de levantamiento.

La disponibilidad de control para el uso del GPS cinemático para el levantamiento debe ser evaluado durante la planificación y si es requerido, se debe establecer el control del datum de marea y geodésico antes de la recolección operacional de los sondeos para establecer la relación del datum de marea y las superficies de referencia del GPS en el área de estudio. La cantidad de trabajo de campo requerido depende de la adecuación de la marea existente y del control geodésico (NOS, 2000).

3. FLUJO DEL NIVEL DE AGUA Y CORRIENTES DE MAREA

3.1 Introducción

Se necesita que el hidrógrafo tenga conocimiento de trabajo de predicción y de observación oceanográfica y de condiciones meteorológicas para poder conducir satisfactoriamente los levantamientos de recolección de datos de campo y de realizar la eficientemente y con seguridad necesaria navegación en los levantamientos. Además del levantamiento y caída de las mareas, las corrientes del área son casi siempre una variable predominante que afecta las operaciones de campo. La mayoría de las veces el hidrógrafo no sólo es necesitado para realizar sondeos para la producción de cartas náuticas, sino que debe evaluar las características de las mareas y los movimientos de las corrientes de marea y ser capaces de describirlas para esas aplicaciones como los derroteros y las tablas de predicción de marea. Además, el hidrógrafo es casi siempre solicitado para desplegar y recuperar correntímetros y sus maniobras de anclaje.

3.2 Principios de las corrientes de mareas

La corriente del agua es el movimiento horizontal de las aguas. Las corrientes pueden ser clasificadas como de marea y de no-marea. Las corrientes de mareas son causadas por las interacciones de gravedad entre el Sol, la Luna y la Tierra y son parte del mismo movimiento general de los océanos que resultan en la subida y descenso de la marea. Las corrientes de no-marea incluyen las corrientes permanentes en los sistemas circulatorios generales del mar así como las corrientes temporales que surgen de la variabilidad meteorológica más pronunciada.

Así como datums de marea y alturas, varios países usan variada terminología para describir el mismo fenómeno. El Reino Unido usa el término de líneas de marea en vez de corriente de marea y el término flujo de marea para describir el flujo real o el total de flujo de la corriente, que es una combinación de los componentes de marea y de no-marea.

Los residuales son referidos algunas veces como la diferencia entre las corrientes totales observadas y las corrientes de marea predichas o la diferencia ente las líneas de corriente y el flujo de marea. Aunque las corrientes de marea se derivan de las mismas fuerzas de producción de marea, las corrientes de marea son mucho más variables y complejas de predecir que las alturas de marea. El ascenso y el descenso de la marea es una cantidad escalar (alturas variables solamente) mientras que las corrientes de la marea son cantidades vectoriales (varían en velocidad y en dirección asociada). La velocidad y la dirección de las corrientes en una ubicación dada no sólo varían con el tiempo, sino que también con la profundidad, Y las características de la corriente en una ubicación dada no se pueden extender muy lejos, especialmente en áreas de batimetría compleja de aguas poco profundas y de topografía compleja (configuraciones de la línea de costa). Los patrones de corriente en áreas complejas también pueden exhibir remolinos y giros de varios tamaños marcados por la batimetría y la configuración del canal en las aguas poco profundas. No es raro encontrar patrones de resistencia de corriente en las que hay cambios significantes en la dirección y en la amplitud. Debido a esta variabilidad espacial, las predicciones de marea derivadas de las mediciones de corriente son típicamente válidas únicamente para un área pequeña a una profundidad dada, y no son necesariamente transferibles dentro de una región o a través de la columna de agua.

Los tipos de corrientes de no-marea incluyen:

- Corrientes de circulación oceánica;
- Giros, Corrientes de borde Este y Oeste, contracorriente Ecuatorial, etc.;
- Circulación Termohalina;
- Corrientes conducidas por el viento (Ekman a cerca de 100M);
- Seiches;
- Corriente de río y corrientes hidráulicas.

En el océano abierto, las corrientes o las líneas de mareas tienden a ser rotatorias por naturaleza (Figura 5.18). En teoría si la Tierra estuviera cubierta completamente de agua, en el momento que la tierra y el sol estén alineados con el ecuador, las corrientes de marea en el ecuador se moverían de atrás hacia delante (este y oeste) de forma reversa en respuesta a las mareas. Con latitud, las corrientes mostrarían patrones elípticos en aumento con latitud al patrón circular de los polos. El patrón a cualquier latitud dada variaría dependiendo de la declinación de la Luna y del Sol. Los efectos de la fuerza de coriolis también refuerza la naturaleza rotatoria de las corrientes en el océano tanto que rotan en sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte y en contra de las agujas del reloj en el hemisferio sur.

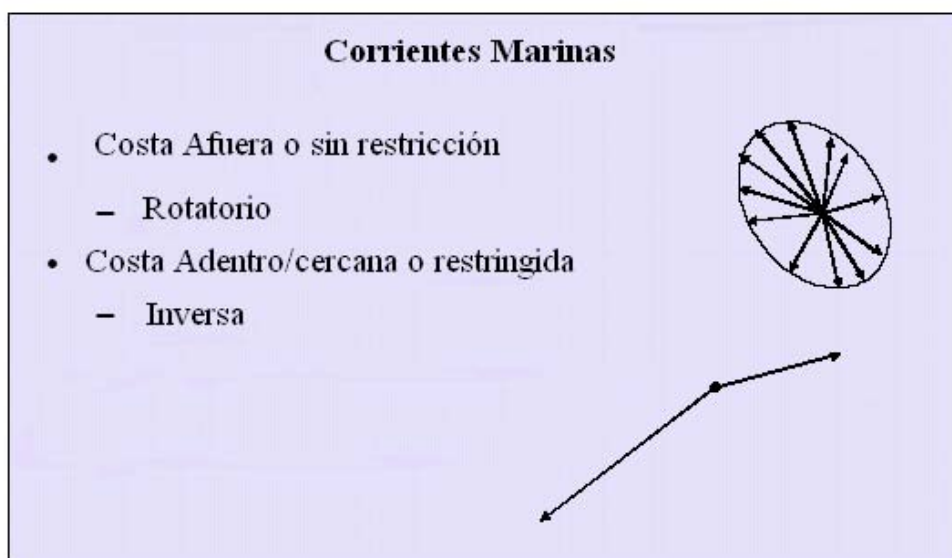


Fig. 5.18

En las áreas cercanas a la costa, las corrientes de marea y líneas de marea tienden a ser más reversibles en su naturaleza respondiendo a la batimetría y a la topografía de los estuarios y bahías (Figura 5.19). Las fases de corrientes reversibles son descritas como períodos de calma, los flujos máximos y los reflujos máximos. La estoa es el corto período de tiempo donde ocurre la inversión entre flujo y reflujo. Típicamente, las corrientes de flujo son aquellas que están entrando hacia la costa o aguas arriba. Las corrientes de reflujo son aquellas que están saliendo, costa afuera o aguas abajo. Estas mareas mostrarán muchas de las características de las mareas descritas en las altitudes de las mareas. Los flujos y los reflujos mostrarán características de marea semi diurna, mixta y diurna muy similares a las correspondientes a las características de altura de marea en un área dada. Sus fuerzas y velocidades mostrarán variaciones en la respuesta a las declinaciones cambiantes de la Luna y el Sol y al perigeo/apogeo y a los ciclos de perihelio/afelio (Figura 5.4). Las corrientes de marea en regimenes de marea mixta muestran desigualdades en los flujos y reflujos cada día, justo como las alturas de marea.

La dirección de la corriente es algunas veces referida como el grupo y la velocidad es referida como la deriva. La dirección de la corriente, por convención, es la dirección de compas hacia la cual fluye la corriente calibrada en términos de nudos (navegación) o metros/segundos (científica) (1Knt = 0.51444 m/s).

Las corrientes hidráulicas son corrientes producto de la diferencia de altura en el nivel de agua de dos cuencas interconectadas (Hell's Gate New York, Cape Cod Canal & the Chesapeake and Delaware Canal). Las diferencias de altura en las aguas de marea son causadas por la diferencia de fase en la marea a cada extremo de un canal o un estrecho. Las corrientes hidráulicas no mareales ocurren en las vías que interconectan las aguas de los Grandes Lagos por ejemplo y típicamente están en dirección aguas abajo solamente.

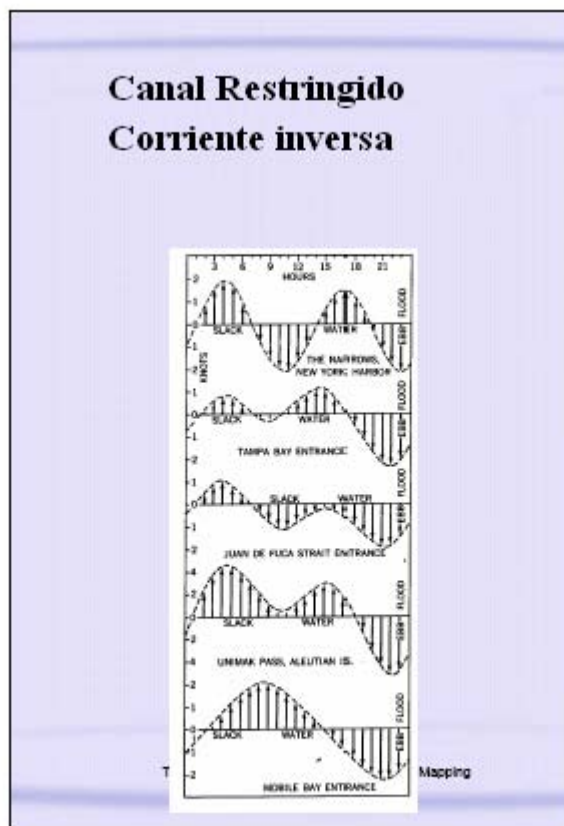


Fig. 5.19

En teoría, las corrientes marinas deben tener relaciones consistentes entre los tiempos y las fuerzas de los flujos, reflujos, los tiempos, las alturas de la pleamar y la bajamar ya que estas están relacionadas y forzadas por las mismas fuerzas de producción de mareas. Sin embargo la respuesta de las cuencas y los estuarios a las fuerzas de producción de mareas y las relaciones resultantes de la corriente de marea a las alturas de marea es compleja y varía con la ubicación. En algunos lugares, las corrientes máximas ocurren a media marea y en otras, las corrientes máximas ocurren más cerca de la pleamar y la bajamar.

3.3 Mediciones de corrientes

Hay dos métodos distintos para medir las corrientes: el uso lagrangiano de flotadores a la deriva, elementos trazadores, boyas, anclas flotantes de corriente y el uso Euleriano de un correntímetro en una ubicación particular. Ambos tipos tienen sus ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación. Los equipos lagrangianos requieren del rastreo de las concentraciones o cambios de la posición de los derivadores con el tiempo, son útiles para el moldeado de la trayectoria y la predicción para la aplicación en derrames de materiales peligrosos y de petróleo o para los estudios de los patrones de circulación estuarinos. Los derivadores de sub superficie pueden ser también desplegados para rastrear corrientes de fondo. Los equipos Eulerianos dan buena información de las series de tiempo de las corrientes en lugares específicos y las aplicaciones de profundidades usadas en la predicción de corrientes de mareas para la navegación comercial y recreacional y operaciones de buques pesqueros. Ambos tipos de mediciones son útiles para el completo entendimiento de los regímenes de corrientes y para el desarrollo y calibración de modelos hidrodinámicos. Pueden ser requeridas embarcaciones de levantamientos hidrográficos para desplegar una variedad de equipos de medición de corriente dependiendo del área de estudio y la información requerida.

Los primeros sistemas de medición de corrientes fueron Lagrangianos en naturaleza, usando el rumbo de naves a la deriva o usando derivadores desplegados por los barcos. Para el trabajo cerca de la costa, estos fueron remplazados por los sistemas de correntímetros fondeados de varios diseños mecánicos y electro mecánicos. Estos sistemas son instalados en diseños de fondeos sub superficiales con varios metros de despliegue a lo largo de la línea vertical del fondeo dependiendo de la profundidad, con el medidor de la corriente dispuesto tan cerca de la superficie como sea posible. Los medidores de corriente mecánicos usan combinaciones de aspas, rotores y propelas para medir la velocidad y la dirección. Los medidores son generalmente de registros internos y los datos son recolectados después de la recuperación. Los períodos de despliegue son generalmente de corto plazo (unos pocos meses como máximo). Los sistemas modernos de medición usan la tecnología de los perfiladores acústicos de corriente (ADCP) para medir los perfiles de las corrientes en la columna de agua en el tiempo desde un medidor de corriente montado en el fondo. Los ADCPs también pueden ser desplegados horizontalmente para medir las corrientes a lo largo del canal en el tiempo a profundidades fijas y pueden ser remolcados para medir las corrientes según la profundidad en transectas a lo ancho del canal. Estos correntímetros pueden ser desplegados desde boyas de superficie dirigidos hacia abajo y pueden ser configurados para suministrar los datos en tiempo real utilizando tecnología acústica moderna o cables directos dependiendo del despliegue. Los ADCPs proporcionan perfiles de velocidad de corriente y de dirección al entregar la información para las zonas verticales fijas en la columna de agua. La Figura 5.20 muestra algunas configuraciones típicas de despliegue para los medidores de corrientes.



Fig. 5.20

Los nuevos sistemas de radar de alta frecuencia están siendo desarrollados para que entreguen mapas de corriente de superficie en áreas amplias que deberían ser también beneficiosas para desarrollar operaciones de levantamiento hidrográfico. Estos sistemas basados en la costa usan una antena respondedora y una receptora para dar vectores de corriente para celdas superficiales de área fija en tiempo real (ver Figura 5.21).

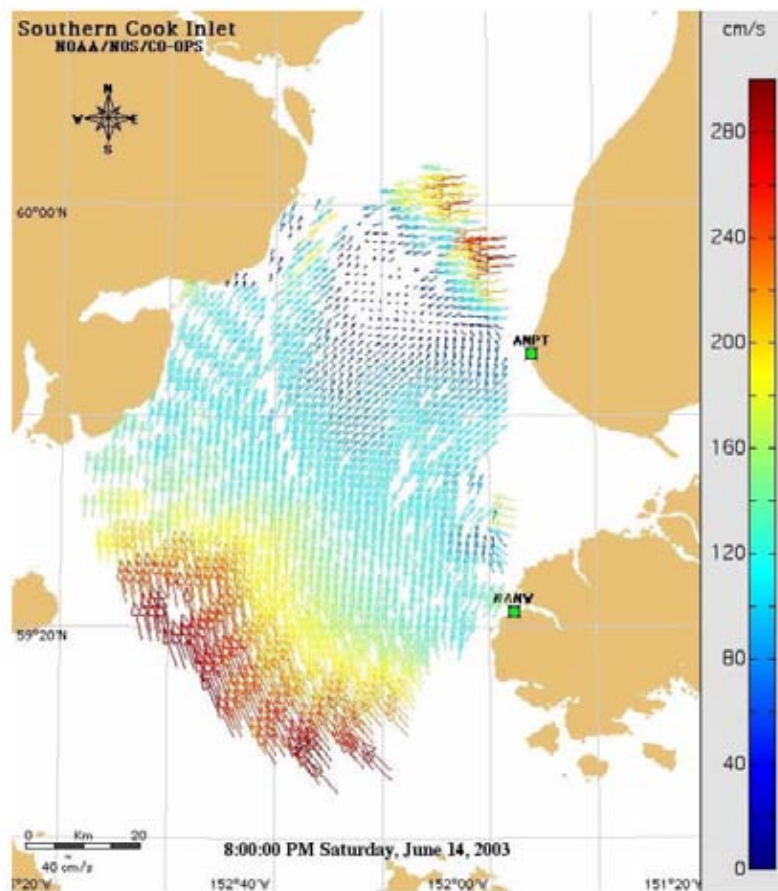


Fig. 5.21

3.4 Predicción de corriente de mareas

Las corrientes de mareas, como las alturas de mareas, pueden ser pronosticadas porque son causadas por la interacción del bien conocido sistema Tierra-Luna-Sol. También como en las predicciones de alturas de marea, las corrientes de marea son pronosticadas por el análisis armónico de las mediciones obtenidas en 29 días de datos preferiblemente para lograr un mes lunar completo. Un mínimo de 15 días de datos puede ser usado para el análisis de corrientes armónico, simplemente porque es difícil histórica y logísticamente obtener rutinariamente más de eso en un despliegue típico. Aunque la aproximación y la teoría son lo mismo para el análisis armónico de las mareas y las corrientes de marea, los análisis de las corrientes de marea son más complejos. Por ejemplo, para las corrientes reversibles, se obtienen dos grupos de componentes para los ejes mayores y menores siendo el eje mayor la dirección principal de la corriente. Además, el análisis debe tratar de considerar la presencia permanente de las corrientes no-mareales encontrada en el análisis de las observaciones.

Los navegantes están generalmente interesados en la fuerza y tiempo de las cuatro fases del ciclo de la corriente de marea. Las tablas de predicción de la NOAA (EEUU) incluyen predicciones para la estoa antes del flujo (SBF), la corriente de máximo flujo (MFC), la estoa antes del reflujó (SBE) y la corriente máxima de reflujó (MEC). En áreas donde las corrientes nunca están en un verdadero reposo (velocidad cero), los valores de la corriente de flujo de reposo (SFC) y de la corriente de reposo del reflujó (SEC) son predichos también. Las estaciones de predicción de corrientes de marea también utilizan el mismo concepto de las estaciones de referencia y las estaciones secundarias en los productos de tablas de marea de tal forma que los cocientes de marea son usadas para corregir las predicciones diarias de la estación de referencia en las ubicaciones deseadas.

Las predicciones de las corrientes de marea tienen limitaciones similares a las de las predicciones de alturas de marea. Se debe tener extremo cuidado al extrapolar una marea o al hacer una predicción de corriente de marea más allá del lugar de la medición. Este es el caso en especial de las corrientes de marea producto de la naturaleza de la variación espacial en velocidad y la dirección en los estuarios y ríos de aguas poco profundas, los efectos importantes de las fuerzas no-mareales producidas por el flujo del río, la velocidad del viento y la dirección y los patrones de circulación naturales no-mareales. Tanto como para las alturas de marea, las predicciones de las corrientes de marea son mucho menos útiles en áreas con razones bajas del ruido con respecto a la señal (bajo forzante mareal en relación a forzantes no-mareales).

REFERENCIAS

Admiralty Manual of Hydrographic Surveying, Volume Two, The Hydrographer of the Navy, U.K., *Chapter 2, Tides and Tidal Streams*, 1969.

“*Canadian Tidal Manual*”, Warren D. Forrester, Ph. D. under contract to Department of Fisheries and Oceans, Ottawa, 1983.

“*Computational Techniques for Tidal Datums*”, NOAA Technical Report NOS CO-OPS 2, U.S. Department of Commerce, NOAA, NOS, December 2003.

“*Guidelines for Establishing GPS-Derived Ellipsoid Heights (Standards: 2CM and 5CM)*”, Version 4.3, NOAA Technical Memorandum NOS NGS-58, November 1997.

“*Manual of Tide Observations*”, U.S. Department of Commerce, Publication 30-1, Reprinted 1965.

“*NOS Hydrographic Survey Specifications and Deliverables*”, NOAA, National Ocean Service, Office of Coast Survey, Silver Spring, Maryland, U.S.A., March 2003.

“*NOS RTK Team Final Report*”, NOAA/NOS Team Final Report, August 31, 2000.

“*Standards and Specifications for Geodetic Control Networks*”, U.S. Federal Geodetic Control Committee, September 1984.

“*Tide and Current Glossary*”, U.S. Department of Commerce, NOAA, NOS, October 1989.

“*Tidal Datum Planes*”, U.S. Department of Commerce, Special Publication No.135, Marmer, 1951.

“*Tidal Datums and Their Applications*”, Special Publication No. CO-OPS 1, NOAA/NOS, June 2000.

“*Understanding Tides*”, Steacy Dopp Hicks, December 2004.

“*Variability of Tidal Datums and Accuracy in Determining Datums from Short Series of Observations*”, NOAA Technical Report NOS 64, Swanson, 1974.

