



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**DESARROLLO DE UN MODELO HIDRODINÁMICO
NUMÉRICO PARA SIMULAR LA CIRCULACIÓN OCEÁNICA**

Tesis que presenta

Pablo Alonso Rodríguez

Para obtener el grado de

Doctor en Geociencias Aplicadas

Director de tesis

Dr. José Noel Carbajal Pérez

Codirector de la tesis

Dr. Juan Heberto Gaviño Rodríguez

San Luis Potosí, S.L.P., Mayo de 2019



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Desarrollo de un modelo hidrodinámico numérico para simular la circulación oceánica**” presentada para obtener el Grado de Doctor en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **Pablo Alonso Rodríguez** y aprobada el diecisiete de mayo del dos mil diecinueve por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Codirector de la tesis

Dr. Juan Heberto Gaviño Rodríguez
Codirector de la tesis

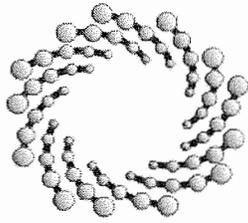
Dr. Luis Felipe Pineda Martínez
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Noel Carbajal Pérez y la codirección del Dr. Juan Heberto Gaviño Rodríguez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 006 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Doctorado en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 17 días del mes de mayo del año 2019, se reunió a las 16:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Alfredo Ramos Leal	Presidente	IPICYT
Dr. José Tuxpan Vargas	Secretario	IPICYT
Dr. José Noel Carbajal Pérez	Sinodal	IPICYT
Dr. Juan Heberto Gaviño Rodríguez	Sinodal externo	UCOL

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

DOCTOR EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó el C.

Pablo Alonso Rodríguez

sobre la Tesis intitulada:

Desarrollo de un modelo hidrodinámico numérico para simular la circulación oceánica.

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Dr. Juan Heberto Gaviño Rodríguez (UCOL)

El Jurado, después de deliberar, determinó

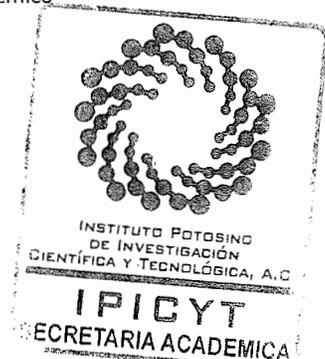
APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 16:45 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 17 días del mes de mayo de 2019.

Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado

Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico



Dedicatorias

A mi esposa:

Noemí Arriaga Hernández, por ser un motor muy grande en mi vida y confiar en mí, siempre.

A mi hijo:

Aarón Alonso Arriaga, eres el motor de mi existencia. “El amor de un padre a un hijo no se puede comparar, es mucho más que todo”.

A mis padres:

María de los Ángeles Rodríguez Nieto y Miguel Agustín Alonso Cuevas, es ahora, cuando entiendo su sacrificio, amor y consejos, soy afortunado de tenerlos como padres.

A mi hermana:

Beatriz Alonso Rodríguez por enseñarme a ser fuerte y valiente sin decir una sola palabra.

A mi sobrina

Sofía Vega Alonso, por venir a dar aún más luz a nuestra vida y nuestra familia.

A Imelda Hernández

Por su apoyo siempre

En memoria de Juan Vázquez Alonso.

La muerte no existe, la gente solo muere cuando la olvidan.

Agradecimientos

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), por el apoyo brindado durante el desarrollo del postgrado.

Al Centro Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada.

A la División de Geociencias Aplicadas, por el apoyo brindado y por darme la oportunidad de realizar mis estudios de doctorado.

Al Dr. José Noel Carbajal Pérez, todas sus conversaciones son una enseñanza de vida, por ser el mejor mentor y maestro que pude haber encontrado en toda mi vida.

Al Dr. Juan Heberto Gaviño Rodríguez, por su apoyo y confianza.

A todas las doctoras y doctores de la división de Geociencias que me impartieron clase y dejaron en mí una enseñanza.

A mis compañeros durante mi estancia de doctorado y en especial a: Francisco León, María de Jesús Guevara, Oscar Almanza, Simón Carranco, Jensen Bautista y Sonia Rivera.

A todo el personal administrativo del Instituto, por siempre tener la disposición de ayudar, pero sobre todo a Gabriela Pérez Assaf.

CONTENIDO

Constancia de aprobación de la tesis	I
Créditos institucionales	II
Acta de examen	III
Dedicatorias	IV
Agradecimientos	V
Lista de tablas	VIII
Lista de figuras	IX
Resumen	1
1 Introducción	2
2 Zona de estudio	6
2.1 Ciudades y puertos importantes en el Golfo	7
2.2 Batimetría	12
2.3 Geología	13
2.4 Clima	15
2.5 Salinidad	15
2.6 Temperatura	17
2.7 Biología	17
3 Modelo hidrodinámico numérico	19
4 Dinámica generada por mareas y viento	28
4.1 Las mareas del golfo de california	29
4.1.1 Vientos	30
4.2 Dinámica por la m2	30
4.3 Corrientes instantáneas con el ciclo de marea M2 y vientos del noroeste y sureste	33
5 Trayectorias Lagrangianas	56
5.1 Método de interpolación Montecarlo	58

5.2 Trayectorias generadas por la marea m2	62
5.2.1 Trayectorias generadas por la marea M2 en comparación con otras mareas.	65
5.3 Trayectorias generadas por 7 mareas	70
5.3.1 Trayectorias generadas por 7 mareas sin componente aleatorio, con viento y sin viento.	79
6 Corrientes residuales (Euler, Lagrange, Stokes)	87
7 Discusión	100
8 Conclusiones	109
9 Referencias	110

Lista de tablas

Tabla 2.1: Puertos o ciudades más importantes en el Golfo de California	11
Tabla 4.2: Nombre de mareas usadas, periodo y descripción	32

Lista de figuras

Figura 1.1. Batimetría del Golfo de California, posición y nombres de zonas relevantes. El recuadro especifica la zona estudiada del Golfo.	6
Figura 2.1. Ubicación del Golfo de California.	7
Figura 2.2 Secciones del Golfo de California	9
Figura 2.3. Imagen satelital con las áreas más importantes del Golfo de California, A) Delta del río Colorado, B) Área del archipiélago, C) Costa Este del Golfo de California.	9
Figura 2.4. Área del archipiélago en el Golfo de California	11
Figura 2.5. Puertos y ciudades importantes	13
Figura 2.6. Curvas de nivel de la batimetría del Golfo de California en 3D.	14
Figura 2.7. Estructura tectónica y estructural del Golfo de California	15
Figura 2.8. Temperatura promedio superficial del Golfo de California	18
Figura 3.1. Matriz generada de 179 por 177, las celdas azules son los “puntos húmedos” donde se realizan las operaciones.Figura 9. Imagen general del Golfo con la marea M2 a 100 iteraciones y viento del noroeste (19.40 horas a partir de que se corre el modelo)	18
Figura 4.1. Ubicación de Salsipuedes y Delta del río Colorado.	32
Figura 4.2. Imagen general del Golfo con la marea M2 a 100 iteraciones y viento del noroeste (19.40 horas a partir de que se corre el modelo)	35
Figura 4.3 Corriente con marea M2 y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha), desde la región del archipiélago hasta el Delta del Río Colorado.	36
Figura 4.4 Corriente con marea M2 y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha) a 100 iteraciones (19.40 horas a partir de que se corre el modelo).	37
Figura 4.5. Corriente con marea M2 y viento del noroeste (arriba) y sureste (abajo) a 100 iteraciones (19.40 horas a partir de que se corre el modelo). Región del Archipiélago.	38
Figura 4.6. Corriente con marea M2 y viento del noroeste (arriba) y sureste (abajo) a 100 iteraciones (19.40 horas a partir de que se corre el modelo), región costa este del Golfo.	39
Figura 4.7. Corriente con marea M2 y viento del noroeste a 100 iteraciones (19.40 horas a partir de que se corre el modelo).	40
Figura 4.8. Corriente con marea M2 y viento del sureste a 100 iteraciones (19.40 horas a partir de que se corre el modelo).	41
Figura 4.9. Imagen general del Golfo con la marea M2 a 200 iteraciones y viento del noroeste (38.8 horas a partir de que se corre el modelo)	43

Figura 4.10. Corriente con marea M2 y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha), desde la región del archipiélago hasta el Delta.	43
Figura 4.11. Imagen general del Golfo con la marea M2 a 200 iteraciones y Corriente con marea M2 y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha) a 38.8 horas a partir de que se corre el modelo, parte norte del Golfo.	44
Figura 4.12.a. Corriente con marea M2 y viento del noroeste, región del archipiélago.	45
Figura 4.12.b Corriente con marea M2 y viento del sureste, región del archipiélago.	46
Figura 4.13. Corriente con marea M2 y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha), región de la costa sureste del Golfo.	47
Figura 4.14. Corriente con marea M2 y viento del noroeste (arriba) y sureste (abajo), región, boca del Golfo de California.	48
Figura 4.15. Imagen general del Golfo con la marea M2 a 300 iteraciones y viento del noroeste (29.1 horas a partir de que se corre el modelo).	49
Figura 4.16. Norte y zona del archipiélago del Golfo de California con la marea M2 a 300 iteraciones y viento del noroeste y sureste	50
Figura 4.17. Norte y zona del archipiélago del Golfo de California con la marea M2 a 300 iteraciones y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha).	50
Figura 4.18. Norte y zona del archipiélago del Golfo de California con la marea M2 a 300 iteraciones y viento del noroeste.	51
Figura 4.19. Zona este del Golfo de California con la marea M2 a 300 iteraciones y viento del sureste.	52
Figura 4.20. Imagen de la costa este, cerca de la boca del Golfo, con viento de noroeste (arriba) y del sureste (abajo), con la marea M2 a 400 iteraciones y viento del noroeste (77.6 horas a partir de que se corre el modelo).	53
Figura 4.21. La parte norte y archipiélago del golfo, con viento de noroeste y con la marea M2 a 500 iteraciones y viento del noroeste (97 horas a partir de que se corre el modelo).	54
Figura 4.22. Zona del archipiélago, con viento de noroeste (arriba) y del sureste (abajo), con la marea M2 a 500 iteraciones (97 horas a partir de que se corre el modelo).	55
Figura 5.1. Malla Arakawa C, donde la “x” presenta las velocidades en u, el “punto” las velocidades en v, y el signo “+” la presión o elevación del mar, y otras variables como la temperatura y densidad.	58
Figura 5.2. Método de interpolación bilinear	60
Figura 5.3. Asignación de pesos	61
Figura 5.4. Trayectorias generadas por la marea M2, las partículas D1 a D8 fueron posicionadas en forma diagonal, soltadas de forma individual y sin un movimiento aleatorio.	64
Figura 5.5. Trayectorias generadas por la marea M2, Diferentes puntos en el norte del Golfo.	65

Figura 5.6. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2 y la K2. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.	66
Figura 5.7. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2 y la P1. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.	66
Figura 5.8. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2 y la S2. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.	67
Figura 5.9. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2, la marea S2 y la K1. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.	68
Figura 5.10. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2, la marea S2, marea k1 y la O1. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.	69
Figura 5.11. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2, la marea S2, marea k1, la O1 y la N. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.	70
Figura 5.12. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto cercano al delta del río colorado, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	71
Figura 5.14. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto en el centro del norte del Golfo, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	73
Figura 5.15. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto cercano al centro del Golfo pero cercano a la costa este del Golfo de California, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	74
Figura 5.16. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto muy cercano a la costa oeste del Golfo de California, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo. Debido a lo inmediato que se encuentra de la costa, el movimiento es en su mayoría ovalado.	74
Figura 5.17. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto cercano al delta del río colorado.	75
Figura 5.18. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto en el centro del archipiélago, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	76
Figura 5.19. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto en el centro canal de ballenas.	76

Figura 5.20. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto en la entrada sur del archipiélago, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	77
Figura 5.21. Combinación de todos componentes de marea en diferentes partes del Golfo, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	78
Figura 5.22. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo ubicado a la parte norte del Golfo cercano a la costa de Sonora, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	79
Figura 5.23. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo ubicado a la parte norte del Golfo cercano a la costa de Baja California Norte, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	80
Figura 5.24. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo ubicado a la parte norte del Golfo al centro, del Golfo, entre Baja California Norte y la costa de Sonora, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	81
Figura 5.25. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo ubicado a la parte norte del Golfo al centro, del Golfo, entre Baja California Norte y la costa de Sonora, un poco más al sur que en la figura anterior, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	81
Figura 5.26. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo ubicado a la parte norte del Golfo al centro, del Golfo, entre Baja California Norte y la costa de Sonora, un poco más cercano a la costa de Baja California Norte que en la figura anterior, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.	82
Figura 5.27. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo	83
Figura 5.28. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo	83
Figura 5.29. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo	84
Figura 5.30. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo	84
Figura 5.31. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo	85
Figura 5.32. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo	85
Figura 6.1 Corriente instantánea a un tiempo dado considerando siete componentes de marea. Cuando está en la etapa del flujo (arriba) y cuando ocurre el reflujo (abajo).	88
Figura 6.2. Corriente residual de Euler (a) y corriente residual de Stokes (b).	90

Figura 6.3. Punto medio de cada celda del Golfo de California donde salen 10 partículas para hacer la simulación de trayectorias Lagrangianas	93
Figura 6.4. Corriente residual de Lagrange para la componente de marea M2. Calculada aplicando trayectorias lagrangianas.	94
Figura 6.5. Corriente residual de Euler (a) y corriente residual de Stokes (b). Los cálculos fueron llevados a cabo para un periodo de marea viva – marea muerta	96
Figura 6.6. Corriente residual de Lagrange calculada como la suma de las corrientes residuales de Euler y Stokes (a). Corriente residual de Lagrange calculada usando trayectorias. El cálculo fue realizado para un ciclo de marea muerta – marea viva.	98
Figura 7.1. Series temporales de la elevación de la superficie del mar en un punto del Delta del río Colorado.	100
Figura 7.2. Corrientes residuales que aplican los constituyentes mareales M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1.	103
Figura 7.3. Trayectorias lagrangianas de partículas en diferentes zonas de la parte norte del Golfo de California. Las trayectorias se calcularon considerando los constituyentes de las mareas M2. Los triángulos indican el punto de partida.	106
Figura 7.4. Trayectorias lagrangianas de partículas en diferentes zonas de la parte norte del Golfo de California. Las trayectorias se calcularon considerando los constituyentes de las mareas (M2, S2, K1, O1, N2). Los triángulos indican el punto de partida.	107

Resumen

Desarrollo De Un Modelo Hidrodinámico Numérico Para Simular La Circulación Oceánica

Considerando una aproximación semi-implícita de los términos de Coriolis, se propone una solución numérica de las ecuaciones de movimiento verticalmente integradas. Para probar el modelo numérico bidimensional, se llevaron a cabo varios experimentos para el cálculo de las corrientes residuales de Euler, Stokes y Lagrange en el Golfo de California. Para estimar la corriente residual de Lagrange, también se simularon trayectorias de partículas. Las componentes de marea aplicadas fueron M2, S2, K2, N2, K1, P1 y O1. En las mareas vivas, se producen fuertes velocidades de marea en la mitad norte del golfo. En esta región de geometría compleja, las profundidades cambian de unos pocos metros en la zona de la plataforma norte a más de 3000 metros en la parte sur. En la región del archipiélago, la presencia de islas altera la amplitud y la dirección de las corrientes de marea, estas producen un proceso de rectificación que se refleja en una circulación en el sentido de las agujas del reloj alrededor de la isla Tiburón en la corriente residual lagrangiana. El proceso de rectificación se explica por la superposición de las corrientes residuales de Euler y Stokes. Los patrones de corriente residual muestran varios giros ciclónicos y anticiclónicos en el norte del Golfo de California. Los experimentos numéricos individuales y en combinaciones de varios constituyentes de mareas revelaron una gran variabilidad de las trayectorias lagrangianas.

PALABRAS CLAVE:

Modelación numérica
Trayectorias lagrangianas
Mareas
Corrientes residuales
Rectificación de corrientes

ABSTRACT

Considering a semi-implicit approximation of the Coriolis terms, a numerical solution of the vertically integrated equations of motion is proposed. To test the two-dimensional numerical model, several experiments for the calculation of Euler, Stokes and Lagrange residual currents in the Gulf of California were carried out. To estimate the Lagrangian residual current, trajectories of particles were also simulated. The applied tidal constituents were M2, S2, K2, N2, K1, P1 and O1. At spring tides, strong tidal velocities occur in the northern half of the gulf. In this region of complex geometry, depths change from a few meter in the northern shelf zone to more than 3000 m in the southern part. In the archipelago region, the presence of islands alters amplitude and direction of tidal currents producing a rectification process which is reflected in a clockwise circulation around Tiburon Island in the Lagrangian residual current. The rectification process is explained by the superposition of the Euler and Stokes residual currents. Residual current patterns show several cyclonic and anticyclonic gyres in the Northern Gulf of California. Numerical experiments for individual and combinations of several tidal constituents revealed a large variability of Lagrangian trajectories.

Keywords:

Numerical modelling

Lagrangian trajectories

Tides

Residual currents

Currents rectification

CAPÍTULO 1

Introducción

Las mareas en el Golfo de California pertenecen a las más impresionantes del mundo. El Golfo de California, con una longitud de más de 1000 km, muestra un amplio rango de fenómenos como resultado de la interacción de una geometría compleja con los flujos de marea que conducen a una extraordinaria variabilidad de las amplitudes de elevación del mar y de la intensidad de las corrientes. El rango medio de elevación del mar debido a las mareas aumenta aproximadamente desde 1 metro en la entrada del golfo, hasta 10 metros cerca de la desembocadura del Río Colorado. En las zonas someras del Delta del Río Colorado, las intensas corrientes de marea alcanzan valores de más de 2 ms^{-1} . En general, el norte del Golfo de California puede ser considerado como una plataforma continental con profundidades máximas de aproximadamente 200 m (Figura 1). Las intensas corrientes de marea que caracterizan a esta región son una parte distintiva de la dinámica en el golfo. La disponibilidad de sedimentos en el área del Delta del Río Colorado combinado con fuertes corrientes de marea causa una movilidad impresionante de sedimentos en el periodo de marea-viva marea muerta que han conducido a la formación de bancos de arena (Carbajal et al., 1993). Esta zona del río ha sido objeto de estudios geoquímicos cuyos resultados muestran que es rico en sulfato, sodio y calcio Roden (1968). En la parte sur del golfo, las profundidades alcanzan valores de más de 3000 m. Las corrientes de marea son pequeñas en estas áreas profundas, pero a lo largo de las regiones costeras, las corrientes de marea se consideran de gran importancia. En la parte central del Golfo de California, en la zona de transición que pasa de grandes profundidades a condiciones de plataforma, hay un archipiélago formado principalmente por las islas Tiburón (la isla más grande de México) y Ángel de la Guarda, entre otras masas terrestres más pequeñas.

Una de las primeras evaluaciones de procesos de marea en el Golfo de California fue llevado a cabo por Hendershott y Speranza (1971). Ellos investigaron la posición

del sistema anfidrómico de elevación de la superficie del mar de la marea M_2 y predijeron una gran disipación de la energía de las mareas en la parte norte a través del desplazamiento del punto anfidrómico hacia el lado de la onda Kelvin reflejada. Filloux (1973) estimó entonces la disipación de la energía de las mareas en un ciclo de marea de la marea M_2 y encontró un valor de 4.35×10^9 joules s^{-1} . Aplicando por primera vez un modelo numérico con una pobre resolución, Grijalva (1972) calculó algunos aspectos de las mareas como las corrientes, amplitudes y fases. Un modelo numérico más sofisticado de las mareas fue llevado a cabo por Stock (1976) quien dio especial importancia a la disipación de energía de las mareas. Morales-Pérez y Gutierrez de Velasco (1989) estimaron los sistemas anfidrómicos de los principales constituyentes de marea (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , O_1 , K_1 , P_1 , Sa , SSa , Mf) usando datos observados en estaciones mareográficas. Quirós et al. (1992) calcularon la corriente residual de Euler de la marea M_2 en el Golfo de California aplicando un modelo numérico verticalmente integrado con una resolución de malla de 14 km. Un cálculo similar para la estimación de las corrientes residuales de Euler fue llevado a cabo por Argote et al. (1995). Carbajal (1993) aplicó por primera vez un modelo numérico tridimensional para investigar la variación vertical de las corrientes de las mareas, las corrientes residuales de Euler, la estimación energética y los aspectos baroclínicos de las mareas. Estos cálculos revelaron que las corrientes residuales son, en general, dos órdenes de magnitud más pequeñas que el flujo instantáneo. Marinone y Lavín (2003) calcularon las corrientes residuales y la mezcla de mareas en la región del archipiélago. La estimación de energía de las mareas M_2 y S_2 , la distribución de energía cinética, la disipación de energía por fricción del fondo y la viscosidad turbulenta y los períodos de resonancia del golfo fueron estimados por Carbajal y Backhaus (1998). Aplicando un modelo numérico tridimensional, Salas de León et al. (2003) calcularon la corriente residual de Euler y el tensor de estrés de marea generado por el componente de marea M_2 en el Golfo de California. Los valores de estrés de las mareas fueron especialmente altos sobre el umbral de Salsipuedes, en el Canal de Ballenas, en la región del archipiélago y en el Delta del río Colorado. Ellos también encontraron que los altos valores del tensor de estrés de marea coinciden bien con zonas anómalas de agua fría observadas en el área

del archipiélago. Utilizando un modelo numérico tridimensional, Gutiérrez et al. (2004) investigaron la circulación superficial de Lagrange calculando la advección de partículas para períodos mensuales y anuales forzando la circulación con los componentes de la marea M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , P_1 , O_1 , SSa y Sa . Uno de los hallazgos más importantes fue que en la parte norte del golfo la circulación es anticiclónica de octubre a mayo y ciclónica durante los meses de verano. Salas de Leon et al. (2011) calcularon la vorticidad y la mezcla producidas por la marea M_2 encontrando una conexión entre el componente horizontal de la vorticidad y la distribución de biomasa de zooplancton en la parte norte del golfo. Las mareas en el Golfo de California también generan ondas internas. Fu y Holt (1984) encontraron que el número de grupos de ondas internas se correlacionaba con la fuerza de las mareas en la región del archipiélago, la región donde se generan las ondas internas. La fuerza de las corrientes de las mareas en el Golfo de California juega un papel importante en la morfodinámica de las zonas poco profundas (Montaño y Carbajal, 2008). Las longitudes de onda observadas de bancos de arena en el delta del río Colorado se han explicado con un modelo teórico en el que se considera el forzamiento de las mareas (Carbajal y Montaño, 2001). El transporte de sedimentos por el arrastre de fondo de transporte de sedimentos, se estimó en el delta del río Colorado y en las bahías de Adair y San Jorge (Hernández-Azcunaga et al., 2013).

Además de los aspectos mencionados, otros más han sido investigados como el desplazamiento de sistemas anfidrómicos, la disipación de energía por fricción de fondo, estimación del balance de energía, corrientes residuales, intensidad de flujo instantáneo, vorticidad y mezcla, conectividad entre las diferentes regiones del golfo, transporte de carga de sedimento, morfodinámica del fondo del mar en áreas poco profundas, tensor de estrés de la marea, trayectorias Lagrangianas, entre otros procesos de marea. En el presente trabajo de investigación, las trayectorias Lagrangianas se aplican para estimar las corrientes residuales considerando la marea principal lunar M_2 en algunos experimentos y varias componentes de marea en otros. Vale la pena mencionar que en muchos estudios, las corrientes residuales de las mareas se han estimado aplicando predominantemente el método de Euler.

Las corrientes residuales de Lagrange y Stokes también son adecuadas para explicar fenómenos dinámicos importantes como el transporte de trazadores y los procesos de rectificación. Dado que hay un archipiélago en la parte central del Golfo de California, es relevante investigar el efecto del archipiélago sobre las corrientes residuales de Lagrange, Euler y Stokes. De hecho, la rectificación de las corrientes de marea ocurre en diferentes mares del mundo por la presencia de islas, bajos, arrecifes coralinos y bancos de arena. Se examina el proceso de rectificación a través de las corrientes residuales de Euler, Stokes y Lagrange. Para la estimación de la corriente residual de Lagrange, se aplicaron las trayectorias Lagrangianas y las corrientes residuales de Euler y Stokes. La complejidad de las trayectorias Lagrangianas también se investigó. Para este fin, se desarrolló un nuevo modelo bidimensional, verticalmente integrado, con una aproximación semi-implícita de los términos de Coriolis.

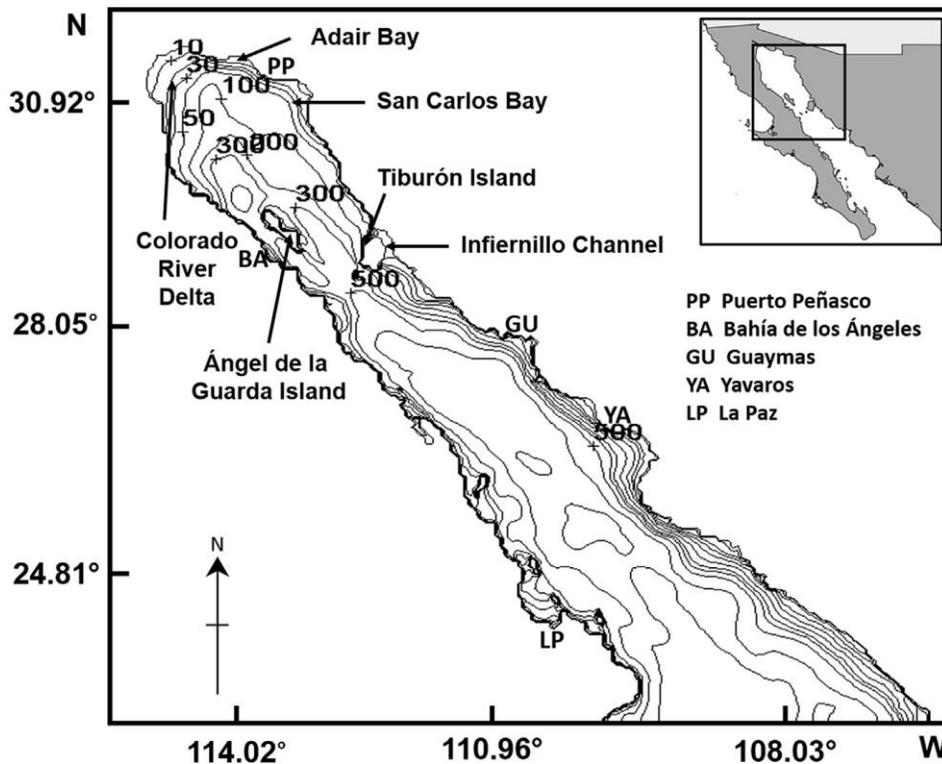


Figura 1.1. Batimetría del Golfo de California, posición y nombres de zonas relevantes. El recuadro especifica la zona estudiada del Golfo.

CAPÍTULO 2

Zona de estudio

El Golfo de California (también llamado el Mar de Cortés) es un mar marginal que se encuentra en el lado noreste del océano pacífico, está situado entre la Península de Baja California y la parte continental del oeste de México. La ubicación del Golfo desde el noroeste al sureste se encuentra entre 23° y 32° N y 106° W y 115° W, posee importantes islas, tiene un gran número de lagunas costeras en el lado oriental y tiene numerosas bahías, especialmente en la parte continental de México (figura 2.1). El Golfo de California es de suma importancia para el país pues posee una gran diversidad de flora y fauna que lo hace muy importante para el sector pesquero, es además, uno de los cinco mares más productivos del mundo (Lara-Lara et al. 2008). Se han realizado innumerables estudios en esta área debido a su importancia de carácter económico, biológico, geológico, geográfico y oceanográfico. Ello lo convierte en el cuerpo de agua más estudiado de México (Castro-Aguirre et. Al. 1995).

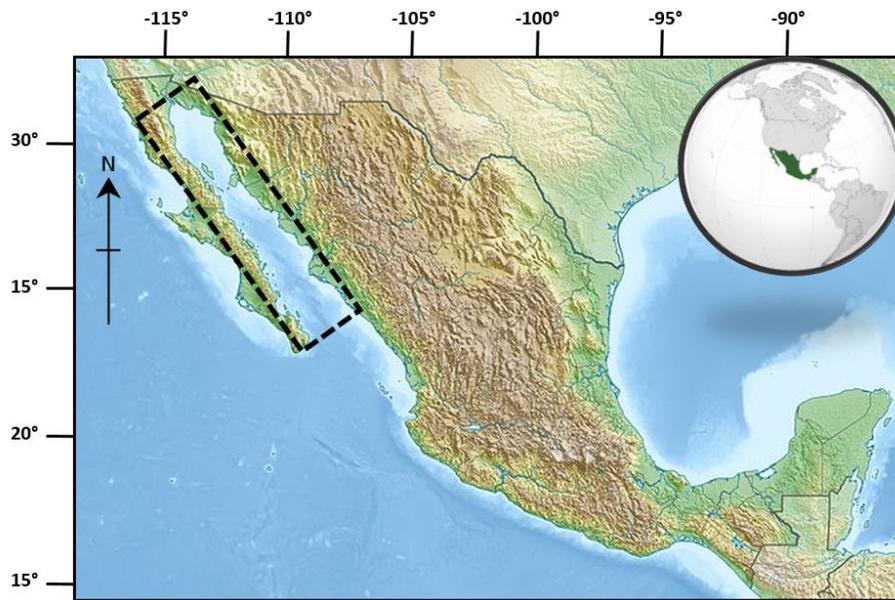


Figura 2.1. Ubicación del Golfo de California.

El Golfo de California es de especial interés para diferentes áreas de investigación, en especial para investigaciones con modelos numéricos de la dinámica. Su situación geográfica por ser un mar marginal, su conexión con el océano pacífico y por ser una cuenca de buen tamaño para investigar procesos de mesoescala lo convierten en un mar muy interesante. También desde un punto de vista climático ofrece una gran cantidad de aspectos oceanográficos y meteorológicos para realizar investigaciones del clima oceánico y atmosférico (Ripa 1997).

Puede dividirse en tres secciones para su estudio (figura 2.2). La primera (Golfo Superior) va desde el Delta del Río Colorado hasta la región del Archipiélago, esta zona es relativamente poco profunda, con variaciones desde algunos metros de profundidad en el extremo norte a aproximadamente 200 metros en la zona del archipiélago. En la parte norte está la desembocadura del Río Colorado, este río era la principal fuente de agua dulce que aflucía al Golfo, sin embargo la construcción de las presas Hoover y Glen Canyon, localizada en Estados Unidos, produjeron que el aporte de agua al Golfo disminuyera drásticamente. En la actualidad, la descarga de agua dulce ha desaparecido por completo, el río proporcionaba a la zona grandes cantidades de sedimentos cuya movilidad y configuración están fuertemente relacionados con la dinámica de las mareas que gobiernan al Golfo de California. (L. Herna et al., 2013).

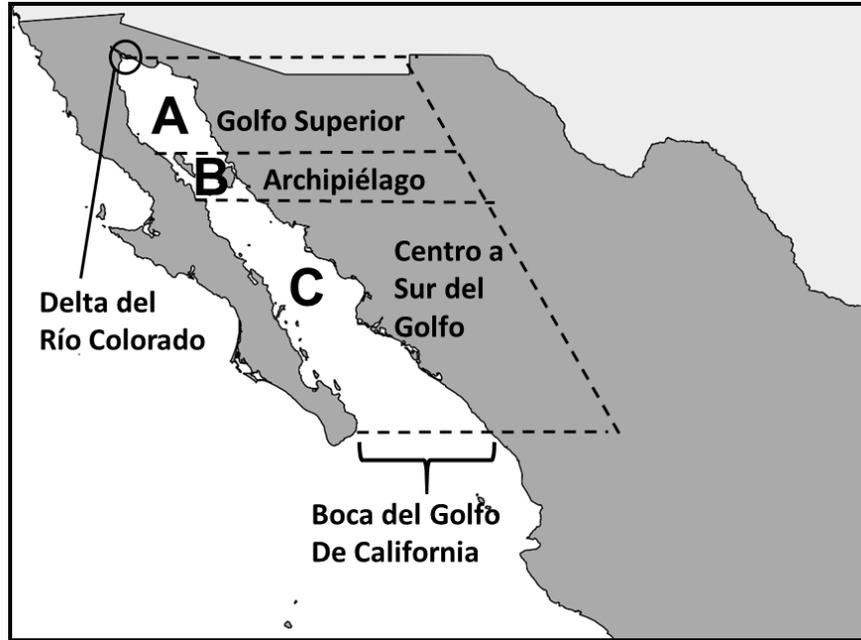


Figura 2.2. Secciones del Golfo de California

La segunda zona (El Archipiélago) está bien definida dentro de la geometría del golfo (Figura 2.3) abarca el conjunto de islas que conforman Ángel de la guarda e isla de Tiburón, esta última es la isla más grande del Golfo y pertenece al estado de Sonora, esta se encuentra deshabitada y funciona como una reserva ecológica. El archipiélago también está conformado por las islas San Lorenzo y San Esteban. (Figura 2.4). A través de la isla de Tiburón y la costa de Sonora, se localiza el canal “El Infiernillo” con aproximadamente tres kilómetros de ancho, pero este, no contribuye de manera significativa en la dinámica de esa área pero tiene una movilidad de sedimentos muy interesante (Carbajal 1998).

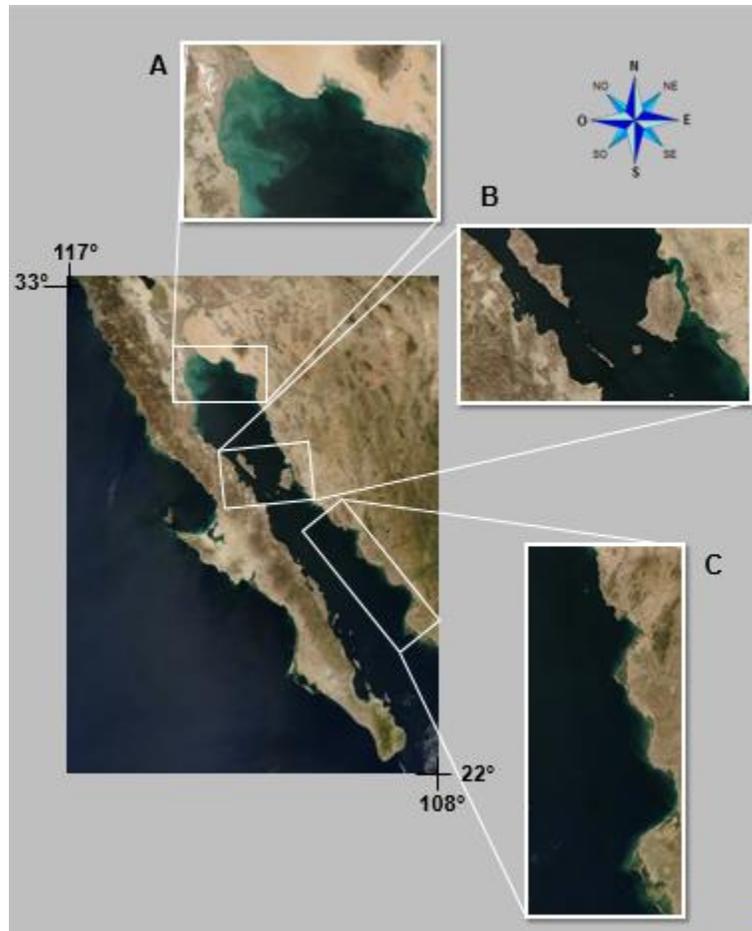


Figura 2.3. Imagen satelital con las áreas más importantes del Golfo de California, A) Delta del río Colorado, B) Área del archipiélago, C) Costa Este del Golfo de California.

Entre la Isla Ángel de la Guarda y Baja California se encuentra el canal de Ballenas y al sur la Cuenca Salsipuedes. En el canal de Ballenas, la profundidad llega hasta los 1600 metros en algunas áreas y la anchura alcanza los 20 km, esta zona se distingue por los procesos de mezcla vertical (Carbajal, 1993). En esta parte, existe una importante cantidad de nutrientes, gracias a la presencia de surgencias y una mezcla que se produce por amplios intervalos de marea (Zeitzchel, 1969).

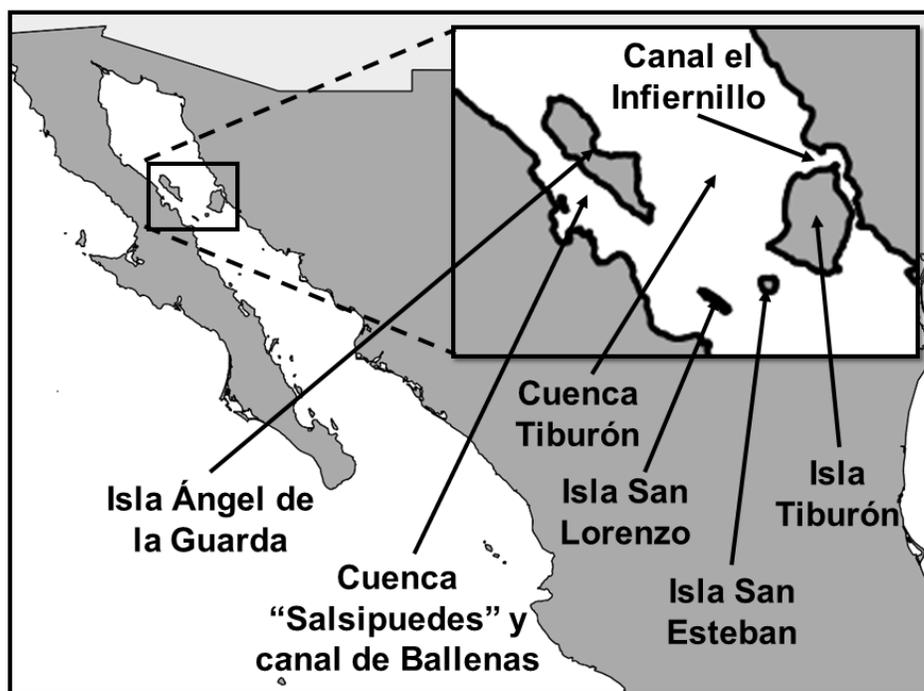


Figura 2.4. Área del archipiélago en el Golfo de California

Las profundidades en el canal de Ballenas van de los 200 hasta los 1600 metros, aquí, las cuencas juegan un papel importante en la dinámica que existe entre la parte norte y sur del Golfo de California.

Y la tercera región (Centro a sur del Golfo) abarca desde el punto donde finaliza el Archipiélago hasta la boca del Golfo de California, que está ubicada entre el punto más al sur de la península de Baja California y la costa del estado de Sinaloa, en esta zona, se alcanzan profundidades de más de 3000 metros.

2.1.1 Ciudades y puertos importantes en el Golfo de California

El Golfo de California cuenta con importantes puertos y ciudades con actividades económicas que van desde el turismo, la pesca deportiva, actividades pecuarias y el comercio (figura 2.5) y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Puertos o ciudades más importantes en el Golfo de California

Puertos o ciudades más importante en el Golfo de California	
Puerto Peñasco	Cuenta con una población de más de 56,000 habitantes, es considerado como un destino turístico importante del estado de Sonora, otra ciudad costera importante es San Felipe esta se localiza en el municipio de Mexicali, en Baja California Norte, su población es de más de 16000 habitantes.
Ciudad y puerto "Heroica Guaymas de Zaragoza",	Perteneciente al estado de Sonora, en Guaymas habitan más de 113000 personas, es una de las principales ciudades camaronícolas de México.
Ciudad de Santa Rosalía	Pertenece al estado de Baja California Sur y en ella viven más de 11000 habitantes, su principal actividad económica es la pesca.
Loreto	Es una ciudad que pertenece a Baja California Sur cuya actividad principal es el turismo y la pesca deportiva, cuenta con más de 14000 habitantes.
Topolobambo	Es un puerto del Golfo que perteneciente al estado de Sinaloa, en él se encuentra una intensa actividad comercial, en el también existen numerosas playas de gran interés turístico, lo habitan más de 6000 personas.
La Paz	Es la ciudad más poblada del Golfo de California, en ella viven más de 215000 personas, su principal actividad es el turismo y es parte del estado de Baja California Sur.

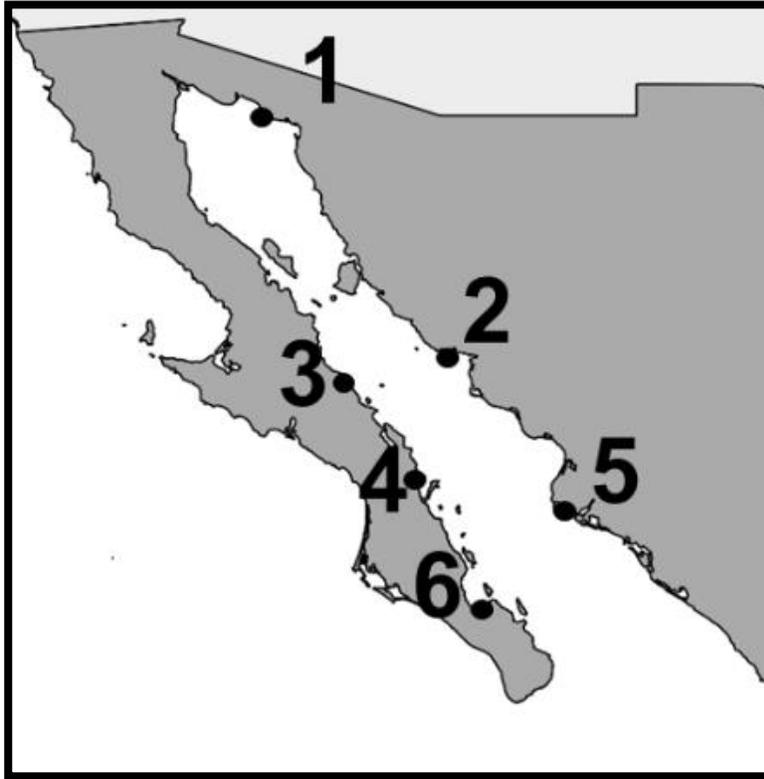


Figura 2.5. Puertos y ciudades importantes: El número 1 corresponde a Puerto Peñasco, 2 a la ciudad y puerto de Guaymas, 3 a la ciudad de Santa Rosalía, 4 corresponde a la ciudad de Loreto, 5 a la ciudad de Topolobambo y número 6 a la ciudad La Paz.

2.2 Batimetría

La batimetría en el Golfo de California presenta características muy complejas, en este se pueden encontrar valles y cuencas que transitan a lo largo de todo el golfo.

La geometría y la profundidad es sorprendentemente variable, desde unos pocos metros en la parte meridional, la cual, puede ser considerada como una región de plataforma continental, y se va agrandando hacia la parte septentrional hasta acercarse a más de 3000 metros en la boca de este, en la parte septentrional (Figura 2.6).

Algunas de las cuencas más profundas son la Cuenca Pescadero con aproximadamente 3000 metros de profundidad, que se encuentra en la boca del Golfo, la Cuenca Guaymas, se encuentra a la mitad del Golfo con una profundidad de aproximadamente 2000 metros y la Cuenca Farallón, que se encuentra entre la Pescadero y Guaymas, con una profundidad aproximada de 3100 metros.

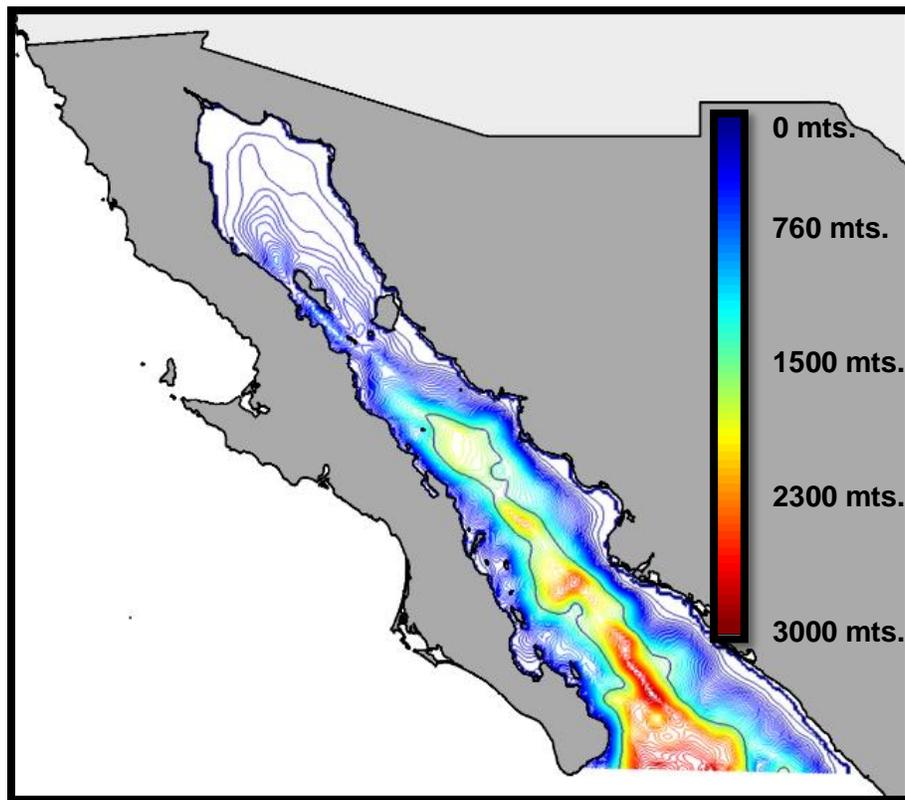


Figura 2.6. Curvas de nivel de la batimetría del Golfo de California en 3D.

2.3 Geología

El golfo de California inició su formación hace cerca de 5 millones de años (Alvarez y Molina 1984). La falla de San Andrés comprende la totalidad de la península de Baja California y pasa a través de todo el Golfo de California, el origen del Golfo, se piensa, fue gracias al desplazamiento de la misma a partir del jurásico (Catro-Aguirre et al. 1995).

En el Golfo de California se encuentran en contacto dos placas tectónicas, la placa del Pacífico y la placa Norteamericana en la parte occidental (Figura 2.7), cerca de la boca del Golfo, estas dos entran en contacto con la placa Rivera, esto, su conjunto, genera una estructura de fallas, la actividad entre estas placas a lo largo de millones de años junto con una innumerable serie de eventos geológicos, formaron lo que hoy es el Golfo de California, este mar joven, estrecho y lineal.

Se le considera como un mar joven ya que no se han encontrado indicios de un golfo ancestral. La península de baja California se mueve a un promedio de aproximadamente 3 centímetros al año en la parte sur y 1.6 al norte del paralelo 25° (Castro-Aguirre et al. 1995).

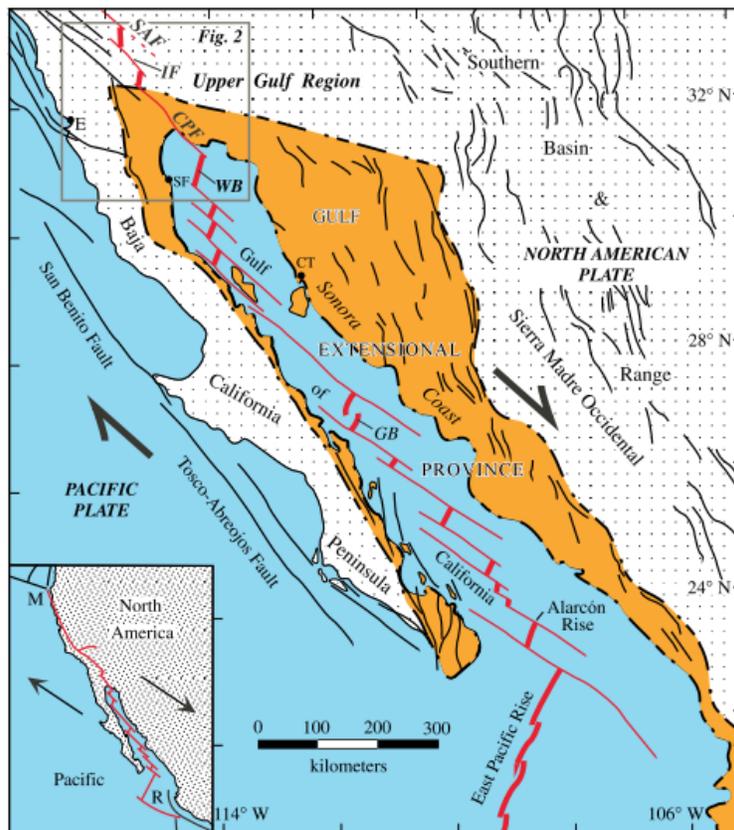


Figura 2.7. Estructura tectónica y estructural del Golfo de California
 Abreviaturas: SAF = San Andreas Fault; IF = falla imperial; CPF = falla de Cerro Prieto; WB = cuenca de Wagner; GB = Cuenca de Guaymas; E = Ensenada; SF = San Felipe; CT = Cabo Tepoca. Recuadro: M = Triple Unión de Mendocino; R = microplaca Rivera. (Alvares et. al 2019)

2.4 Clima

Una característica que hace único al Golfo de California, es que su clima se puede considerar continental, esto debido a dos características, la primera es que, por un lado, en su parte continental, se encuentra el desierto de Sonora, que cubre casi en su totalidad la parte este y toda la parte norte del Golfo, el desierto comprende grandes áreas de los estados Mexicanos de Baja California, Sinaloa y Sonora, así como parte de los estados de Arizona y California, en Estados Unidos de América, así mismo, se encuentra la sierra madre occidental, además, las montañas en la península de Baja California bloquean las nubes y la niebla asociadas con el aire marino sobre el Pacífico (Pegau et al., 2002).

Y, por otro lado, en su parte Oeste, está la península de Baja California, esta comprende los estados mexicanos de Baja California y Baja California Sur, la península contiene la sierra de Baja California, la sierra de la Giganta y al desierto de San Sebastián Vizcaíno. Todo esto en su conjunto, hacen que el clima sea continental, puesto que se localiza entre estas dos grandes masas de tierra.

El sistema montañoso de Baja, California limita el paso del ambiente frío que caracteriza al Océano Pacífico (A. Badan-Dangon et al. 1991).

En general, la ocurrencia de precipitación es muy escasa y se presenta entre los meses de octubre a mayo, el clima del Golfo está incitado por un sistema monzónico con una gran variabilidad estacional, debido a sus particularidades de ubicación. (Ziveri, P Thunell, R C, 2000).

2.5 Salinidad

La salinidad en mares y océanos varía de acuerdo a la posición geográfica en la que se encuentran, pero el factor más determinante es la radiación solar y la temperatura de los mismos, la salinidad en zonas tropicales es mayor que en zonas

polares debido a que los índices de evaporación son más elevados, esto da como resultado que se concentren más los niveles de salinidad.

La salinidad promedio en los océanos es de 35 gramos por litro, la salinidad del Golfo de California en su perfil vertical varía desde unos 35 gramos por litro en aguas superficiales y desciende a 34.5 gramos por litro en aguas profundas. (Lavín et al. 1997).

2.6 Temperatura

Como en la gran masa de tierra que rodea al Golfo de California predomina el clima desértico, el Golfo de California tiene grandes tasas de evaporación, baja humedad y mucha radiación solar, no obstante, el Golfo está ubicado en una región subtropical, es por ello que predominan los cambios diurnos diarios y estacionales de temperatura. La temperatura promedio es de 24° C.

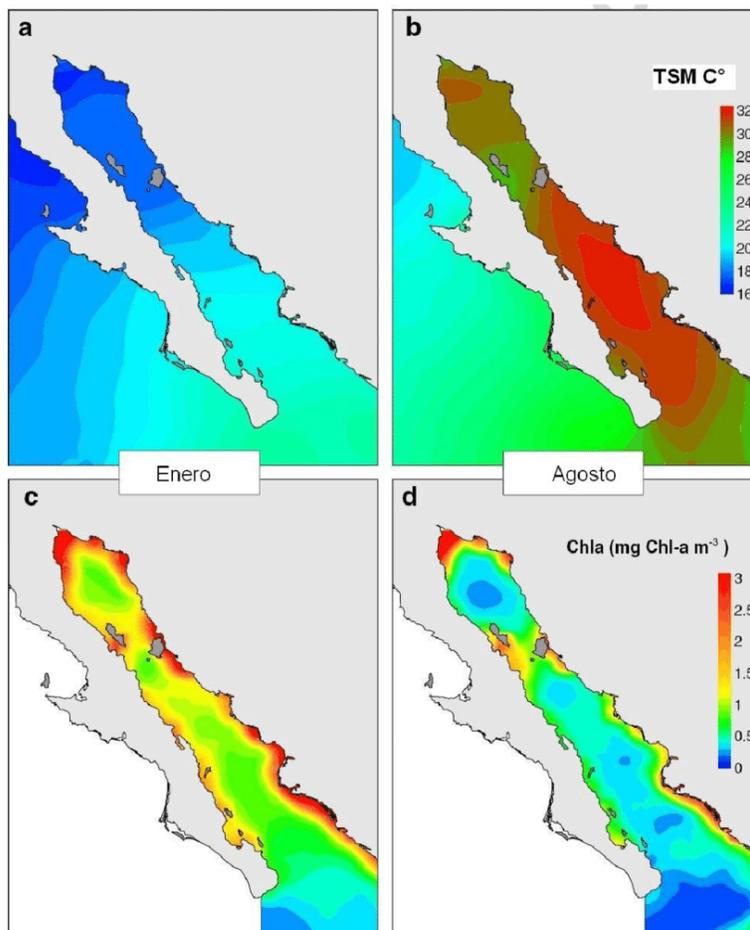


Figura 2.8. Temperatura promedio superficial del Golfo de California, para enero (a) y agosto (b) calculadas a partir de imágenes mensuales compuestas de sensores AVHRR para el periodo 1998-2004, proporcionadas por la Estación Oceanográfica Satelital del CICESEBCS; y concentración de pigmentos (c y d) derivados de imágenes del color SeaWiFS para el periodo 1997-2004. (Modificado de Lluch-Cota, et al., 2007).

2.7 Biología

Nombrado por Jacques-Yves Cousteau, como el “Acuario del mundo”, el Golfo de California es de suma importancia para México debido a su ubicación para el sector turístico, las actividades económicas que en él se realizan y por la diversidad de

flora y fauna. La cantidad de gente que vive en sus costas, en ciudades y puertos más importantes suma una cantidad considerable de habitantes.

En cuanto a la fauna, el Golfo de California tiene una gran variedad de especies endémicas y otras que son importantes para su explotación comercial y turística.

CAPÍTULO 3

Modelo hidrodinámico-numérico

En la aproximación numérica del término Coriolis surge el problema de un radio creciente de la onda inercial. Durante el paso de tiempo aplicado Δt , el vector de velocidad permanece en una dirección tangencial aumentando artificialmente el movimiento orbital en forma de espiral.

Para mitigar este problema numérico, se utilizan varios algoritmos, entre ellos la aplicación de una matriz de rotación o una aproximación semi-implícita del término de Coriolis. Como en esta sección se presenta una solución numérica de las ecuaciones de movimiento integradas verticalmente, se lleva a cabo un análisis de estabilidad simple de estas dos aproximaciones. A partir de este análisis, la aproximación aplicada para el término de Coriolis y la solución numérica propuesta se basa en la forma semi-implícita.

Las ecuaciones de movimiento horizontales se pueden escribir en forma simplificada.

$$\frac{dV}{dt} + (r + if)V = q \quad (3.1)$$

Donde un término de fricción lineal fue considerado y los componentes de la velocidad horizontal (u, v) , fueron proyectados en un plano complejo, es decir, $V = V(u, v) = u + iv$ y $q = q_u + iq_v$. El término de Coriolis es $f = 2\Omega \sin\phi$ donde, ϕ es la latitud, Ω es la velocidad angular de la tierra, y r es el coeficiente de fricción lineal. La solución de esta ecuación diferencial con $q = cte$ es

$$V = e^{-rt}(V_0 - V_p)(\cos ft - i \sin ft) + V_p \quad (3.2)$$

Donde $V_0 = V(t=0)$ y $V_p = \frac{q}{r + if t}$. Después de algunas manipulaciones y

considerando que $e^{-\pi} \approx \frac{1}{1 + rt}$, la solución de los componentes de la ecuación (1)

toma la forma

$$u = \frac{1}{1+rt} (u_o \cos ft + v_o \sin ft + tq_u) \quad (3.3)$$

$$v = \frac{1}{1+rt} (v_o \sin ft + u_o \cos ft + tq_v) \quad (3.4)$$

Se hizo uso de $1 - \cos ft \approx \frac{(ft)^2}{2}$, $|ft| \ll 1$ y $\sin ft \approx ft$. En la solución, descrita por las ecuaciones (3.3) y (3.4), la matriz de rotación $\begin{pmatrix} \cos ft & \sin ft \\ \sin ft & \cos ft \end{pmatrix}$ está contenida en la ecuación de movimiento. Esto explica su aplicación en el término de Coriolis en soluciones numéricas. Se lleva a cabo, como paso siguiente, un análisis de estabilidad de las ecuaciones inerciales para tres aproximaciones, es decir, para una aproximación simple, para la aplicación de una matriz de rotación y para un tratamiento semi- implícito del término Coriolis. Las ecuaciones inerciales

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = 0 \quad (3.6)$$

Se pueden aproximar numéricamente en una malla Arakawa C de la siguiente manera:

$$u_{k,l}^{n+1} = u_{k,l}^n + \frac{f\Delta t (v_{k-s,l+p}^n + v_{k+s,l+p}^n + v_{k-s,l-p}^n + v_{k+s,l-p}^n)}{4} \quad (3.7)$$

$$v_{k,l}^{n+1} = v_{k,l}^n - \frac{f\Delta t (u_{k-s,l+p}^n + u_{k+s,l+p}^n + u_{k-s,l-p}^n + u_{k+s,l-p}^n)}{4} \quad (3.8)$$

Las variables s y p toman los valores $(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, 0)$, acorde a la posición de (u, v) en la malla Arakawa C. Usando el método de Fourier para el análisis de estabilidad, las variables, (u, v) son representadas en la forma se obtuvieron.

$$u_{k+s, l+p}^n = u \gamma^n e^{i(s\alpha\Delta x + p\beta\Delta y)}$$

De (3.7) y (3.8) las relaciones

$$\gamma u = u + \frac{f\Delta t v}{4} \left[\left(e^{-i\alpha\frac{\Delta x}{2}} + e^{i\alpha\frac{\Delta x}{2}} \right) e^{i\beta\frac{\Delta y}{2}} + \left(e^{-i\alpha\frac{\Delta x}{2}} + e^{i\alpha\frac{\Delta x}{2}} \right) e^{-i\beta\frac{\Delta y}{2}} \right] \quad (3.9)$$

$$\gamma v = v + \frac{f\Delta t u}{4} \left[\left(e^{-i\alpha\frac{\Delta x}{2}} + e^{i\alpha\frac{\Delta x}{2}} \right) e^{i\beta\frac{\Delta y}{2}} + \left(e^{-i\alpha\frac{\Delta x}{2}} + e^{i\alpha\frac{\Delta x}{2}} \right) e^{-i\beta\frac{\Delta y}{2}} \right] \quad (3.10)$$

Aplicando las igualdades para la función coseno, las ecuaciones (3.9) y (3.10) se pueden escribir en la forma matriz:

$$\begin{bmatrix} (1 - \gamma) & f\Delta t \cos \alpha \frac{\Delta x}{2} \cos \beta \frac{\Delta y}{2} \\ -f\Delta t \cos \alpha \frac{\Delta x}{2} \cos \beta \frac{\Delta y}{2} & 1 - \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

El cálculo del determinante conduce a

$$|\gamma| = \left[1 + \left(f\Delta t \cos \alpha \frac{\Delta x}{2} \cos \beta \frac{\Delta y}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} > 1 \quad (3.11)$$

Esta aproximación numérica de los términos de Coriolis es inestable. Si se incluye una fricción lineal en las ecuaciones inerciales (3.5) y (3.6), entonces la condición de estabilidad que se obtiene es:

$$(1 + f\Delta t)^2 \leq (1 + r\Delta t) \quad (3.12)$$

Utilizando un análisis de estabilidad similar para las ecuaciones inerciales pero esta vez aplicando una matriz de rotación, el criterio de estabilidad

$$0 \leq |\gamma|^2 \leq 1 \quad (3.13)$$

Se deduce. La aplicación de una matriz de rotación en soluciones numéricas de las ecuaciones inerciales es siempre estable. Otra interesante aproximación numérica de las ecuaciones inerciales es la aplicación de un enfoque semi-implícito. El análisis de estabilidad Conduce en este caso al criterio de estabilidad

$$f\Delta t \leq 2 \quad (3.14)$$

Si la fricción se incluye en las ecuaciones inerciales entonces (3.14) cambia a

$$f\Delta t \leq 2(1 + rt)^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

Este es también un fuerte criterio de estabilidad. Este análisis de estabilidad para diferentes enfoques de las soluciones numéricas de las ecuaciones inerciales produce dos resultados principales; Hay estabilidad numérica cuando se aplica una matriz de rotación y cuando los términos de Coriolis se aproximan en una forma semi-implícita.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son usadas para describir el movimiento de los fluidos, y aprovechadas en distintas áreas de las Geociencias para predecir

fenómenos que ocurren en la atmósfera terrestre y en los océanos y todo suceso que incluya fluidos newtonianos, las mareas en el Golfo de California pueden describirse mediante estas ecuaciones junto con la ecuación de continuidad.

La aproximación semi-implícita de los términos de Coriolis sugiere un enfoque numérico para la solución de las ecuaciones de movimiento verticalmente integradas. Esta solución se describe a continuación. Consideremos los componentes horizontales de las ecuaciones de movimiento verticalmente integradas.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{H+\zeta} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{H+\zeta} \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g(H + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \frac{rU\sqrt{U^2+V^2}}{(H+\zeta)^2} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{H+\zeta} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{H+\zeta} \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g(H + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \frac{rV\sqrt{U^2+V^2}}{(H+\zeta)^2} \quad (3.17)$$

Y la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3.18)$$

Donde (u, v) son los transportes en $m^2 s^{-1}$ en las direcciones (x, y), $f = 2\Omega \sin\varphi$ es el término de Coriolis, $\Omega = 7.27 * 10^{-5} s^{-1}$ es la velocidad angular de la tierra, el término H simboliza a la profundidad del océano, el término g corresponde a la aceleración gravitacional, (W_x, W_y) son las velocidades del viento en las direcciones (x,y), el término r representa al coeficiente de fricción, $\lambda = 1.0 * 10^{-6}$ es una constante, el término t se usa para el tiempo en segundos, y el término A_H es el coeficiente horizontal de viscosidad turbulenta en m^2s^{-1} .

Las ecuaciones (3.16) y (3.17) pueden ser escritas de la siguiente forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = fV - \frac{rU\sqrt{U^2+V^2}}{(H+\zeta)^2} + T(x) \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -fU - \frac{rV\sqrt{U^2+V^2}}{(H+\zeta)^2} + T(y) \quad (3.20)$$

Con

$$T(x) = -\frac{U}{H+\zeta} \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{V}{H+\zeta} \frac{\partial U}{\partial y} - g(H+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (3.21)$$

$$T(y) = -\frac{U}{H+\zeta} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{V}{H+\zeta} \frac{\partial V}{\partial y} - g(H+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (3.22)$$

La discretización de las ecuaciones (3.19) y (3.20) aplicando un enfoque semi-implícito para los términos de Coriolis es entonces:

$$\frac{U_{i,j}^{n+1} - U_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{f_U(V_{i,j}^{n+1} + \bar{V}_{i,j}^n)}{2} - \frac{rU_{i,j}^{n+1} \sqrt{U_{i,j}^n + \bar{V}_{i,j}^n}}{(H_{i,j} + \zeta_{i,j}^n)^2} + T(x)_{i,j}^n \quad (3.23)$$

$$\frac{V_{i,j}^{n+1} - V_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{f_V(U_{i,j}^{n+1} + \bar{U}_{i,j}^n)}{2} - \frac{rV_{i,j}^{n+1} \sqrt{\bar{U}_{i,j}^n + V_{i,j}^n}}{(H_{i,j} + \zeta_{i,j}^n)^2} + T(y)_{i,j}^n \quad (3.24)$$

Las ecuaciones (3.23) y (3.24) pueden ser descritas de la siguiente forma:

$$U_{i,j}^{n+1} R_{i,j}^{(x)n} - \hat{f}_u V_{i,j}^{n+1} = \tilde{U}_{i,j}^n$$

$$V_{i,j}^{n+1} R_{i,j}^{(y)n} - \hat{f}_v U_{i,j}^{n+1} = \tilde{V}_{i,j}^n$$

El sistema de ecuaciones puede ser escrito en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} 1 & -\hat{f}_U \\ \hat{f}_V & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{i,j}^{n+1} \\ V_{i,j}^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{U}_{i,j}^n \\ \tilde{V}_{i,j}^n \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Donde:

$$R_{i,j}^{(x)n} = 1 + \frac{r\sqrt{U_{i,j}^n + \bar{V}_{i,j}^n}}{(H_{i,j} + \zeta_{i,j}^n)^2}, \quad R_{i,j}^{(y)n} = 1 + \frac{r\sqrt{\bar{U}_{i,j}^n + V_{i,j}^n}}{(H_{i,j} + \zeta_{i,j}^n)^2}$$

$$\hat{f}_U = \frac{\Delta t f_U}{2R_{i,j}^{(x)n}}, \quad \hat{f}_V = \frac{\Delta t f_V}{2R_{i,j}^{(y)n}}$$

$$\tilde{U}_{i,j}^{(x)n} = \frac{1}{R_{i,j}^{(x)n}} \left(U_{i,j}^n + \frac{f_U \bar{V}_{i,j}^n}{2} + T^{(x)n}_{i,j} \right)$$

$$\tilde{V}_{i,j}^{(y)n} = \frac{1}{R_{i,j}^{(y)n}} \left(U_{i,j}^n + \frac{f_V \bar{U}_{i,j}^n}{2} + T^{(y)n}_{i,j} \right)$$

Considerando la matriz $A = \begin{pmatrix} 1 & -\hat{f}_U \\ \hat{f}_V & 1 \end{pmatrix}$, su inversa $A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & \hat{f}_U \\ -\hat{f}_V & 1 \end{pmatrix}$ y su determinante $\det(1 + \hat{f}_U \hat{f}_V)$, la solución de (24) está dada por

$$\begin{pmatrix} U_{i,j}^{n+1} \\ V_{i,j}^{n+1} \end{pmatrix} = \frac{1}{\det A} \begin{pmatrix} 1 & \hat{f}_U \\ -\hat{f}_V & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{U}_{i,j}^n \\ \tilde{V}_{i,j}^n \end{pmatrix}$$

Desarrollando los productos de la matriz e incluyendo la ecuación de continuidad, las siguientes ecuaciones son obtenidas:

$$U_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{(1+\hat{f}_U\hat{f}_V)} (\tilde{U}_{i,j}^n + \hat{f}_U \tilde{V}_{i,j}^n) \quad (3.26)$$

$$V_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{(1+\hat{f}_U\hat{f}_V)} (-\hat{f}_V \tilde{U}_{i,j}^n + \tilde{V}_{i,j}^n) \quad (3.27)$$

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - \Delta t \left[\frac{u_{i,j+1}^{n+1} H_{i,j}^{(u)n} - u_{i,j}^{n+1} H_{i,j-1}^{(u)n}}{\Delta x} - \frac{v_{i,j}^{n+1} H_{i,j}^{(v)n} - v_{i+1,j}^{(n+1)} H_{i+1,j}^{(v)n}}{\Delta y} \right] \quad (3.28)$$

La solución numérica de las ecuaciones de movimiento horizontales (3.26), (3.27) y la ecuación de continuidad (28) satisface el criterio de Courant, Fridriech, Lewy (CFL) y el criterio de los términos inerciales representados por la ecuación (15) para la estabilidad numérica. Las simulaciones numéricas se llevaron a cabo para el Golfo de California en una malla que abarca la región estudiada con una resolución de cuadrícula de 3 minutos (aproximadamente 5560 m), generó una matriz de (179,177) y un número total de 7098 puntos húmedos (Figura 3.1).

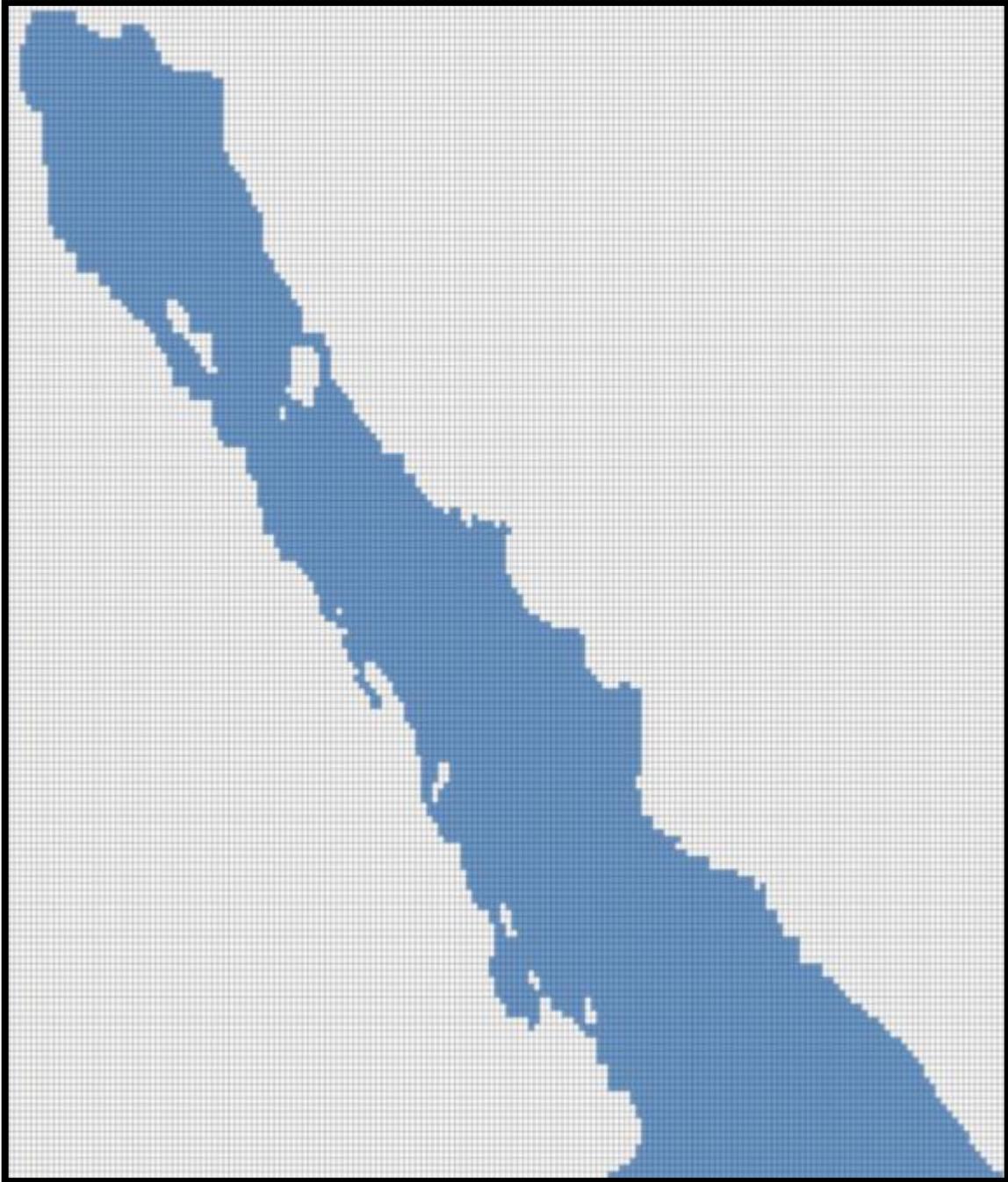


Figura 3.1. Matriz generada de 179 por 177, las celdas azules son los “puntos húmedos” donde se realizan las operaciones.

CAPÍTULO 4

Dinámica generada por mareas y viento

Todos los golfos tienen la característica principal de ser grandes extensiones de mar y de estar parcialmente cerrados por tierra, en el caso del Golfo de California, es una extensión del océano pacífico. Entender la dinámica mareas en regiones semi-cerradas como el Golfo de California es importante para la seguridad costera, navegación y ecología Roos y Schuttelaars (2011). La marea del Golfo de California, como en todos los mares marginales, es resultado de la co-oscilación con el océano Pacífico. Una característica de la mayoría de los mares marginales es que son extremadamente energéticos y con una extensa variedad de movimientos, Badan-Dangon y Ripa (1992). En el caso del Golfo de California comunicado con el océano pacífico, las señales de marea entran en la boca del Golfo, se propagan como ondas de Kelvin por la costa continental de México. Las mareas semi-diurnas muestran un patrón tal que su amplitud decae hacia la parte central del golfo y luego su amplitud se incrementa notablemente en la parte norte, habiendo una fuerte amplificación de la marea en el Delta de río Colorado (Figura 4.1).

La marea es el cambio del nivel del mar como resultado de las fuerzas de atracción gravitacional resultante de la configuración astronómica del Sol, la Tierra y la Luna. Fundamentalmente, se distinguen ciclos diurnos y semidiurnos, creando las mareas alta y baja, pleamar y bajamar, respectivamente. Sin embargo, existen ciclos mensuales, anuales o de varios años. El movimiento de las mareas y su estructura, depende mucho de la fricción, la batimetría y la presencia de costas o islas, todos estos factores, sumados, modifican su amplitud y propagación. La marea puede interactuar con corrientes generadas por el viento o por variaciones de densidad resultando en una circulación muy compleja. En esencia es relevante investigar la interacción de la marea con la geometría (costa y fondo marino) del mar.

Los periodos de marea principales son la M2 y la S2 producidas por la luna y la O1 y K1 producidas por el Sol (Tabla 4.2).

La variación del nivel del mar es un evento periódico, el cual, no es visible a simple vista mar adentro, pero si en la playas y costas.

Existe un retraso entre mareas alta y baja, la marea S2, generada por el sol, ocurre cada 12 horas, sin embargo, la marea M2, ocurre aproximadamente cada 12 horas con 25 minutos, esto también varía dependiendo de la época del año en que suceda, es decir, estas mareas interactúan de manera constructiva y destructiva lo que se refleja en un cambio de fase y amplitud.

La presencia de mareas vivas y muertas es el resultado, también de la configuración astronómica del Sol y las fases de la Luna, cuando es luna nueva y luna llena, esta se alinea con el Sol, creando mareas vivas, cuando la luna se encuentra en cuarto creciente o menguante, se contrarrestan las fuerzas, creando mareas muertas, este periodo sucede aproximadamente cada 14.765 días, la mitad del mes sinódico que es de aproximadamente cada 29.53 días.

4.1 Las mareas en el Golfo de California

Las mareas en el Golfo de California son principalmente mixtas semi-diurnas, pero en la parte central son del tipo diurno (Ripa y Velázquez 1993). La marea del Golfo es generada por co-oscilación con la marea del océano Pacífico.

En la zona del archipiélago, existen cuencas muy profundas que entran en contacto con la parte más somera del Golfo de California, aquí existen fuertes corrientes de marea debido a la presencia de esos canales (Hidalgo- González *et al.* 1997), sin embargo las mareas más altas se generan en el Norte del Golfo de California, de la parte central a la región norte en la desembocadura del río Colorado, se alcanzan los valores máximos de velocidad (Carbajal y Montaña, 1999).

El principal agente forzante en la boca del Golfo California es la marea debida a la luna (M2) así como la fuerza generada por los vientos en época de verano e invierno sobre la superficie del golfo (Velasco Fuentes y Marinone, 1999).

4.1.1 Vientos

Los vientos en el Golfo de California son en principio, bastante complejos y muy variables, pero en primera aproximación pueden ser considerados como canalizados por el golfo fluyendo hacia el sur en invierno y hacia el norte en el verano. Es importante hablar de los vientos en el Golfo de California, ya que estos influyen fuertemente en la dinámica de marea del Golfo, los vientos en Golfo cuentan con ciclos que se presenta por estaciones, como ya se mencionó anteriormente, existen cadenas montañosas a lo largo de Baja California y en la parte continental, esta configuración da lugar a que los vientos fluyan a lo largo del Golfo.

Dado que los vientos son estacionales, estos son diferentes en verano e invierno (presión, temperatura, humedad), en verano el viento es húmedo y templado, en invierno es frío y seco (Lavín et al. 1997).

4.2 Dinámica por la M2

La marea generada por la Luna, la M2, es la que conforma la principal corriente de marea del Golfo (Filloux, 1973). Las corrientes de marea más energéticas, según Carbajal (1993), se encuentran localizadas en Salsipuedes y en el Delta Río Colorado (Figura 4.1), al norte del Golfo, donde tan solo para la M2 alcanzan valores hasta de 0.80 m s^{-1} .

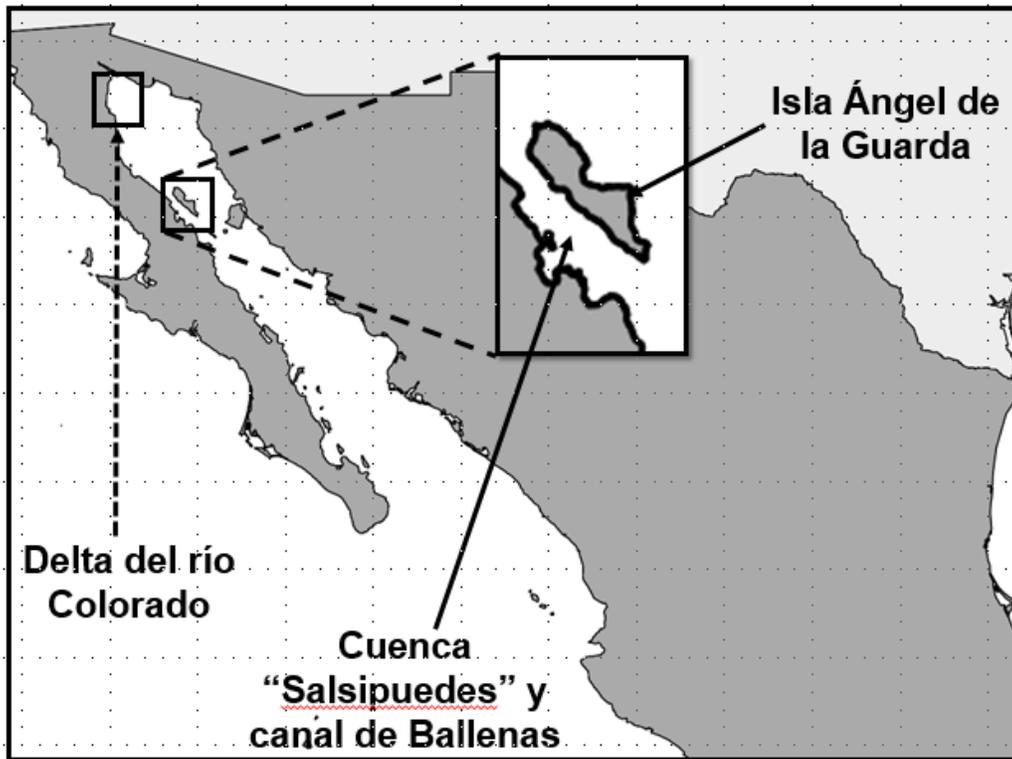


Figura 4.1. Ubicación de Salsipuedes y Delta del río Colorado.

Las mareas principales que gobiernan el Golfo de California son una combinación de mareas diurnas y semi-diurnas. Las siete componentes principales de marea (Tabla 4.2) poseen diferentes periodos, las mareas diurnas principales en el Golfo de California son la O1, K1 y P1. En contraste, las mareas semi-diurnas de mayor importancia son la M2, S2, N2 y K2 (Carbajal y Backhaus, 1998).

NOMBRE	PERIODO (HORAS)	TIPO
<i>M2</i>	12.42	Semi-diurnas generada por la Luna
<i>S2</i>	12.00	Semi-diurnas generada por el Sol
<i>N2</i>	12.66	Generada debido a la variación de la distancia del sistema Tierra-Luna
<i>K2</i>	11.97	Debido a cambios de declinación del Sol y la Luna
<i>K1</i>	23.93	Solar-lunar
<i>O1</i>	25.82	Diurnas generada por la Luna
<i>P1</i>	24.07	Diurnas generada por la Luna

Tabla 4.2 Nombre de mareas usadas, periodo y descripción

La amplitud y la fase de estas principales mareas cambian conforme avanzan en el Golfo de California (tabla 4.2), la costa, la batimetría y otros factores propician una variabilidad en amplitud y fase y sobre todo el proceso de reflexión de las mareas en la frontera cerrada y la disipación de energía contribuyen a su variabilidad. La geometría del golfo (largo, ancho profundidad) pueden contribuir a través de la resonancia o procesos de convergencia y divergencia a la amplitud del nivel del mar. El Golfo de California tiene uno de los más grandes rangos de marea del mundo, más en concreto, en el norte por una combinación de estos procesos (Ross y Schuttelaars, 2011). Se efectuará un análisis profundo de la circulación resultante por la acción de la marea M2 y vientos del noroeste y vientos del sureste. Se efectuará un análisis en las zonas con mayor intensidad y con mayor variabilidad.

4.3 Corrientes instantáneas con el ciclo de marea M2 y vientos del noroeste y sureste

Cuando se corre el modelo, este escribe datos cada 4 pasos de tiempo, el número de partes por periodo es de 256 como el periodo de la M2 es de 12.4206 horas (44714 segundos) al dividir el periodo en segundos entre el número de partes por periodo nos da un paso de tiempo de 174.66 segundos (2.91 minutos). Es paso de tiempo al multiplicarse por 4 (ya que escribe cada 4 pasos de tiempo) da como resultado que se escribe cada 698.658 segundos a partir del comienzo de la modelación.

Las siguientes gráficas presentan la corriente instantánea generada a 100, 200, 300, 400 y 500 iteraciones a partir de que se corre el modelo (19.40 horas, 38.81 horas, 58.22 horas, 77.62 horas y 97.03 horas). En la Figura 4.2 se observa que en la parte norte del golfo la intensidad de las corrientes es más intensa pero también a lo largo de la costa oriental, en las zonas someras costera el flujo es fuerte. En la parte sur, en la zona profunda del golfo, las corrientes son marcadamente más pequeñas

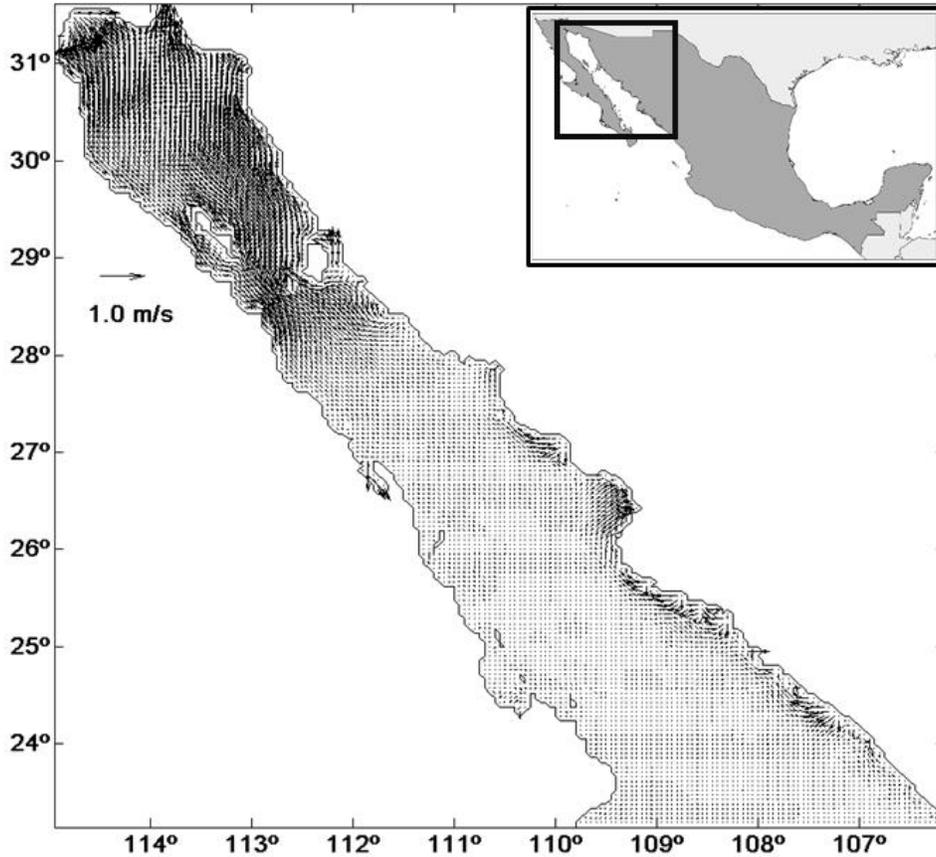


Figura 4.2. Imagen general del Golfo con la marea M2 a 100 iteraciones y viento del noroeste (19.40 horas a partir de que se corre el modelo)

En la Figura 4.3, se efectúa una ampliación de la parte norte destacando la intensidad del flujo en varias zonas de la parte norte. La figura de la izquierda representa el flujo de la M2 con viento del noroeste y la figura de la derecha la marea M2 con viento del sureste. Se hace a continuación una descripción detallada de las diferentes partes del Golfo de California donde el flujo es importante. Este proceso revela que los cambios de dirección del flujo de marea ocurren a diferentes tiempos lo que puede conducir a que mientras en la gran parte del golfo el flujo tiene una dirección en otras zonas, por lo general someras, aún tiene la dirección de la fase anterior de la marea. Esto lleva en muchos casos a procesos de convergencia y divergencia del flujo.

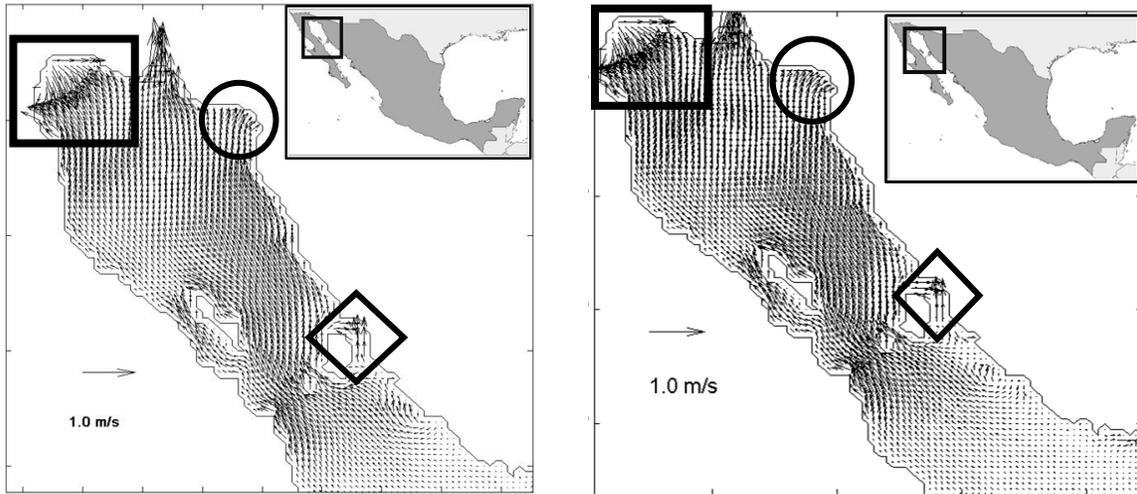


Figura 4.3 Corriente con marea M2 y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha), desde la región del archipiélago hasta el Delta del Río Colorado.

Las corrientes en casi todo el golfo siguen un patrón hacia el norte. Sin embargo, en la parte del Delta del Río Colorado (**cuadro**), las corrientes van en dirección contraria, con órdenes de magnitud cercanos al metro por segundo indicando que el cambio de dirección en esa zona no ha ocurrido todavía lo que lleva a un proceso de convergencia de corrientes. Cerca de la Bahía de San Jorge (**círculo**), las corrientes convergen hacia la costa creando una zona con mayor elevación. Las corrientes son de menos de un metro por segundo en la zona del archipiélago en el canal “**El infienillo**” (**rombo**). Lo estrecho del canal provoca que las corrientes aumenten. En ambas imágenes las corrientes no presentan una marcada diferencia con relación a la presencia de viento, solo en la imagen donde se presenta viento del sureste, se ve una influencia un poco mayor.

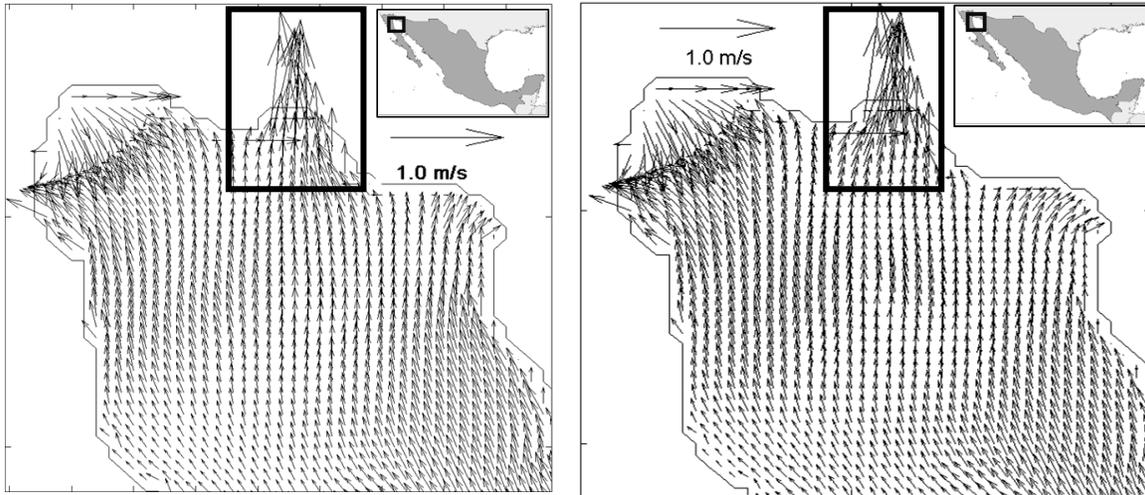


Figura 4.4 Corriente con marea M2 y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha) a 100 iteraciones (19.40 horas a partir de que se corre el modelo).

La Figura 4.4 muestra una ampliación del flujo en la zona del Delta del Río Colorado y en la bahía de Adair. Se puede observar el desfase de las corrientes de marea entre el Delta del Río Colorado y la bahía de Adair, es decir, en la bahía de Adair ya ocurrió el cambio de dirección de las corrientes de sur a norte, mientras que esto no ha sucedido en el Delta del Río Colorado. Estas situaciones de convergencia generan elevaciones del nivel del mar y son muy comunes en el cambio de dirección de las mareas. En **puerto Peñasco (rectángulo)** las corrientes sobrepasan el metro por segundo, convergiendo hacia una misma dirección hacia el norte, ocasionando acumulación de agua y produciendo una elevación del nivel del agua. La zona está caracterizada por una alta densidad de energía cinética. En la figura del lado derecho, con viento del sureste, los vectores son de mayor magnitud y por lo tanto, presentan mayor energía cinética, siendo en este caso constructiva la interacción de la marea y el viento. En el centro y en general en toda la figura los vectores son más homogéneos en magnitud.

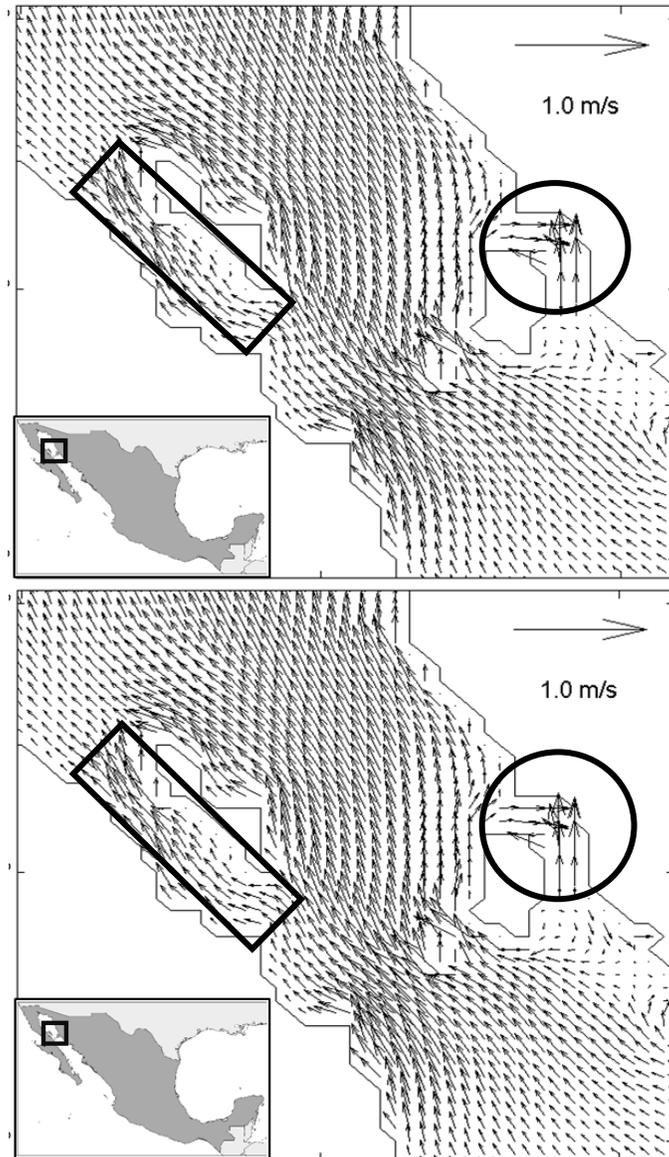


Figura 4.5. Corriente con marea M2 y viento del noroeste (arriba) y sureste (abajo) a 100 iteraciones (19.40 horas a partir de que se corre el modelo). Región del Archipiélago.

La intensidad de las corrientes es baja en el lado sur del golfo, luego se incrementa en la región del archipiélago en la parte central y se intensifica notablemente en la parte norte. Las corrientes siguen la complejidad de la geometría del archipiélago (Figura 4.5), en las zonas estrechas es donde las corrientes adquieren mayor rapidez como en el “**Canal de ballenas**”

(rectángulo), formado por la isla Ángel de la Guarda y Baja California. Al sur, en la región de **“Salsipuedes” (al sur del rectángulo)**, se ubica una región e intenso flujo. La zona de mayor densidad de energía se presenta en el canal **“El infiernillo” (círculo)**, en donde también su estructura y el fondo marino juegan un papel importante, las corrientes llegan a ser del orden aproximado de medio metro por segundo.

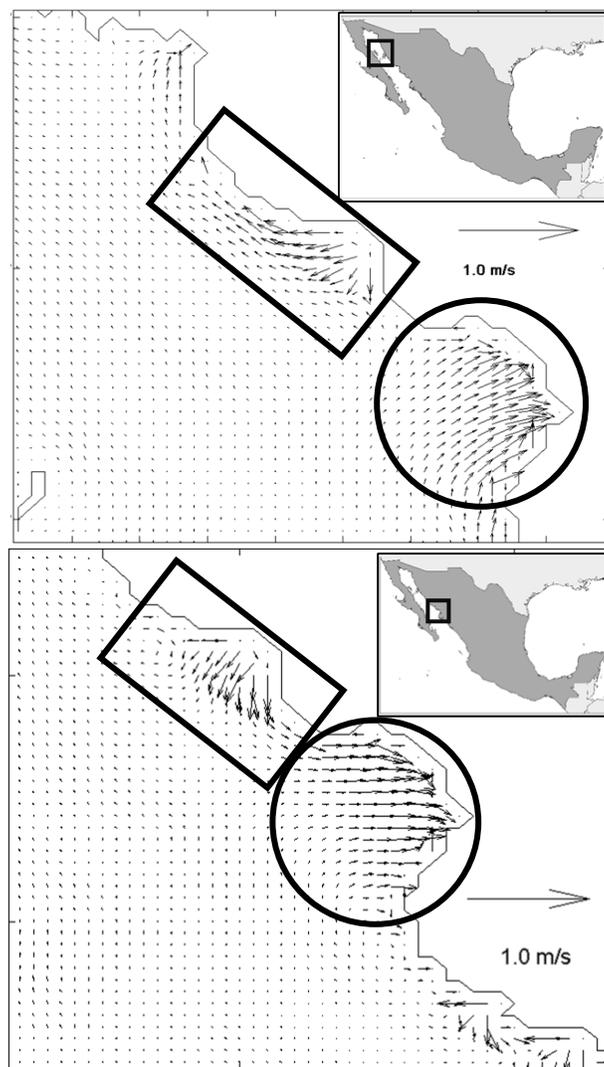


Figura 4.6. Corriente con marea M2 y viento del noroeste (arriba) y sureste (abajo) a 100 iteraciones (19.40 horas a partir de que se corre el modelo), región costa este del Golfo.

Comparando ambas imágenes en la Figura 4.6, en el área del rectángulo se observa una diferencia entre la marea M2 con viento del noroeste y con viento del sureste. Y entre la zona del rectángulo y la zona del círculo se observa una diferencia de fase importante, mientras que en la bahía ubicada en el círculo los vectores fluyen hacia la costa en la región del rectángulo los vectores están dirigidos hacia el mar abierto. Esto da una idea de que en zonas someras y el ancho variable de la plataforma continental ocasionan los cambios de fase observados por la diferente velocidad de propagación de la onda de marea. Este fenómeno ocurre a lo largo de la costa este del Golfo de California donde la plataforma continental es más ancha, existen varias bahías y la profundidad es relativamente pequeña.

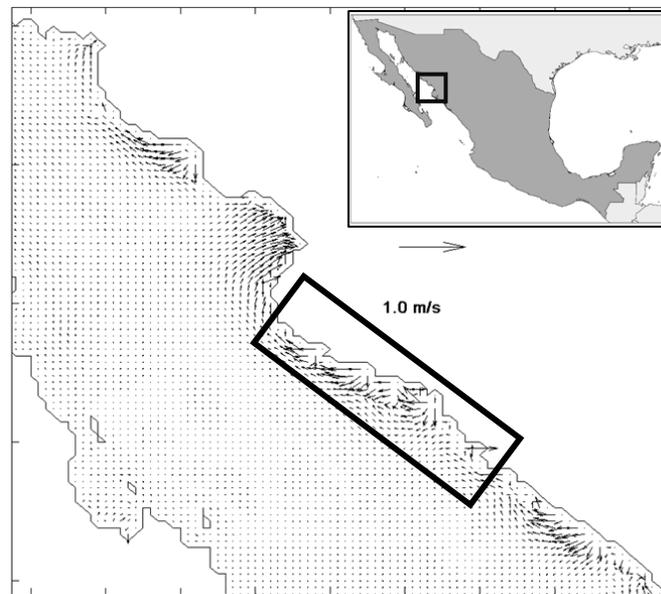


Figura 4.7. Corriente con marea M2 y viento del noroeste a 100 iteraciones (19.40 horas a partir de que se corre el modelo).

El comportamiento de variaciones en la fase a lo largo de la costa este del Golfo de California se puede observar también en las figuras 4.7 y 4.8, donde las corrientes, como resultado de calcular con la marea M2 y con viento noroeste (Figura 4.7) y marea M2 con viento del sureste (Figura 4.8), son mostradas. En algunos casos los vectores están dirigidos hacia la costa y en otros hacia el mar abierto. Esto puede ser explicado con el comportamiento tan variable del ancho de la plataforma continental como puede ser observado en la Figura 2.6. Puesto que la onda de marea o de Kelvin se propaga (velocidad de fase c) como la raíz cuadrada del producto de la aceleración gravitacional por la profundidad, es decir $c = \sqrt{gH}$, en un dominio con gradientes de la profundidad H , la velocidad de fase será muy variable.

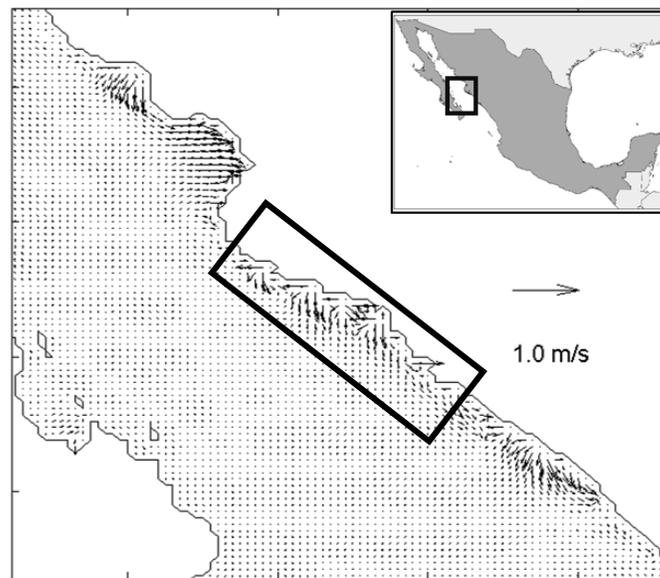


Figura 4.8. Corriente con marea M2 y viento del sureste a 100 iteraciones (19.40 horas a partir de que se corre el modelo).

La comparación indica que existe una marcada diferencia entre los vectores de ambas imágenes. De manera general, la zona más energética se encuentra en la costa, en las áreas donde no es costa, la corriente es pequeña debido a la influencia de la profunda batimetría que existe en esa zona. Los vectores que salen de la costa

en la primera imagen del área marcada, los vectores se dirigen hacia el norte del Golfo, en la segunda, hacia el sur.

En la Figura 4.9 se muestra el estado instantáneo de las corrientes asociadas a la marea M2 y con viento del noroeste. Esta imagen tiene la finalidad de mostrar el estado de circulación en las zonas costeras del Golfo de California. Se puede apreciar que la fase, es decir, el estado de las corrientes en un instante de tiempo dado, es muy variable a lo largo de la costa oriental del golfo. Mientras que en algunas bahías el flujo es hacia el mar abierto en otras el flujo es hacia la costa. En esta situación tan variable a lo largo de la costa el viento juega un papel relevante en modificar las corrientes principalmente en las zonas costeras. En la parte norte del Golfo de California, las corrientes de marea son muy intensas por lo que la modificación por la acción del viento es menos notable, como puede comprobarse en la Figura 4.10, donde se observa apenas algunas diferencias en las zonas costeras en los experimentos de la marea M2 con viento del noroeste y con viento del sureste.

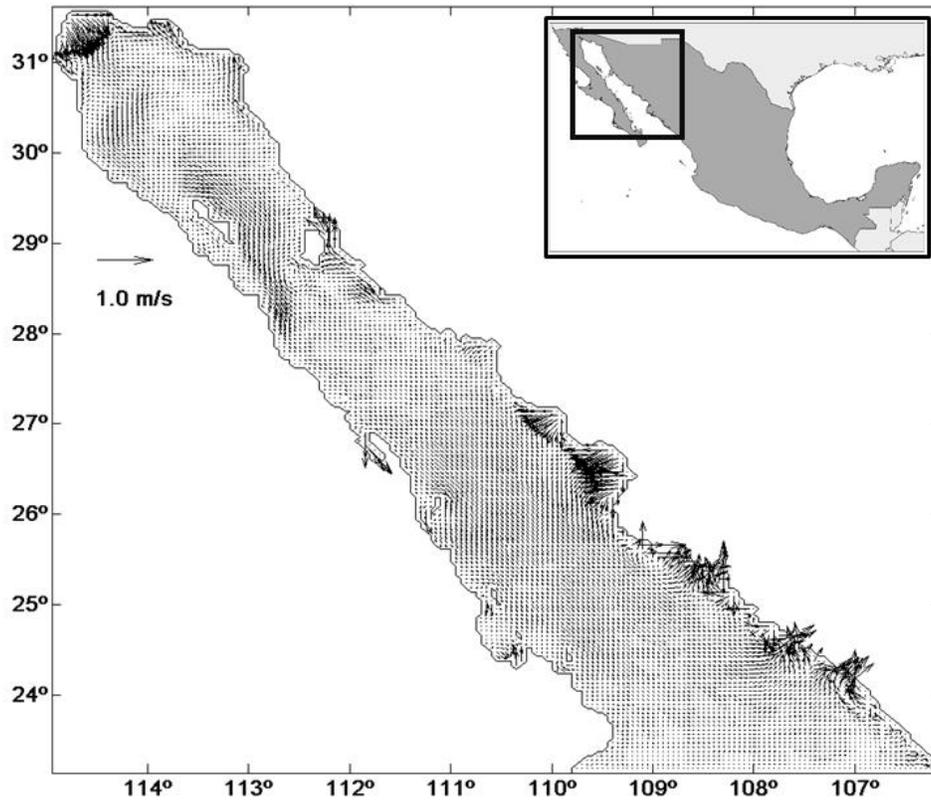


Figura 4.9. Imagen general del Golfo con la marea M2 a 200 iteraciones y viento del noroeste (38.8 horas a partir de que se corre el modelo)

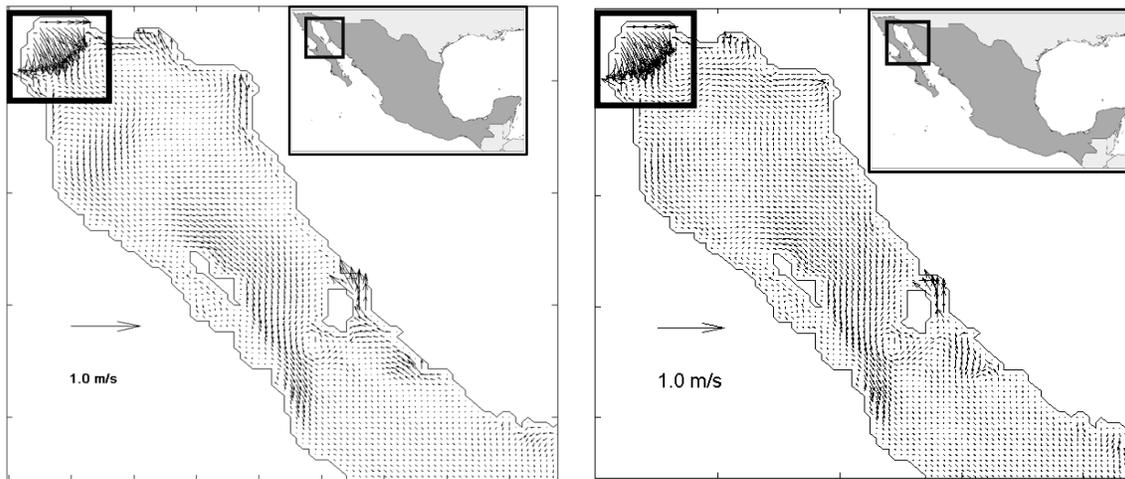


Figura 4.10. Corriente con marea M2 y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha), desde la región del archipiélago hasta el Delta.

La siguiente imagen tiene por objeto describir el efecto que tiene el viento sobre las corrientes marinas. En la Figura 4.11 se muestra la circulación a un instante dado para las condiciones de marea M2 y viento del noroeste y la M2 con viento del sureste. Las condiciones iniciales en ambos casos fueron las mismas y el instante de marea es el mismo. Se puede observar que en la parte norte la circulación es bastante diferente como lo indica la línea indicando el flujo en un caso y en el otro. La trayectoria Lagrangiana es diferente y sería la que seguiría un objeto flotante. En la bahía de San Jorge (elipse) los vectores de velocidad son diferentes mientras que en la bahía de Adair (rectángulo) son diferentes pero la diferencia es menor. En el Delta del Río Colorado la circulación es parecida en ambos casos

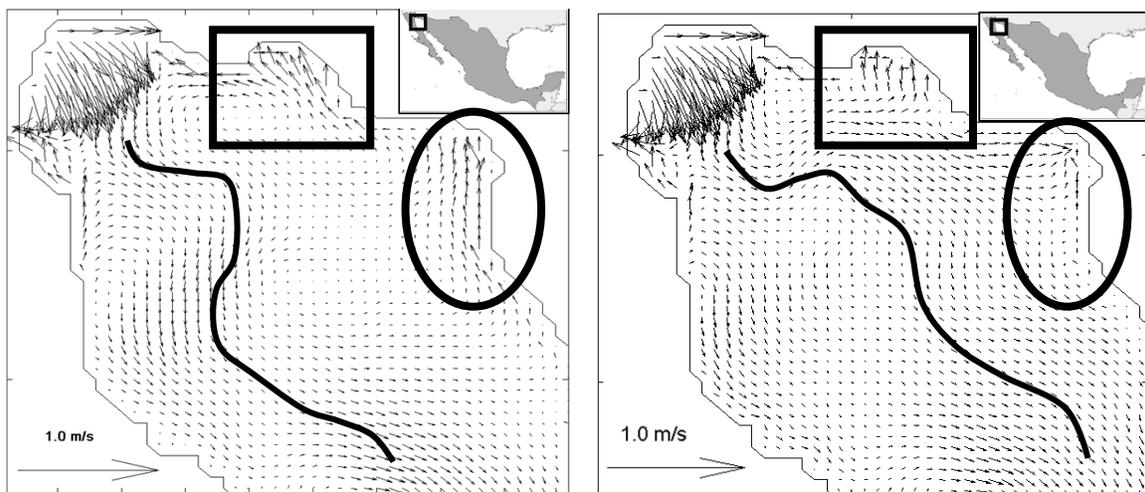


Figura 4.11. Imagen general del Golfo con la marea M2 a 200 iteraciones y Corriente con marea M2 y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha) a 38.8 horas a partir de que se corre el modelo, parte norte del Golfo.

En ambas imágenes podemos ver diferencias en cuanto a los patrones que toman las corrientes en ese momento, en puerto peñasco (rectángulo) en la primera figura las corrientes se dirigen al noroeste, como es de esperarse y además forman un remolino ciclónico. En la segunda imagen, la corriente entra a la costa y el remolino ya no se encuentra en la segunda y ahora se distingue una corriente que va de oeste a este.

En el área que corresponde al óvalo, en la figura de la izquierda, la corriente sigue la línea de costa y se enfila hacia la dirección norte, pero en la figura de la derecha, en el punto más alto, estas corrientes convergen con aquellas que vienen del área del óvalo, cambiando drásticamente la circulación en esa zona. Ese cambio de circulación es notable en la línea que sigue a la corriente en ambas figuras en dirección sur-norte, en la primera la corriente sigue un camino que está cercano a la costa oeste del Golfo, creando remolinos a su paso. En la figura de la derecha, estos remolinos desaparecen o cambian de posición, siguiendo la trayectoria de esa corriente se encuentra más al centro del golfo.

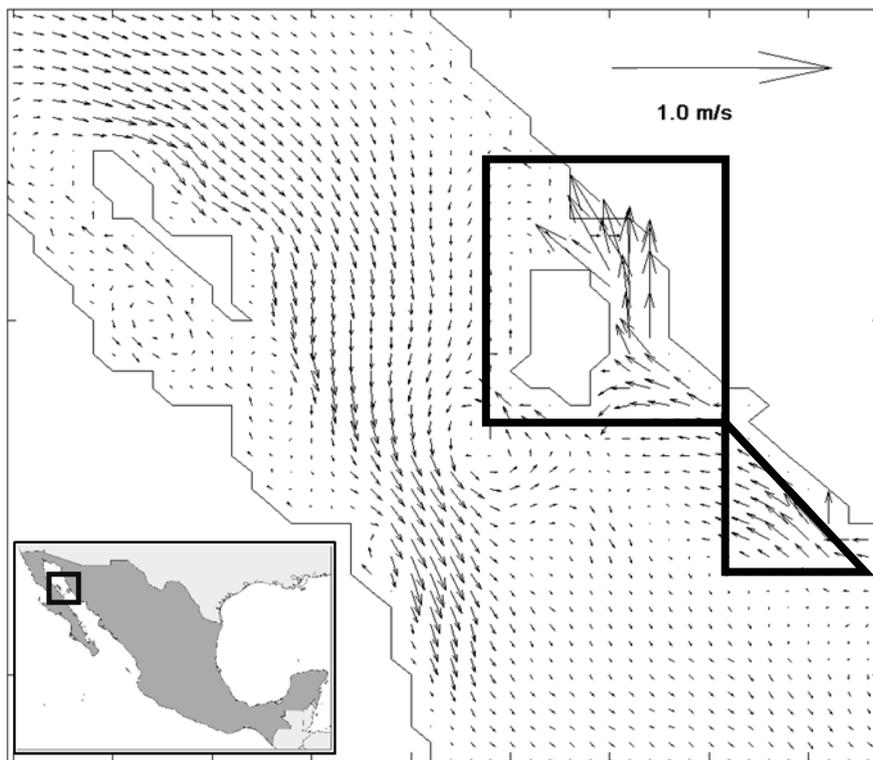


Figura 4.12.a. Corriente con marea M2 y viento del noroeste, región del archipiélago.

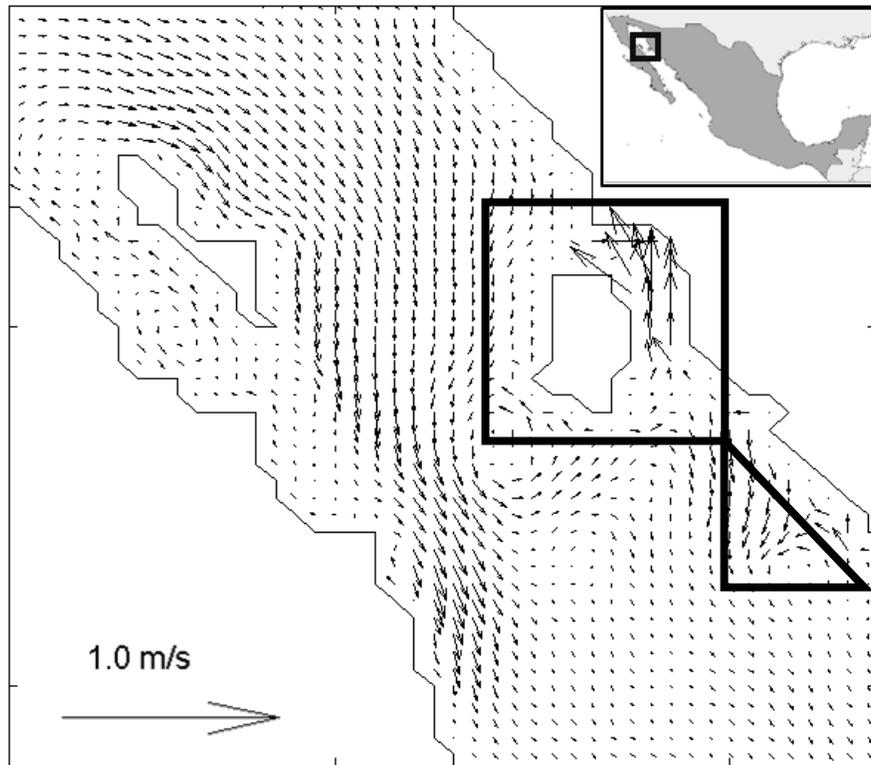


Figura 4.12.b Corriente con marea M2 y viento del sureste, región del archipiélago.

En la figura 4.12 se analiza el efecto del viento sobre la corriente de marea M2 en la parte central del golfo donde la batimetría cambia abruptamente. La corriente con viento del noroeste cambia notablemente en relación al cálculo con viento del sureste en la región al sur de isla Tiburón, región encerrada en un triángulo. La circulación en la mayor parte del archipiélago cambia poco con los vientos. Sin embargo, en dos zonas es interesante ver que si hay cambios, una es el canal del infiernillo (área cuadrada), donde se puede apreciar que la figura de arriba tiene velocidades más fuertes que la de abajo. En cuanto al área triangular, la corriente va en dirección noroeste y en la segunda figura en dirección suroeste, generando un remolino en sentido anti-horario.

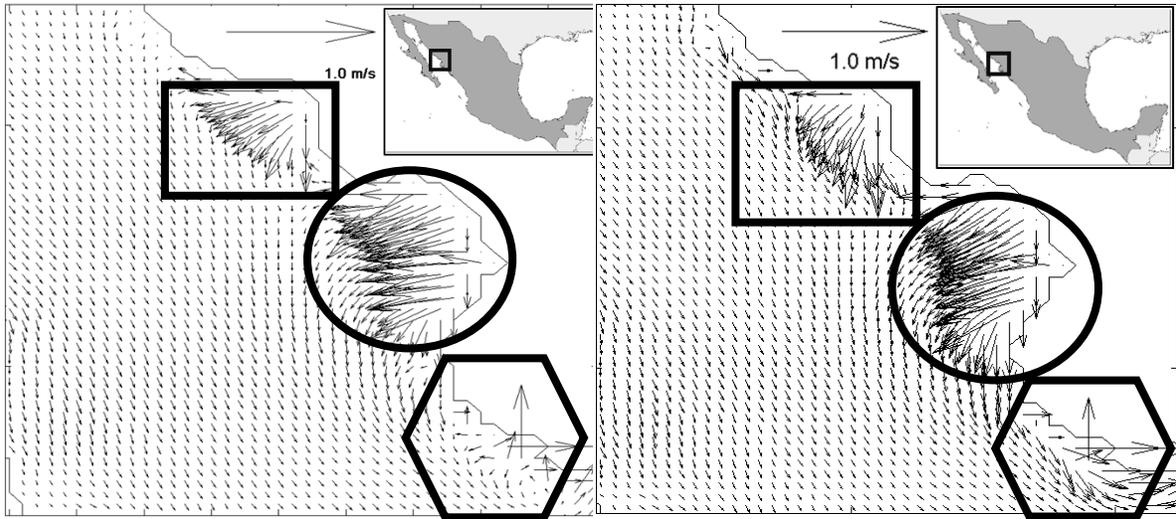


Figura 4.13. Corriente con marea M2 y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha), región de la costa sureste del Golfo.

En esta comparación (figura 4.13), ambas presentan corrientes muy semejantes. En el área cuadrada de la figura de la izquierda, las corrientes salen de la costa en ese instante en dirección suroeste. En la derecha cambia y va hacia el sur. En el área ovalada, la figura derecha tiene velocidades más intensas que su contraparte, con una inclinación más pronunciada hacia el suroeste del golfo. De igual forma, el hexágono, en la segunda imagen, tiene velocidades más intensas que siguen la línea de costa, en comparación con la primera.

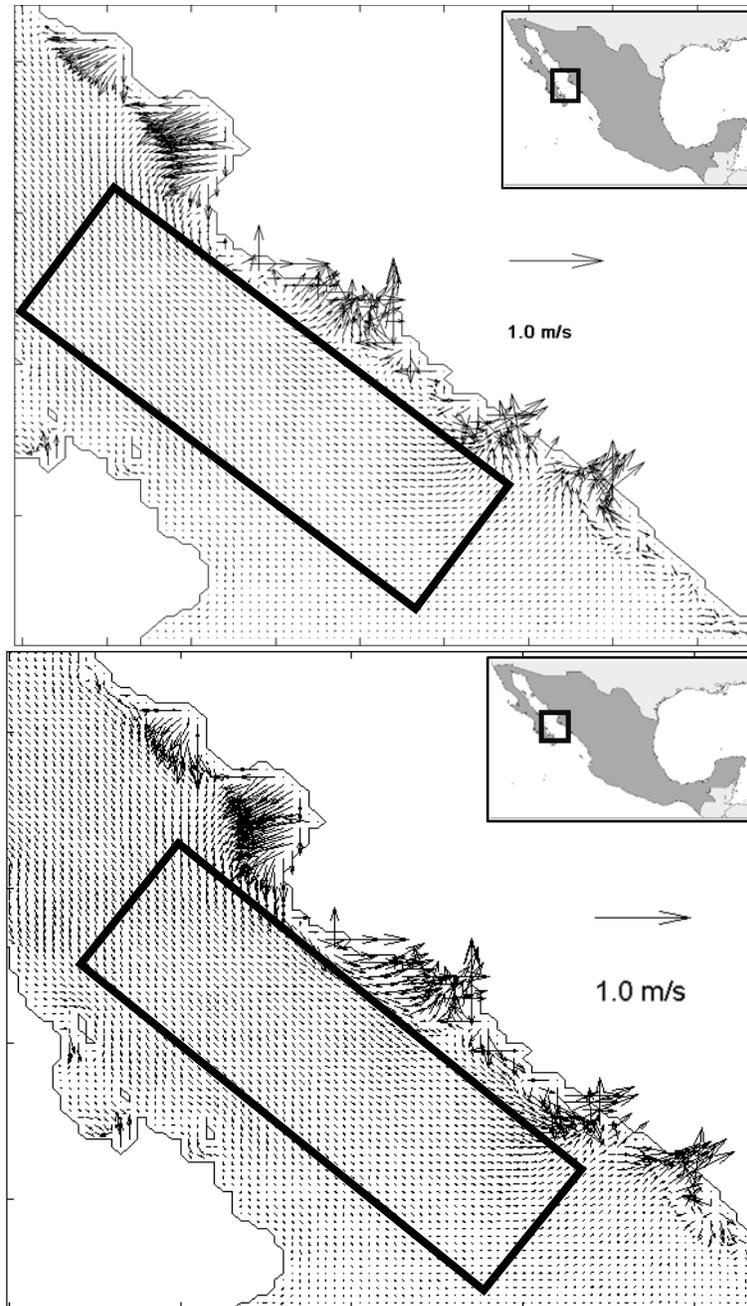


Figura 4.14. Corriente con marea M2 y viento del noroeste (arriba) y sureste (abajo), región, boca del Golfo de California.

La línea costera este del Golfo es la más interesante y ya que la costa oeste presenta una variabilidad menor (figura 4.14). Se puede observar el contraste entre la homogeneidad en el área del rectángulo y las corrientes que están orientadas hacia la costa pero con una cierta variabilidad en el caso de la marea M2 con vientos

del noroeste y del sureste. Esto da una muy buena idea de lo distinto que son las corrientes a lo largo de la costa este del Golfo de California.

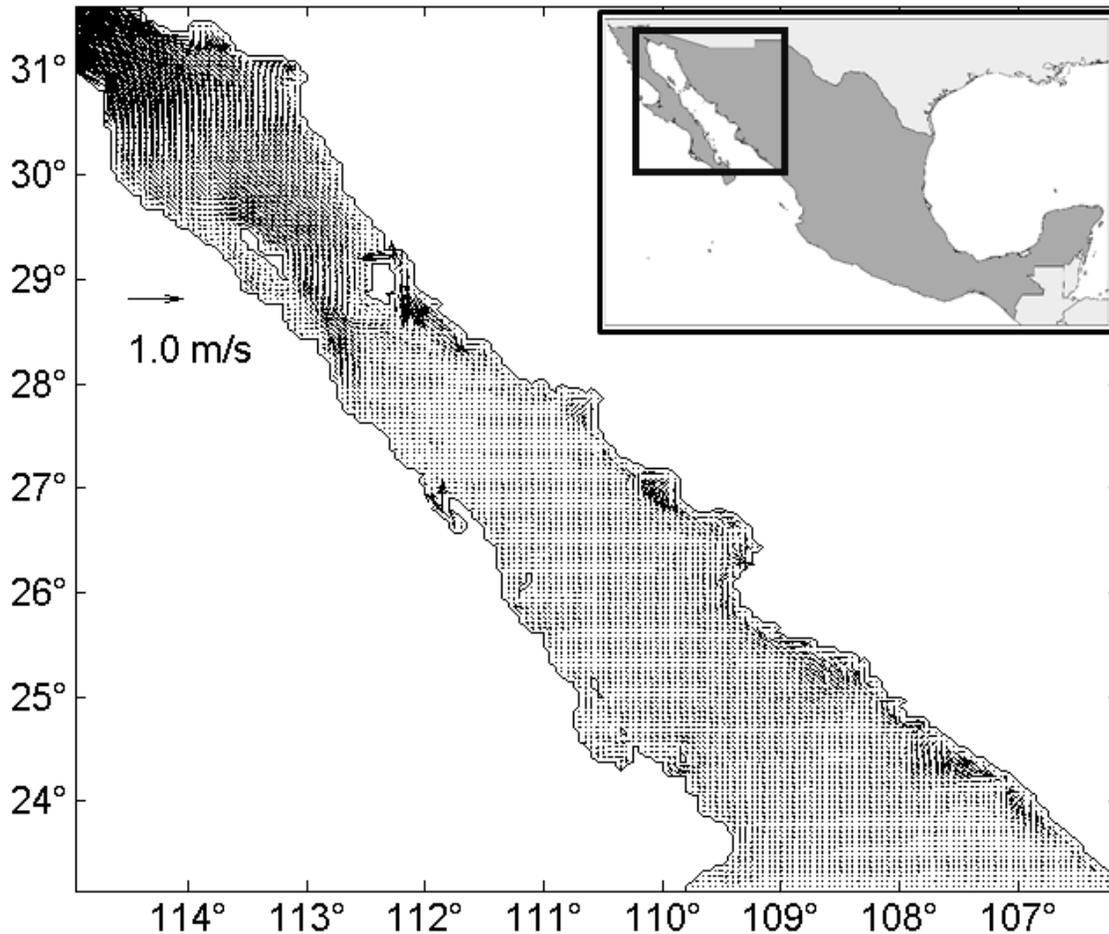


Figura 4.15. Imagen general del Golfo con la marea M2 a 300 iteraciones y viento del noroeste (29.1 horas a partir de que se corre el modelo).

En la figura 4.15 que muestra la corriente instantánea en todo el Golfo de California a un tiempo en que la dirección de la corriente es hacia el norte. En el delta del Río Colorado en el extremo norte del golfo, en el canal del Infiernillo y en el umbral de Salsipuedes las corrientes son muy intensas. En particular, la parte norte del golfo y la zona costera se distinguen por tener corrientes intensas.

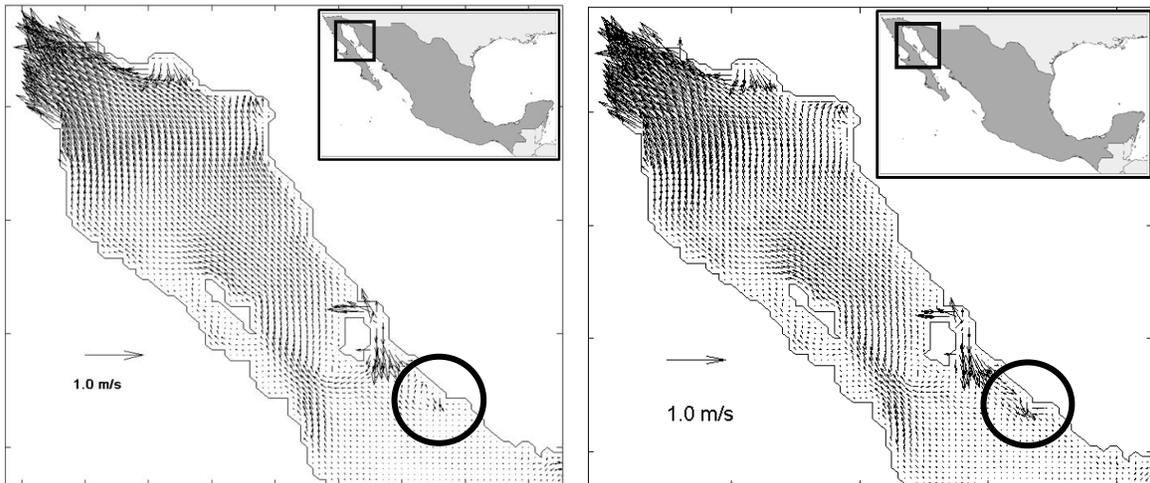


Figura 4.16. Norte y zona del archipiélago del Golfo de California con la marea M2 a 300 iteraciones y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha) a 29.1 horas a partir de que se corre el modelo.

En la figura 4.16, se puede observar que las direcciones de corriente son muy similares en los dos casos presentados. Las corrientes se dirigen en dirección norte, la figura que presenta menos intensidad es la izquierda puesto que corrientes de marea y viento están en sentido contrario, esto indica que el viento aquí funciona como freno para las corrientes. El lugar donde más se refleja este efecto de diferencia de intensidad es el área circular, donde claramente se ve una gran diferencia.

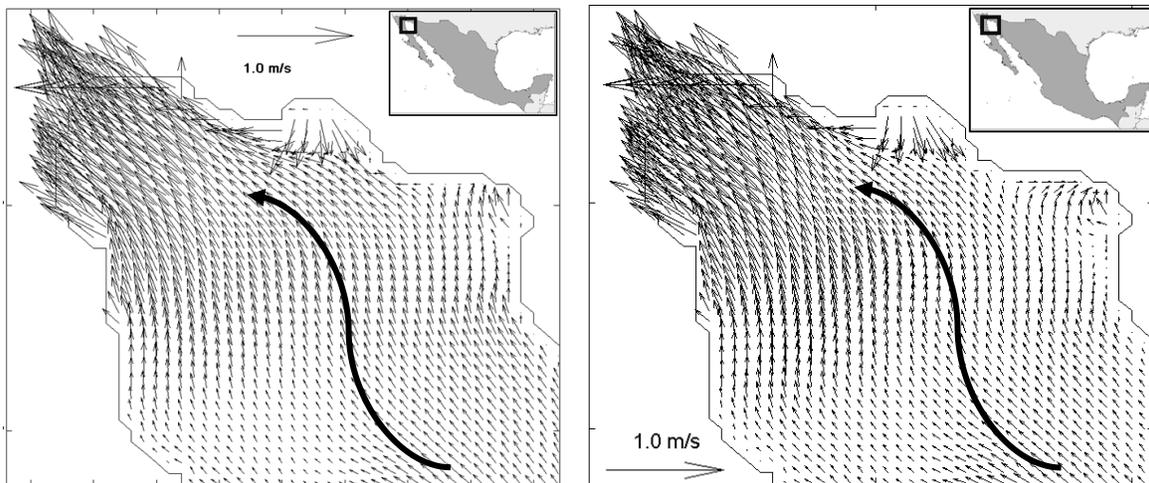


Figura 4.17. Norte y zona del archipiélago del Golfo de California con la marea M2 a 300 iteraciones y viento del noroeste (izquierda) y sureste (derecha).

En la parte norte del Golfo de California las corrientes de marea son muy intensas por lo que el efecto del viento es menos notable. En la figura 4.17, se puede ver que, salvo en las regiones costeras muy someras donde hay diferencias, en toda la parte norte el flujo es muy similar. En la figura se indica una posible trayectoria con una distribución del flujo muy parecida en ambos casos. Otro aspecto de interés, es el hecho de que el flujo converge en el delta del Río Colorado y esto conduce a una intensificación muy notable.

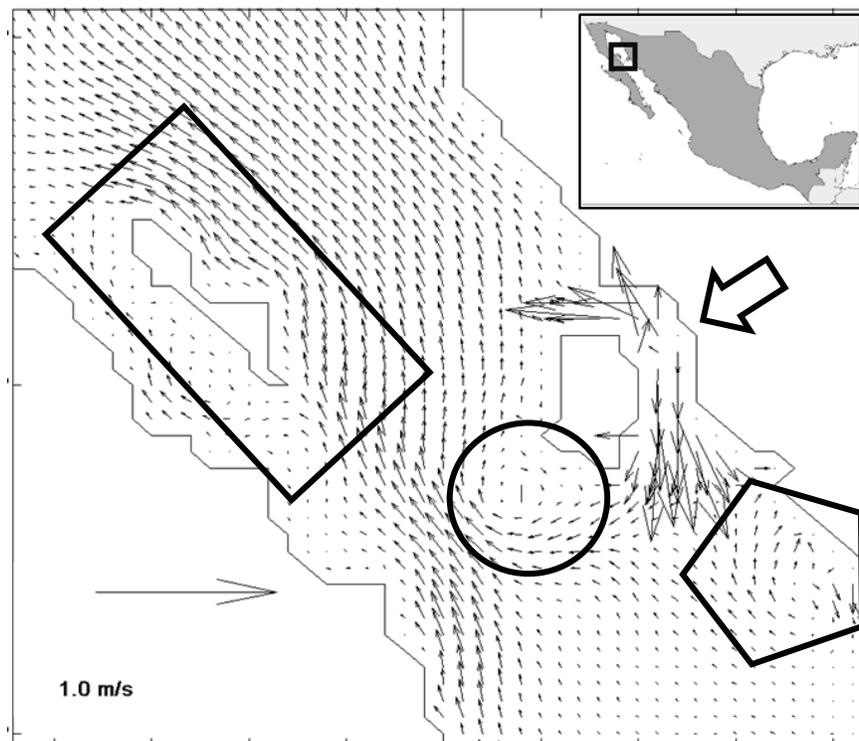


Figura 4.18. Norte y zona del archipiélago del Golfo de California con la marea M2 a 300 iteraciones y viento del noroeste.

El flujo causado por la marea M2 y viento del noroeste en la región del archipiélago revela también una gran variabilidad en la intensidad de las corrientes a este instante de tiempo (figura 4.18). En el canal del Infiernillo se observa incluso una

divergencia con fuertes flujos hacia el norte y hacia el sur. Al suroeste de isla Tiburón se distingue un remolino anticiclónico (círculo) y otro remolino también anticiclónico en la zona del pentágono. En el canal de Ballenas el flujo en la parte este de la isla Ángel de la Guarda es intenso mientras que en la parte oeste es débil.

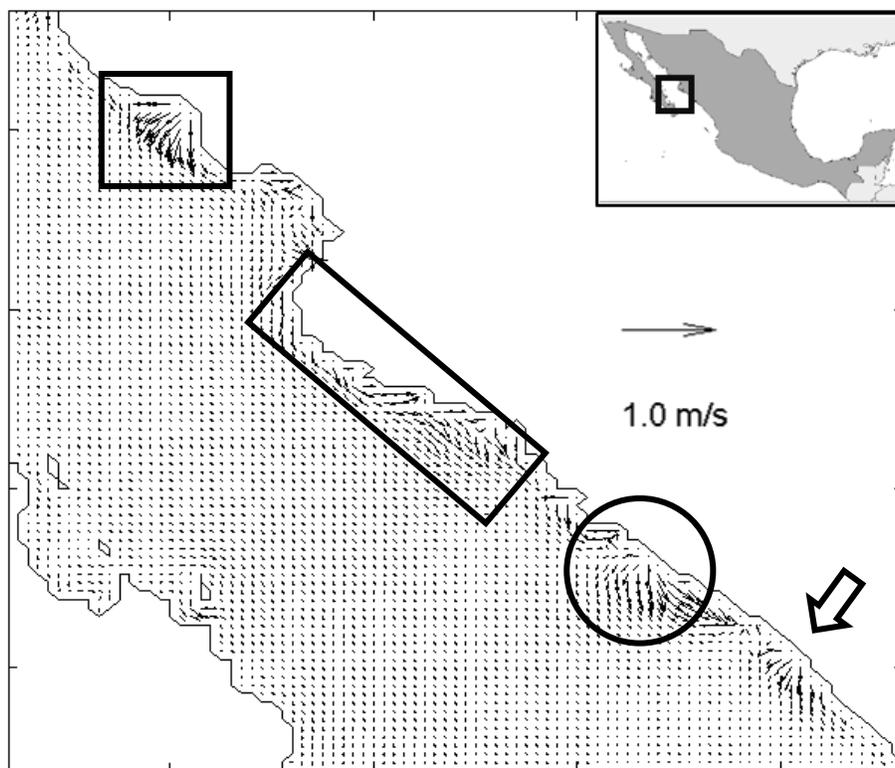


Figura 4.19. Zona este del Golfo de California con la marea M2 a 300 iteraciones y viento del sureste.

En la figura 4.19 se observa el flujo de la marea M2 con viento del sureste en la region costera del lado este del Golfo de California. Se distinguen básicamente zonas con flujo de la costa hacia el mar abierto, estas áreas pueden considerarse como zonas de divergencia con agua alejándose de la costa en este instante de

tiempo. Este efecto puede tener como consecuencia un leve descenso temporal del nivel mar.

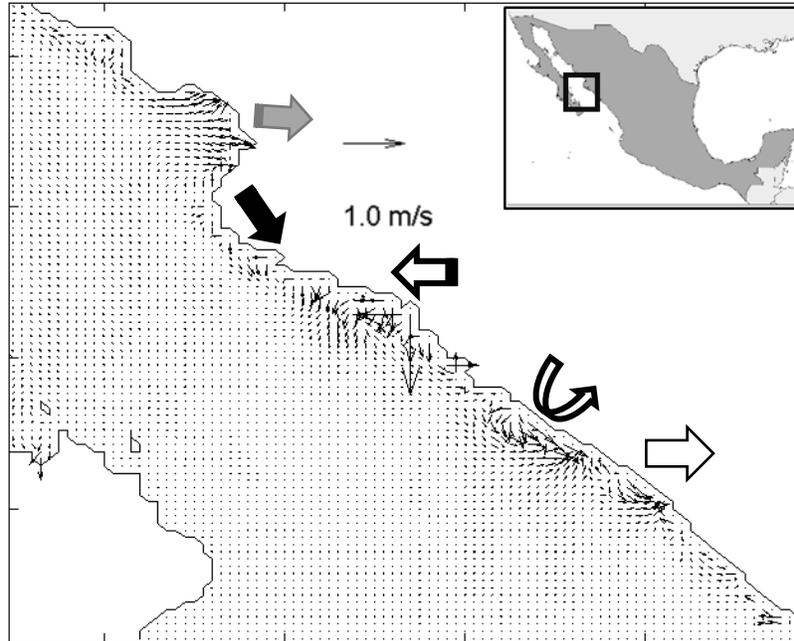


Figura 4.20. Imagen de la costa este, cerca de la boca del Golfo, con viento de noroeste (arriba) y del sureste (abajo), con la marea M2 a 400 iteraciones y viento del noroeste (77.6 horas a partir de que se corre el modelo).

La combinación de corrientes de marea y corrientes inducidas por el viento pueden inducir una gran variabilidad de las corrientes en zonas costera tanto en intensidad como en dirección. En la figura 4.20 se observa la diversidad en intensidad y en dirección de las corrientes en la costa este del Golfo de California. Las flechas indican la dirección de las corrientes que pueden conducir a zonas de convergencia. Se observa también en las dos zonas de intenso flujo ubicadas más al sur que el flujo es semicircular insinuando un tipo de circulación parecido a ondas atrapadas, aunque en este cálculo no es el caso.

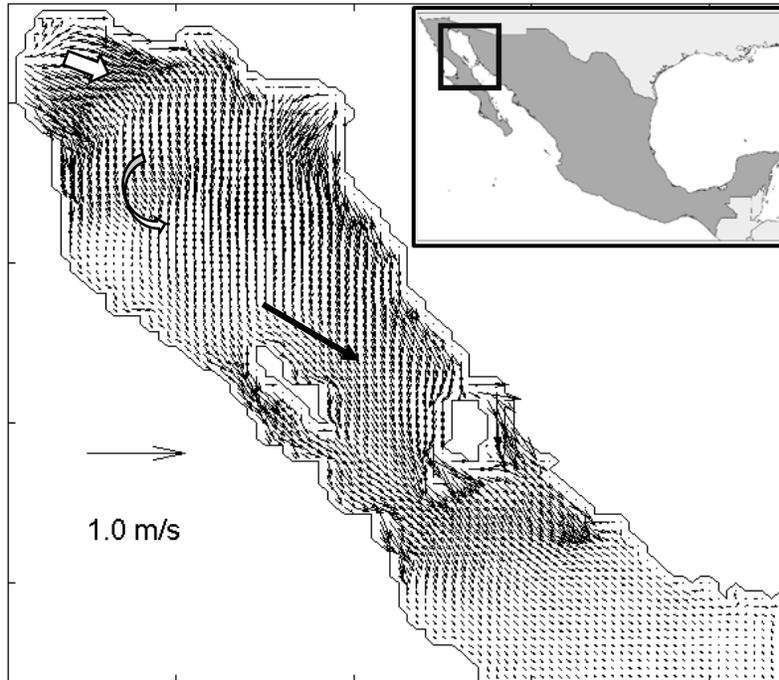


Figura 4.21. La parte norte y archipiélago del golfo, con viento de noroeste y con la marea M2 a 500 iteraciones y viento del noroeste (97 horas a partir de que se corre el modelo).

En la figura 4.21 se distinguen varias zonas con flujo muy intenso a este instante de tiempo. En el delta del Río Colorado, en las bahías de Adair y San Jorge, en los canales de Ballenas e Infiernillo, en el umbral de Salsipuedes y al sur de isla Tiburón. También a lo largo de la costa este se observan velocidades relativamente fuertes. Es importante señalar la diferencia de intensidades de las corrientes entre la parte norte del golfo y la región al sur del archipiélago. En la gráfica se indican algunos cambios de dirección y la dirección de los vectores velocidad en la parte central.

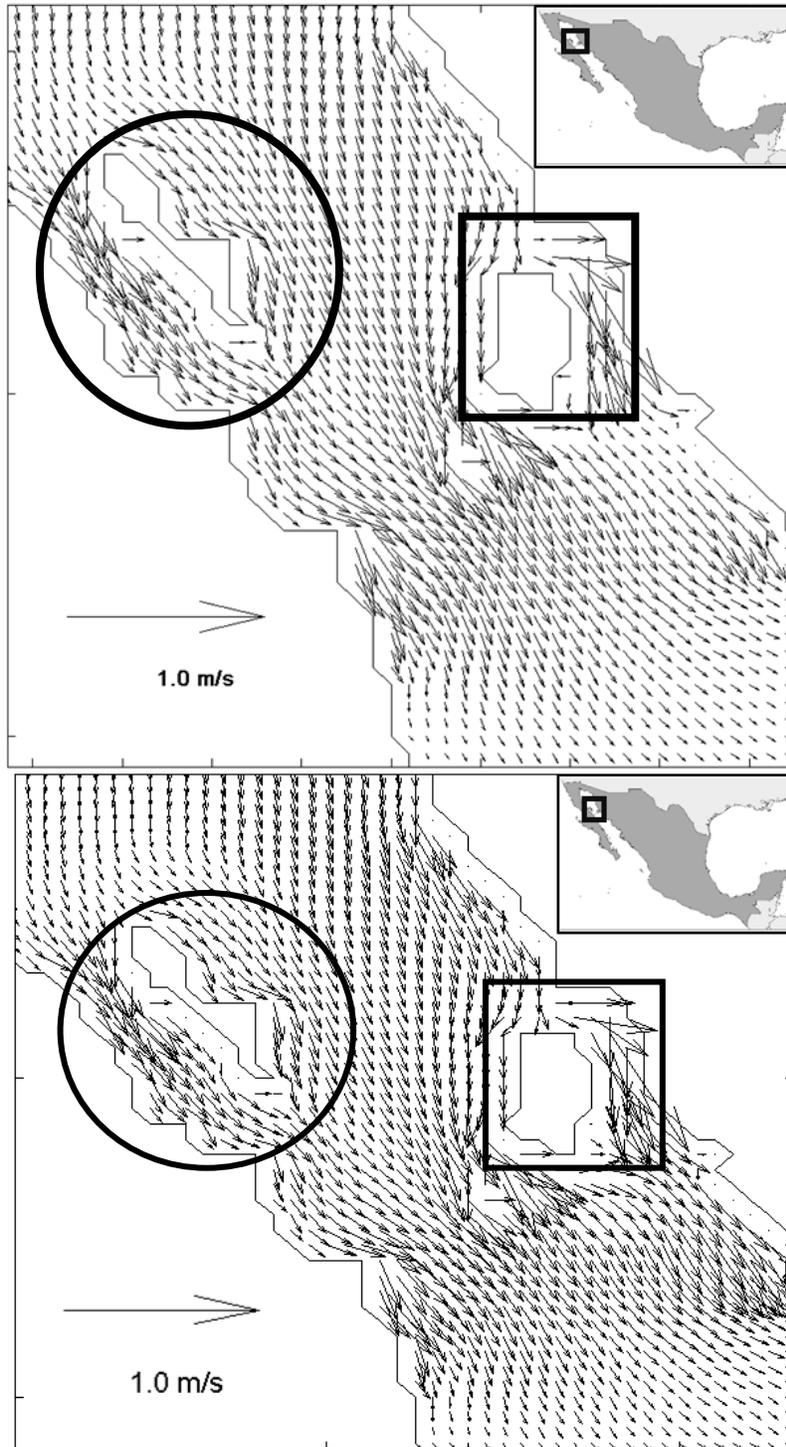


Figura 4.22. Zona del archipiélago, con viento de noroeste (arriba) y del sureste (abajo), con la marea M2 a 500 iteraciones (97 horas a partir de que se corre el modelo).

En la figura 4.22 se presenta un acercamiento de las corrientes de marea asociadas con vientos del noroeste y vientos del sureste. Se puede apreciar que en ambas islas las corrientes las rodean en su totalidad, con el flujo dirigido en dirección sureste. Este efecto puede conducir a una rectificación de las corrientes por las islas, fenómeno que será analizado en otro capítulo. Estas intensidades de las corrientes en áreas como el canal del Infiernillo y en el canal de Ballenas pueden tener consecuencias como flujos turbulentos y mezcla vertical de aguas, también pueden producir perturbaciones dinámicas en el interior y producir ondas internas. En zonas someras como el canal del Infiernillo, estas corrientes pueden producir un fuerte transporte de sedimentos y causar perturbaciones en el fondo marino denominados bancos de arena u ondas de arena. El modelo desarrollado y aplicado en diferentes situaciones da información notable acerca de la dinámica en el Golfo de California. Es importante señalar que en todos estos experimentos numéricos se aplicó sólo la marea lunar principal M2 y vientos del noroeste y sureste. En lo sucesivo, para el estudio de las trayectorias lagrangianas se aplicarán las componentes de marea M2, S2, N2, K2, O1, K1 y P1.

CAPÍTULO 5

Trayectorias Lagrangianas

Las trayectorias Lagrangianas representan el camino que sigue un fluido a medida que se mueve. Las trayectorias lagrangianas indican el camino seguido por una parcela de agua en el complejo proceso oscilatorio de las mareas. Las trayectorias lagrangianas indican el camino que seguiría un objeto flotante a la deriva, por ejemplo una boya. Durante un ciclo de una componente de marea como la M2, idealmente una parcela de agua regresaría a su punto de partida. En realidad, por efectos de fricción y una topografía variable la parcela de agua termina el ciclo temporal a una cierta distancia (pequeña normalmente) del punto de partida. Si esta distancia se divide entre el periodo de la marea se tendría el valor de la corriente residual en ese punto, denominada de Euler. Si el proceso se hace para todos los puntos del dominio considerado, se obtiene el patrón de la corriente residual. Adicionalmente, si el proceso se hace para muchos ciclos de marea y se le da seguimiento a la posición de una parcela o partícula de agua, es decir el pequeño avance en cada ciclo, se obtiene la trayectoria lagrangiana. Este proceso puede hacerse para varias componentes de marea y calcular las trayectorias. El proceso de cálculo de trayectorias lagrangianas se aplica en problemas físicos y dinámicos que tienen que ver con el transporte y la dispersión de sustancias, como en las ciencias atmosféricas para identificar rutas para el transporte atmosférico al calcular las trayectorias de las parcelas de aire a medida que se mueven en la atmósfera (Bowman *et al*, 2013) y en oceanografía para seguir la trayectoria de partículas, estas pueden ser contaminantes, larvas de peces entre otras sustancias de interés.

Las trayectorias Lagrangianas no se limitan solo al área de las Geociencias, se usan en diversos estudios para diferentes campos de las ciencias, por ejemplos para simular la dispersión de nucleido radioactivo para determinar la dispersión atmosférica y por ejemplo, la emisión radiactiva en la planta de Fukushima (Stohl *et al*, 2012).

Para modelar las trayectorias Lagrangianas, se aplicó un método de interpolación bilineal simple en una malla Arakawa C (figura 5.1), las mallas Arakawa se introdujeron por primera vez en Arakawa y Cordero 1977. Se agregó un término adicional que representa una contribución turbulenta a las componentes horizontales de la velocidad u , v . Esta contribución turbulenta se generó con una distribución Gaussiana con una amplitud máxima de 0.01 ms^{-1} .

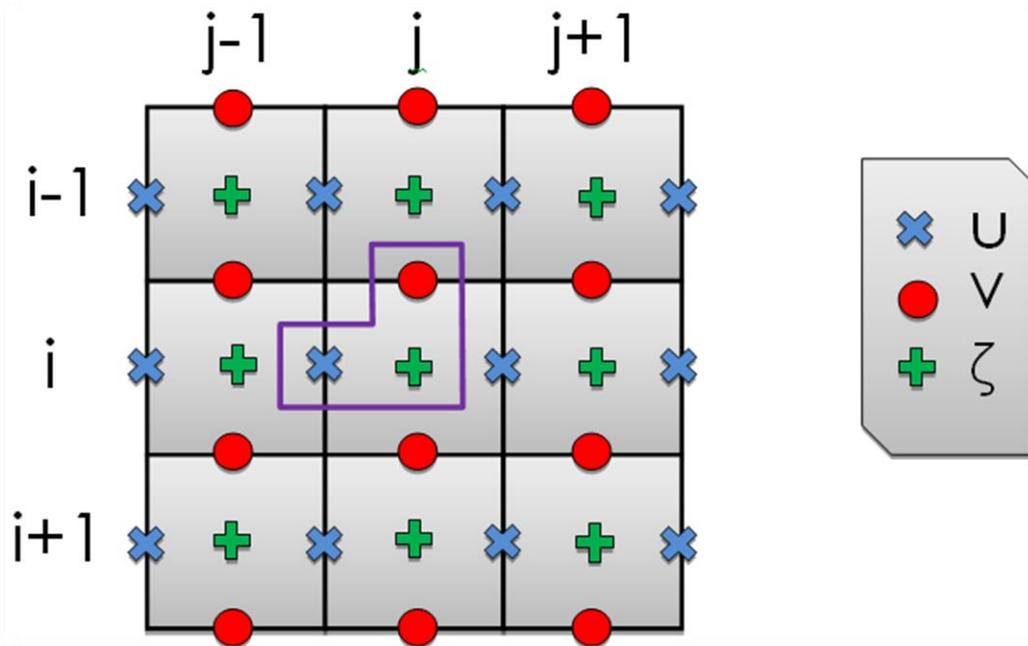


Figura 5.1. Malla Arakawa C, donde la “x” presenta las velocidades en u , el “punto” las velocidades en v , y el signo “+” la presión o elevación del mar, y otras variables como la temperatura y densidad.

El punto medio de cada celda Arakawa C del Golfo de California representa la posición inicial de 10 partículas. Para determinar la posición final de las trayectorias Lagrangianas, los promedios x y y se determinaron para cada grupo de partículas que se inició en cada celda de la malla. Los cálculos se llevaron a cabo para un ciclo de marea viva y marea muerta teniendo en cuenta siete componentes de la marea, que corresponden a las M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1.

Dado que las mareas semidiurnas son dominantes, el período aplicado para el ciclo de mareas de viva-muerta fue de medio mes sinódico, es decir, 14.765 días. El mes sinódico está relacionado con las fases de la luna y tiene aproximadamente 29.53 días. Para calcular la corriente residual Lagrangianas, los desplazamientos netos x e y se dividieron a través del tiempo del ciclo considerado. De esta forma, los componentes de la corriente residual Lagrangiana se obtuvieron para cada punto de la cuadrícula.

5.1 Método de interpolación de velocidad con Montecarlo

Considerando un campo de velocidad $U = U(x, y, t)$. Siendo el campo de velocidades obtenido del modelo numérico hidrodinámico, las velocidades se posicionan en la malla Arakawa C, entonces su forma es la siguiente $U = U(j\Delta x, i\Delta y, n\Delta t)$. La $U = U(u, v)$, Corresponden a las direcciones (x, y) respectivamente.

Para conocer la posición de cada partícula en cualquier punto de la malla (E), Se aplicó una interpolación bilineal. Dado que los datos de velocidad u y v son conocidos en la malla Arakawa C (figura 5.2), el valor de velocidad se promedia en u y v en cada esquina de la celda, con esto se conoce el valor de velocidad promedio en cada esquina de cada celda (figura 5.3) y se le asignan diferentes pesos a cada unidad de área y la posición de la partícula se conoce en cada paso de tiempo.

Los cálculos se realizaron con y sin componente aleatorio en diferentes partes del Golfo con diferentes combinaciones de marea, los experimentos se realizaron para representar el desplazamiento más realista en el Golfo de California.

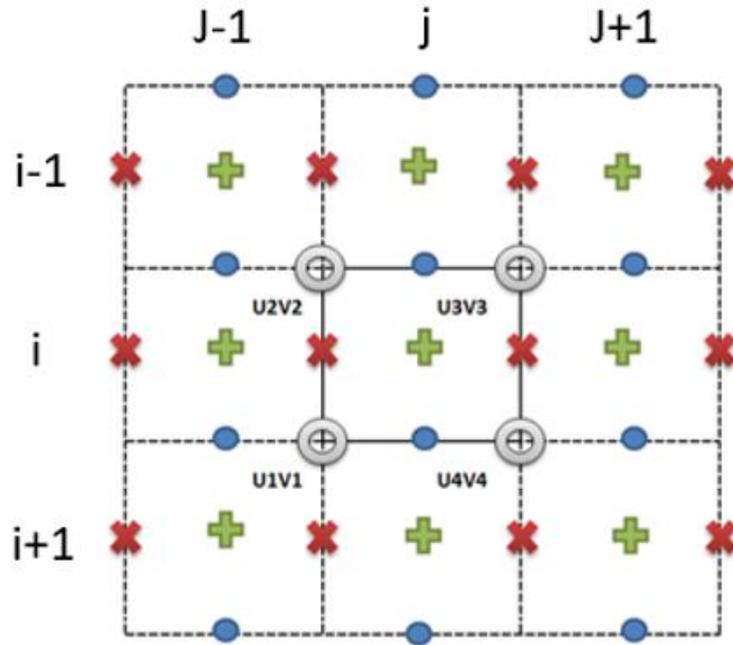


Figura 5.2. Método de interpolación bilinear

El primera paso es interpolar las velocidades u (en las posiciones marcadas con una cruz roja) y las velocidades v (en las posiciones marcadas con un punto azul) a las posiciones de cada esquina en la celda (i, j) . Esto se efectúa de la siguiente manera.

$$U1 = \frac{u(i, j) + u(i + 1, j)}{2.0}$$

$$U2 = \frac{u(i, j) + u(i - 1, j)}{2.0}$$

$$U3 = \frac{u(i, j + 1) + u(i - 1, j + 1)}{2.0}$$

$$U4 = \frac{u(i + 1, j + 1) + u(i, j + 1)}{2.0}$$

$$V1 = \frac{v(i + 1, j - 1) + v(i + 1, j)}{2.0}$$

$$V2 = \frac{v(i,j) + v(i,j-1)}{2.0}$$

$$V3 = \frac{v(i,j) + v(i,j+1)}{2.0}$$

$$V4 = \frac{v(i+1,j+1) + v(i+1,j)}{2.0}$$

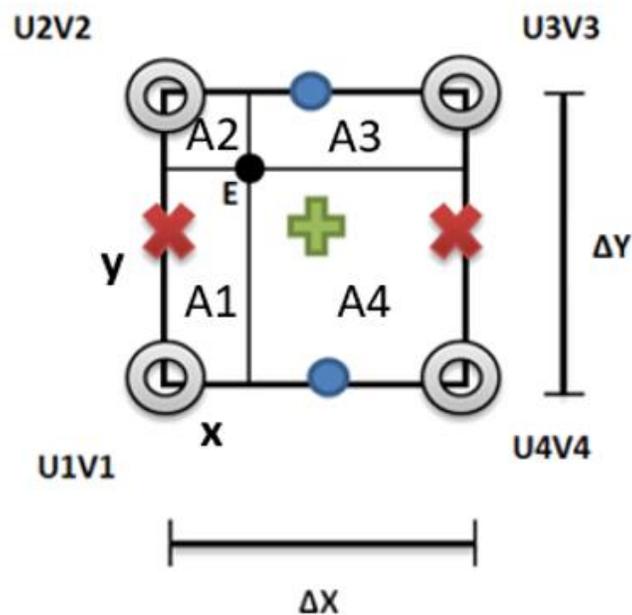


Figura 5.3. Asignación de pesos

A continuación se define en una celda un punto E con coordenadas (x,y) indicando la posición inicial de la partícula. Este punto divide la celda en cuatro áreas definidas como sigue

$$A1 = \frac{X(\Delta y - y)}{AT} \quad A2 = \frac{(x)(\Delta y - y)}{AT} \quad A3 = \frac{(\Delta x - x)(\Delta y - y)}{AT} \quad A4 = \frac{(\Delta x - x)(\Delta y - y)}{AT}$$

Donde el área total se define como $AT = \Delta x \Delta y$. Las áreas A1, A2, A3 y A4 cumplen la condición $A1 + A2 + A3 + A4 = 1$. Con estos pesos las velocidades (u,v) interpoladas al punto E están dadas por

$$u_E = U1A3 + U2A4 + U3A1 + U4A2$$

$$v_E = V1A3 + V2A4 + V3A1 + V4A2$$

Pero la velocidad puede ser expresada en la forma

$$u = \frac{dx}{dt}$$

Integrando esta ecuación se obtiene $x = x_0 + udt$, donde x_0 es la posición inicial.

Por supuesto la velocidad $u = u_E$. Para simular la parte caótica se le agrega una velocidad turbulenta que no es otra cosa que una velocidad multiplicada por números aleatorios N_u, N_v .

$$x = x_0 + udt + N_u u_t \Delta t$$

$$y = y_0 + vdt + N_v v_t \Delta t$$

Con $v = v_E$. Esta sería la forma fundamental de calcular. Claro que al programarlo habría que considerar varias cosas, como que pasa en las costas, si en un tiempo dt se abarcan varias celdas, etc.

Este proceso se repite en cada paso de tiempo de acuerdo a la posición actual de la parcela de agua o partícula y de este modo se va construyendo la trayectoria lagrangiana.

5.2 Trayectorias generadas por la marea M2

La corriente producida por la componente de marea M2 es la más importante en la dinámica de mareas del Golfo de California y su influencia se hace presente siempre en el movimiento. Mientras que el viento puede ser muy fuerte y causar corrientes

muy intensas es intermitente, las mareas por el contrario siempre están presentes en todo el planeta y por supuesto en el Golfo de California. Existen varias zonas en el mundo en que las mareas semi-diurnas son muy intensas, con rangos de marea que rebasan los 13 metros como en la Bahía de Fundy, el Canal de la Mancha y la parte norte del Golfo de California, que es la región tema de este trabajo.

Las siguientes figuras muestran diferentes posiciones, en donde una partícula es soltada usando los datos solamente de la corriente M2, trazando diferentes trayectorias, es importante observar que ninguna de las trayectorias de las partículas es igual a la otra, y si esta se encuentra más lejos de la costa, su desplazamiento es más largo desde su punto inicial a su punto final, de las partículas. La figura 5.4 muestra las trayectorias de partículas que iniciaron en puntos ubicados transversalmente a la parte norte del golfo. Se puede observar que las trayectorias D1, D2, D3 y D4 siguen trayectorias de elipses de una manera perfecta. Estas trayectorias ocurrieron en puntos en lado de la costa oeste del golfo, es decir en el lado de la onda reflejada. Las trayectorias D5, D6 y D7 siguen trayectorias más complicadas lo cual probablemente refleja la influencia de la presencia de bahías en su cercanía. La trayectoria D8 está ubicada dentro de la bahía de San Jorge y es bien comportada.

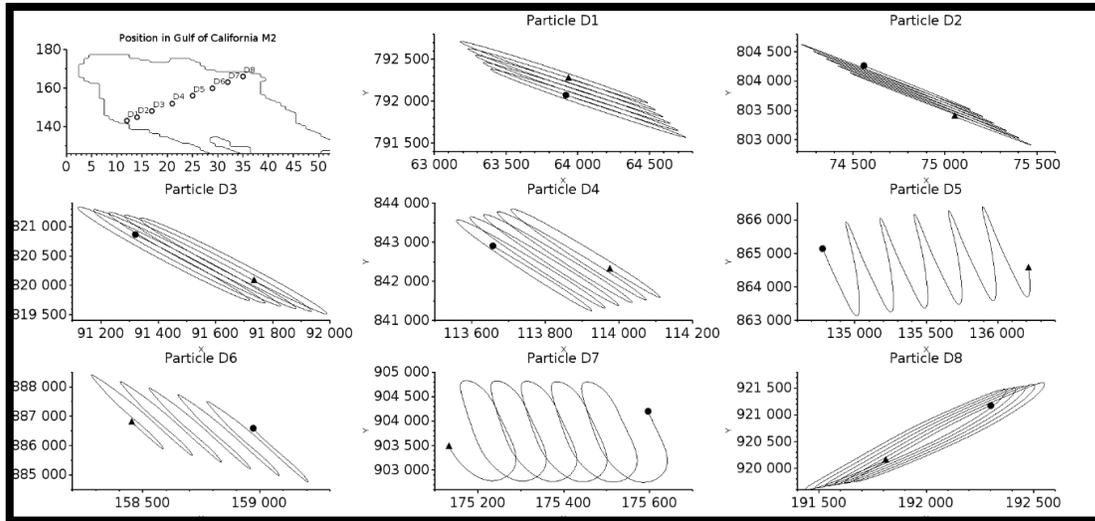


Figura 5.4. Trayectorias generadas por la marea M2, las partículas D1 a D8 fueron posicionadas en forma diagonal, soltadas de forma individual y sin un movimiento aleatorio.

Las partículas de la figura 5.5, fueron puestas en diferentes puntos del golfo, todas cumplen con lo dicho anteriormente, si se encuentran cerca de la costa estas “sienten” la presencia de la costa lo cual se refleja en su trayectoria. No sucede lo mismo con las partículas A, B y C, ya que la dinámica de esa zona, la del delta del río Colorado es muy distinta al de toda la línea costera, allí las corrientes son más grandes e interesantes debido a la dinámica que se crea por la presencia del Delta del río Colorado, mencionado anteriormente. Las trayectorias D y E son complejas como en la figura 5.4. Es interesante la trayectoria de la partícula G que está ubicada a la entrada del canal del Infiernillo, donde la circulación se revela compleja en esa zona y con grandes corrientes residuales.

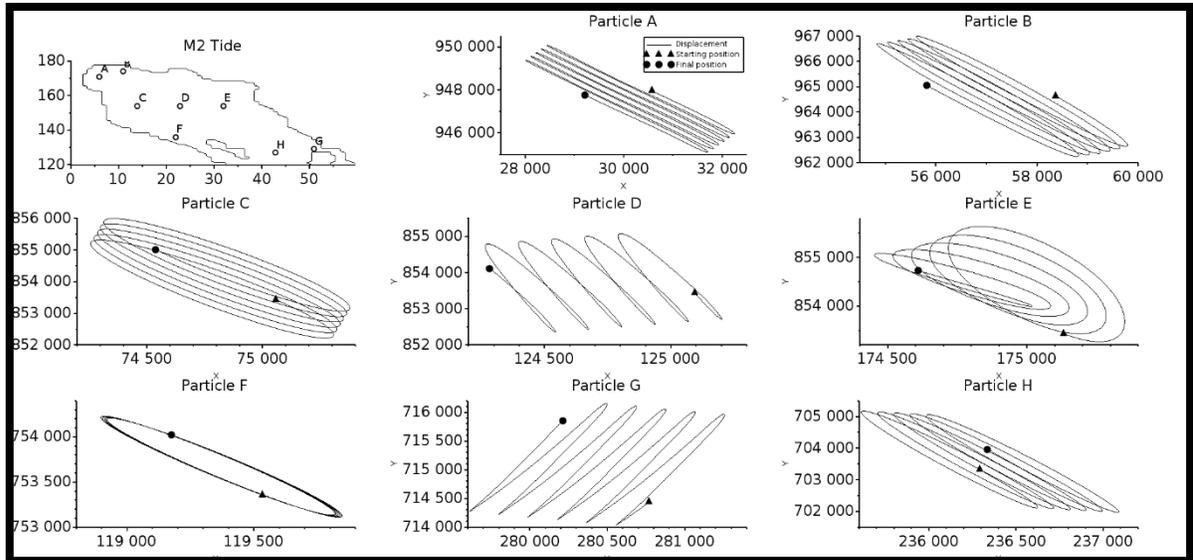


Figura 5.5. Trayectorias generadas por la marea M2, Diferentes puntos en el norte del Golfo.

5.2.1 Trayectorias generadas por la marea M2 en comparación con otras mareas.

Cómo ya se mencionó, la corriente M2 es la más importante y la que más influencia tiene en la dinámica del océano, sin embargo, esta no actúa sola, trabaja en conjunto con las demás, y juntas crean la dinámica en todo el océano.

En las siguientes figuras se compara la trayectoria que siguen dos partículas partiendo del mismo punto, una con la trayectoria de la corriente M2 y otra con una combinación de varias, incluida la M2, en estas partículas no se incluyó un componente aleatorio.

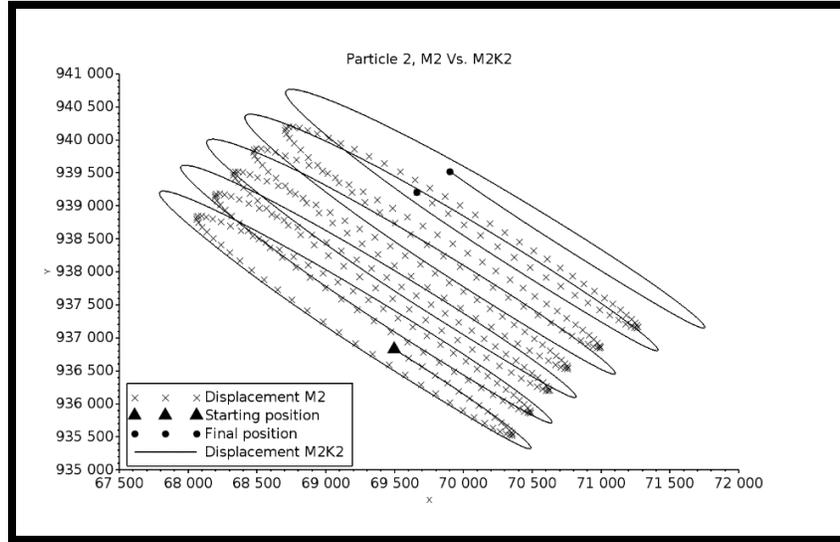


Figura 5.6. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2 y la K2. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.

En esta figura vemos que la combinación de las mareas M2K2 en comparación con la corriente de marea M2 se desplaza más a lo ancho y a lo largo que la M2 y teniendo una corriente residual ligeramente más grande.

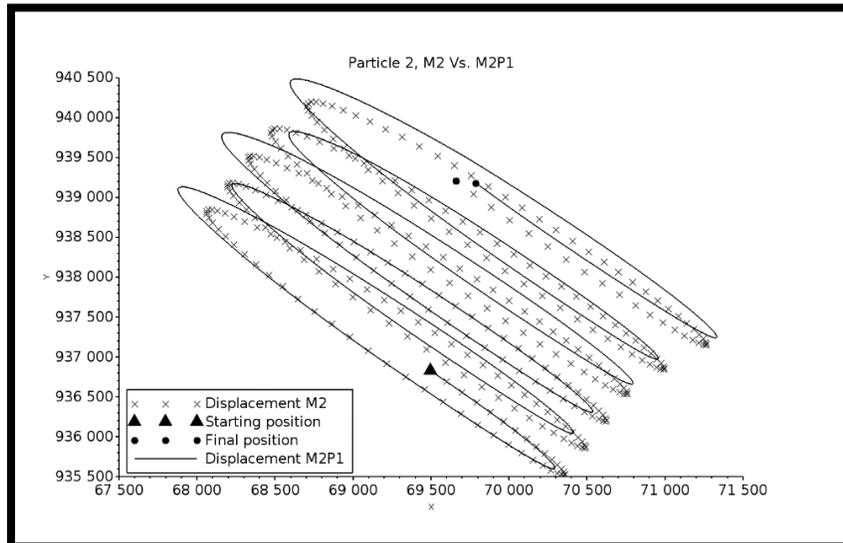


Figura 5.7. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2 y la P1. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición

final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.

En esta figura vemos que la combinación de las mareas M2P1 en comparación con la corriente de marea M2 es muy semejante y puesto que los puntos finales están muy cercanos uno del otro indica que la corriente residual en ambos casos tienen un valor parecido.

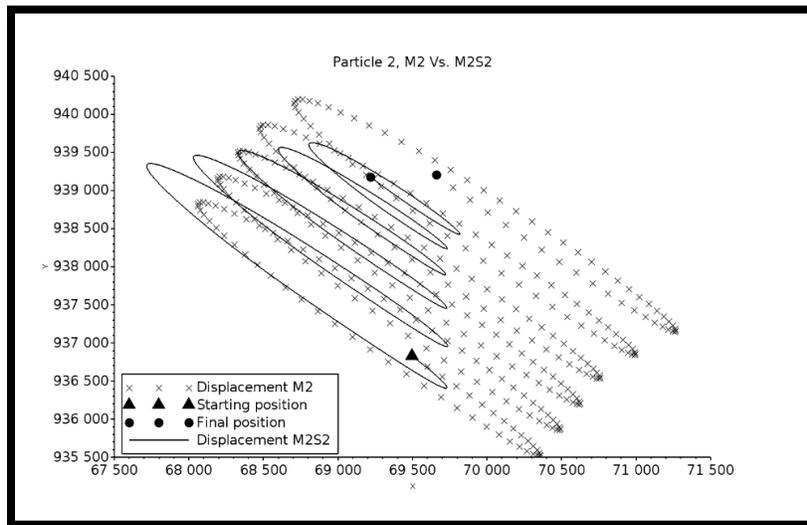


Figura 5.8. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2 y la S2. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.

En esta figura vemos que la combinación de las mareas M2S2 en comparación con la corriente de marea M2 tiene un desplazamiento que tiende a ser más compacto, pero que refleja el efecto de marea viva- marea muerta.

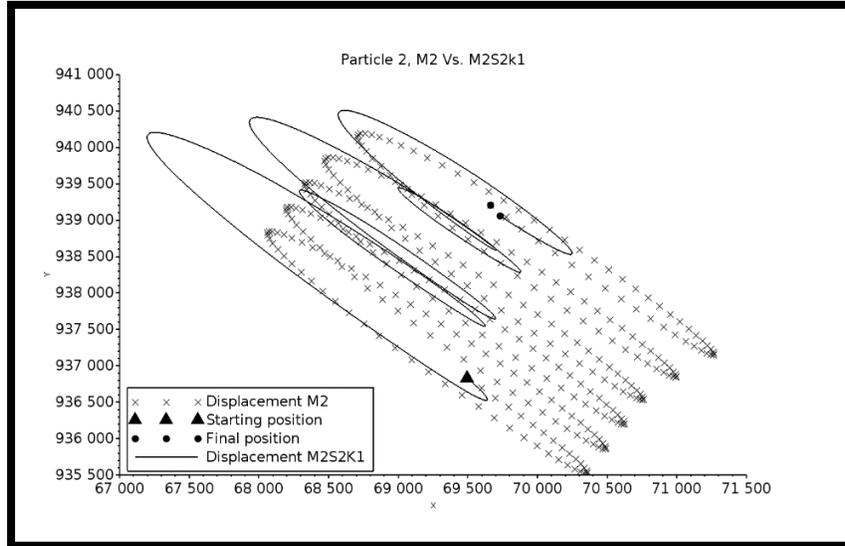


Figura 5.9. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2, la marea S2 y la K1. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.

En esta figura vemos que la combinación de las mareas M2S2K1 en comparación con la corriente de marea M2, tiene un desplazamiento que va variando a lo largo del tiempo, ya no hace giros que se repitan, sin embargo a pesar de los diferentes giros que presenta, quedan casi en la misma posición final.

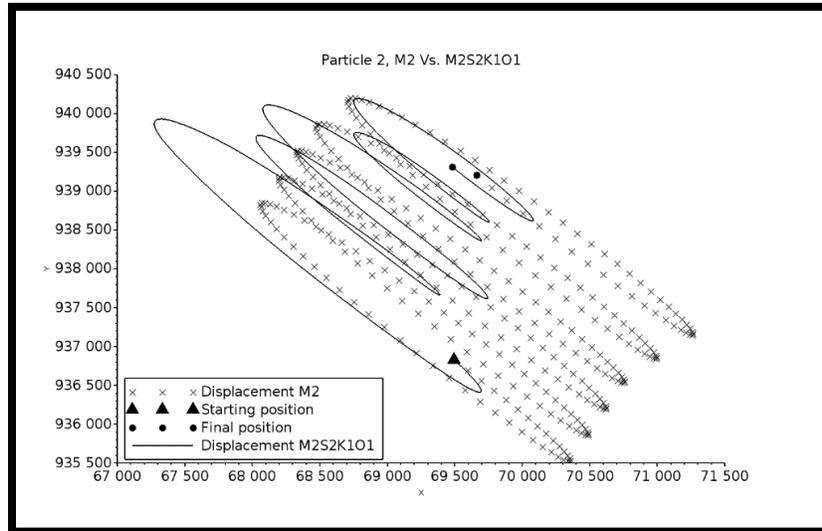


Figura 5.10. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2, la marea S2, marea k1 y la O1. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.

En esta figura vemos que la combinación de las mareas M2S2K1O1 en comparación con la corriente de marea M2, tiene un desplazamiento que va variando a lo largo del tiempo, ya no hace giros que se repitan, como en la anterior figura, sin embargo a pesar de los diferentes giros que presenta, quedan casi en la misma posición final. Esta trayectoria refleja el carácter mixto de las mareas aplicadas.

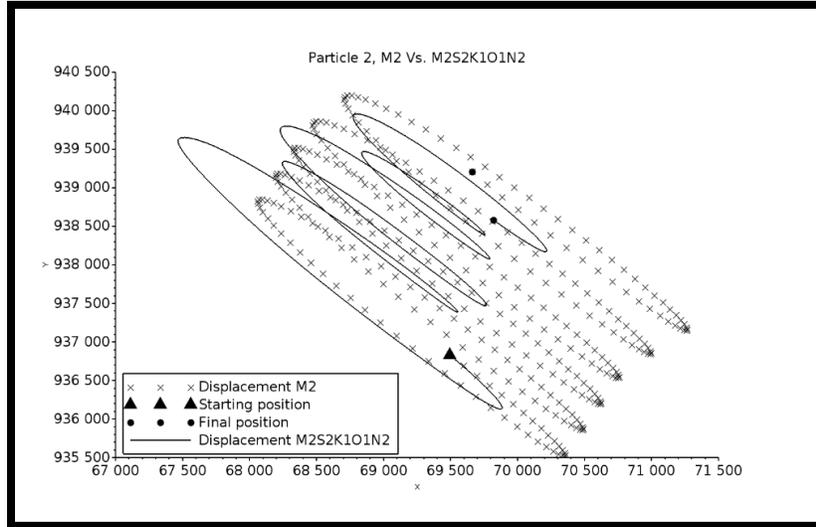


Figura 5.11. Desplazamiento de la M2 contra la combinación de la M2, la marea S2, marea k1, la O1 y la N. Donde el triángulo representa el punto de partida de ambas, y el punto, la posición final, el desplazamiento de la M2 es representado por x y el de la M2K2 con una línea.

En esta figura vemos que la combinación de las mareas M2S2K1O1N2 en comparación con la corriente de marea M2, tiene un desplazamiento que va variando a lo largo del tiempo, ya no hace giros que se repitan, cada vez es más complejo el desplazamiento comparado solo con la N2, la combinación hace que en algunos momentos, la fuerza frene más, sin embargo a pesar de los diferentes giros que presenta, no quedan muy alejadas una de la otra. Igualmente el comportamiento refleja el carácter mixto de las mareas M2S2K1O1N2.

5.3 Trayectorias generadas por 7 mareas

Ya se vio como es el desplazamiento de la corriente de Marea M2 de una partícula sin componente aleatorio y la comparación de esta misma agregando otras mareas, las siguientes figuras, muestran en diferentes puntos del Golfo de California, el

comportamiento de una partícula en la misma posición, pero con diferentes combinaciones de marea, con la M2, presente en cada una de ellas.

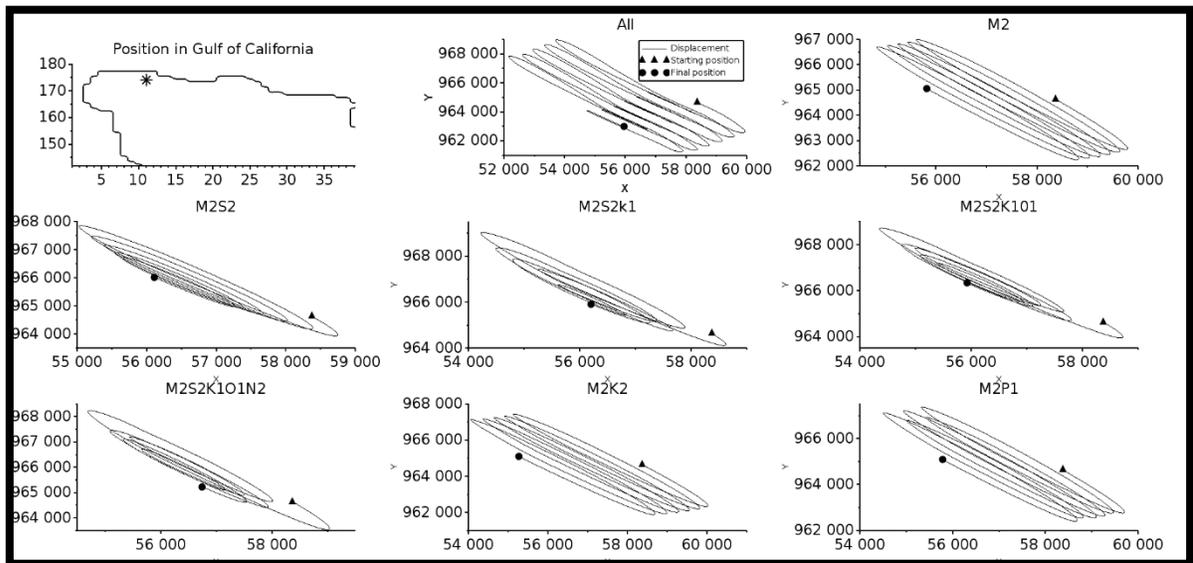


Figura 5.12. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto cercano al delta del río Colorado, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

En un punto ubicado en la parte norte del Golfo de California, las diferentes combinaciones de mareas causan trayectorias muy distintas pero hay combinaciones que modifican radicalmente las trayectorias como la combinación M2S2K1 (figura 5.12).

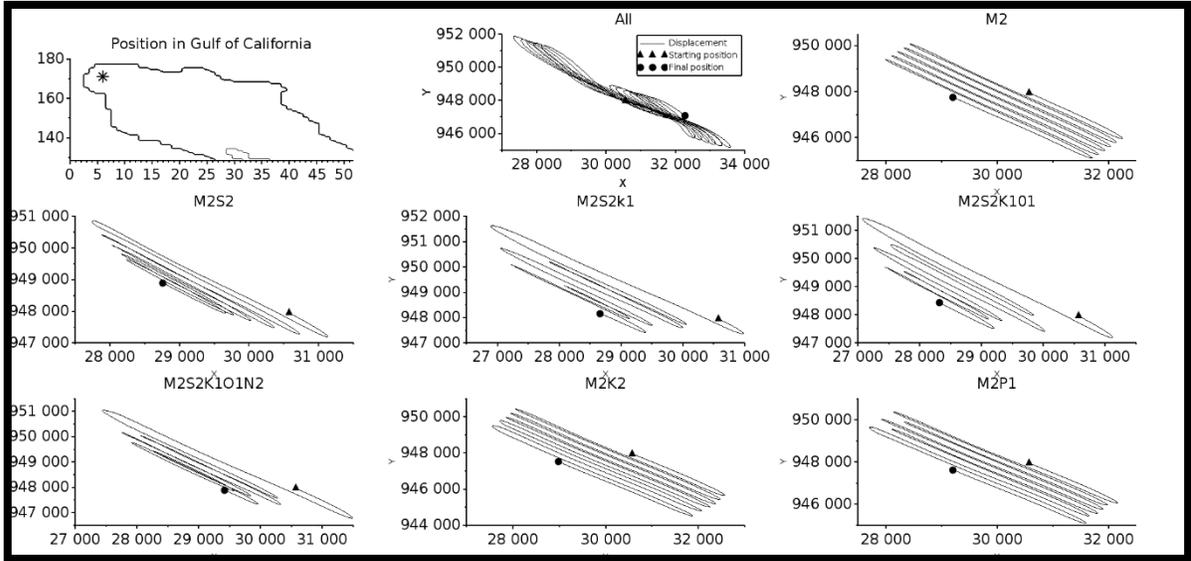


Figura 5.13. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en otro punto cercano al delta del río Colorado, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

Es interesante observar que para este punto, ubicado en el delta del Río Colorado (figura 5.13), ciertas combinaciones de marea producen trayectorias con elipses muy bien formadas y otras combinaciones causan trayectorias muy complejas para la misma posición. Para esta posición parece que la combinación de una semi-diurna como la M2 y la diurna K1 producen trayectorias bastantes complejas y corrientes residuales grandes.

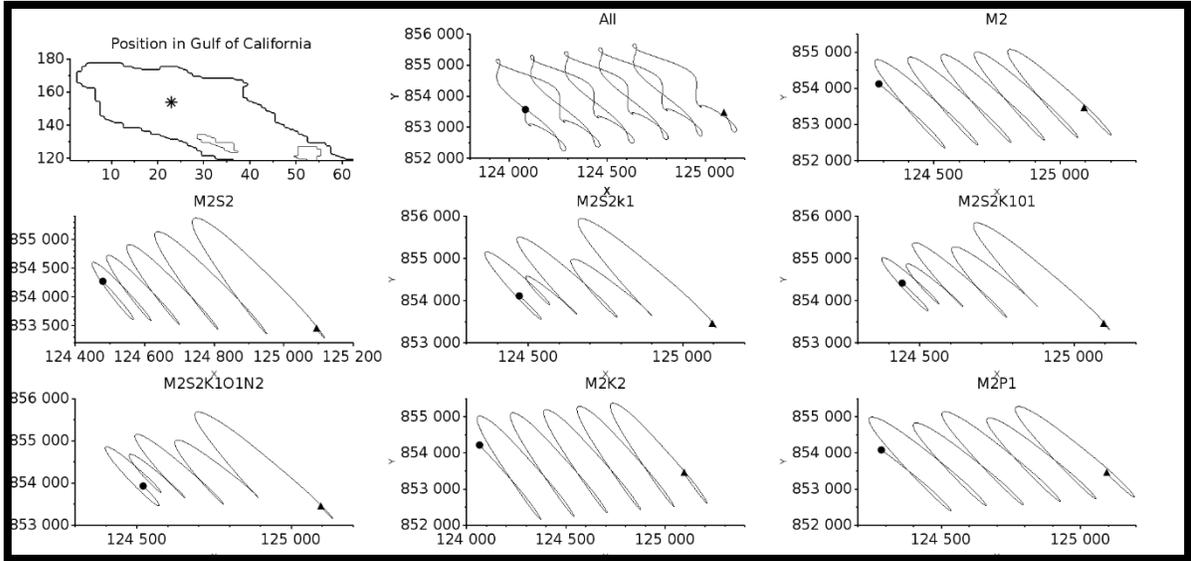


Figura 5.14. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto en el centro del norte del Golfo, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

Para un punto de partida en la parte central del golfo, todas las combinaciones producen trayectorias complejas y corrientes residuales relativamente intensas (figura 5.14). Pero la más compleja es considerando a las siete mareas M2, S2, K2, N2, O1, K1, P1.

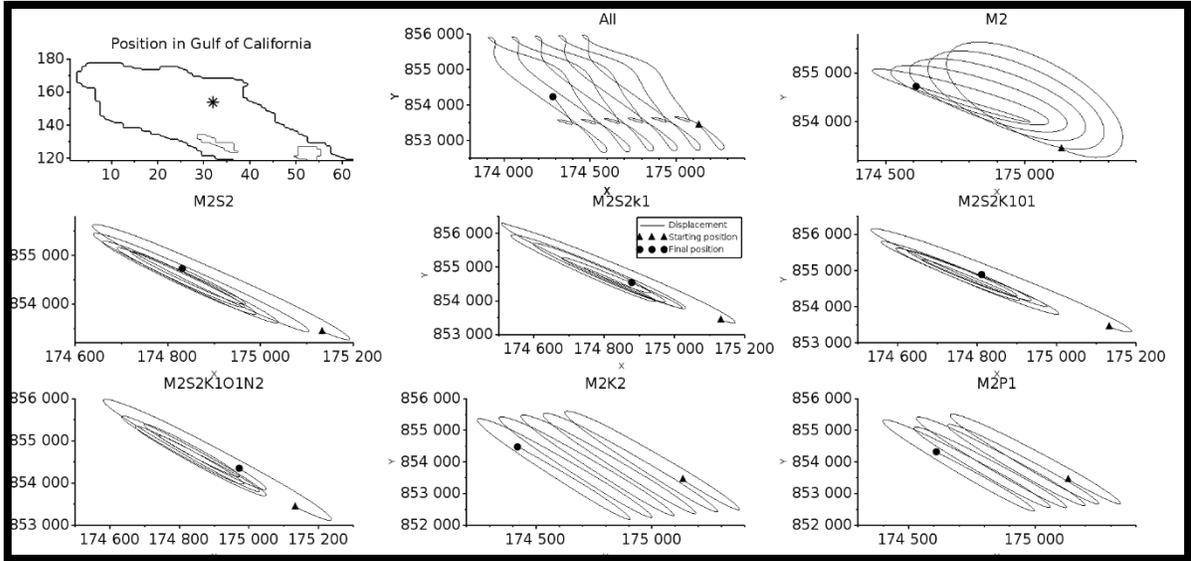


Figura 5.15. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto cercano al centro del Golfo pero cercano a la costa este del Golfo de California, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

Para el punto de partida mostrado en la figura 5.15, la trayectoria más compleja es cuando se consideran todas las componentes de marea.

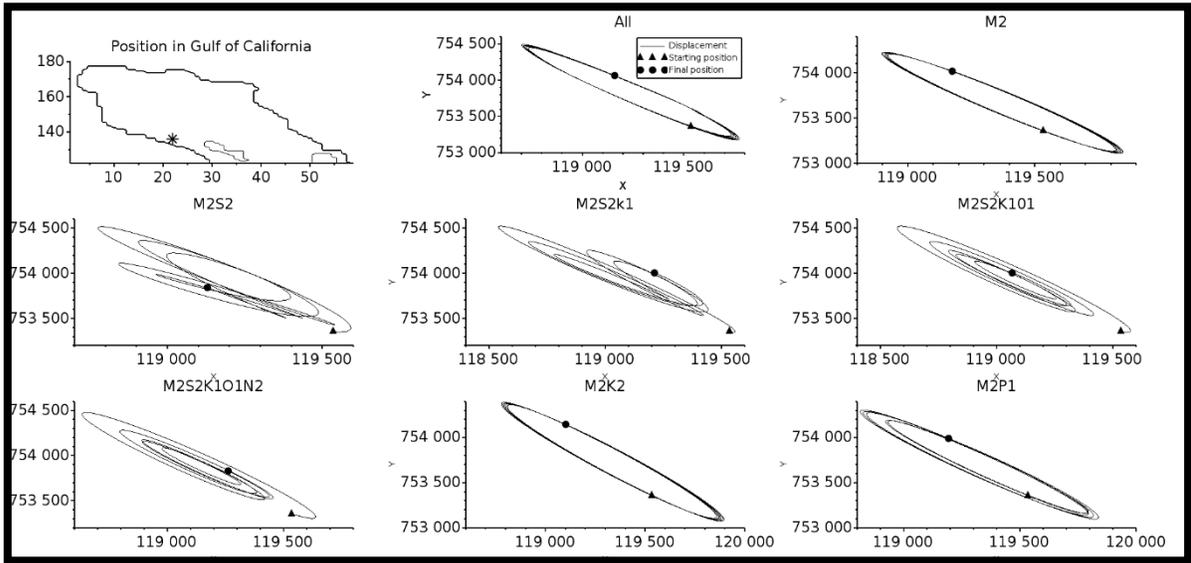


Figura 5.16. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto muy cercano a la costa oeste del Golfo de California, el inicio es

representado por el triángulo y al final con un círculo. Debido a lo inmediato que se encuentra de la costa, el movimiento es en su mayoría ovalado.

En un punto cercano a la costa oeste del Golfo de California (figura 5.16), la combinación de las mareas M2 y S2 da la trayectoria más compleja. Es interesante observar que cuando se consideran las siete componentes de marea la partícula describe prácticamente elipses perfectas.

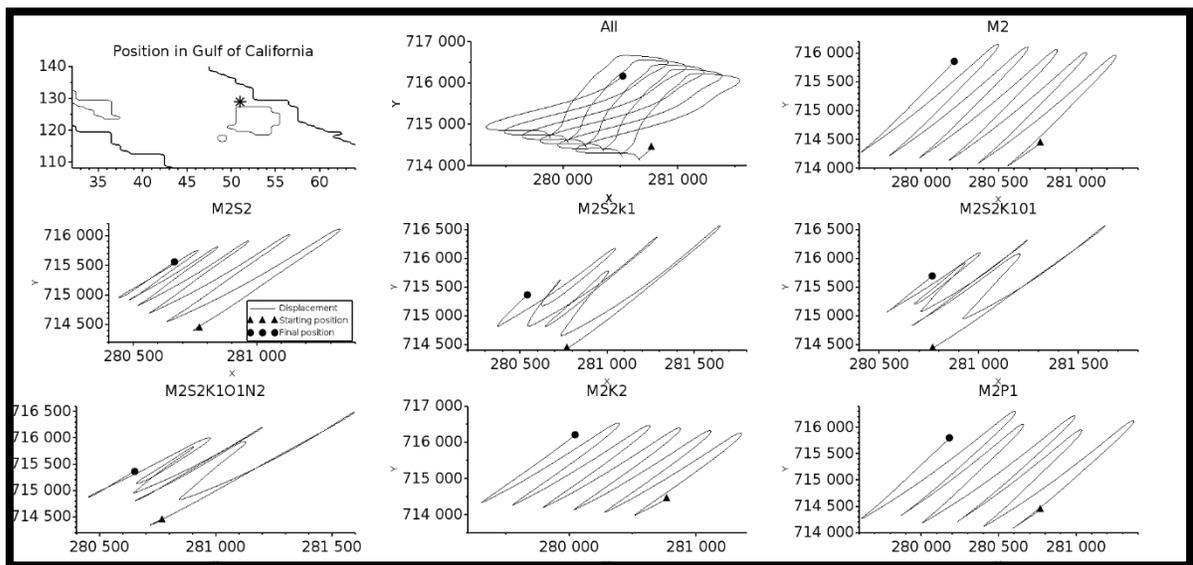


Figura 5.17. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto cercano al delta del río Colorado.

En un punto cercano al canal del Infiernillo (figura 5.17), la combinación de las mareas semi-diurnas M2 y S2 combinadas con una diurna dan como resultado trayectorias muy complejas. Esta complejidad puede ser el resultado de la influencia geométrica de las costas en los alrededores de este punto. El inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo, muy cercano a la entrada de canal el Infiernillo, donde las corrientes en general siempre muestran mucha intensidad debido a lo angosto del canal.

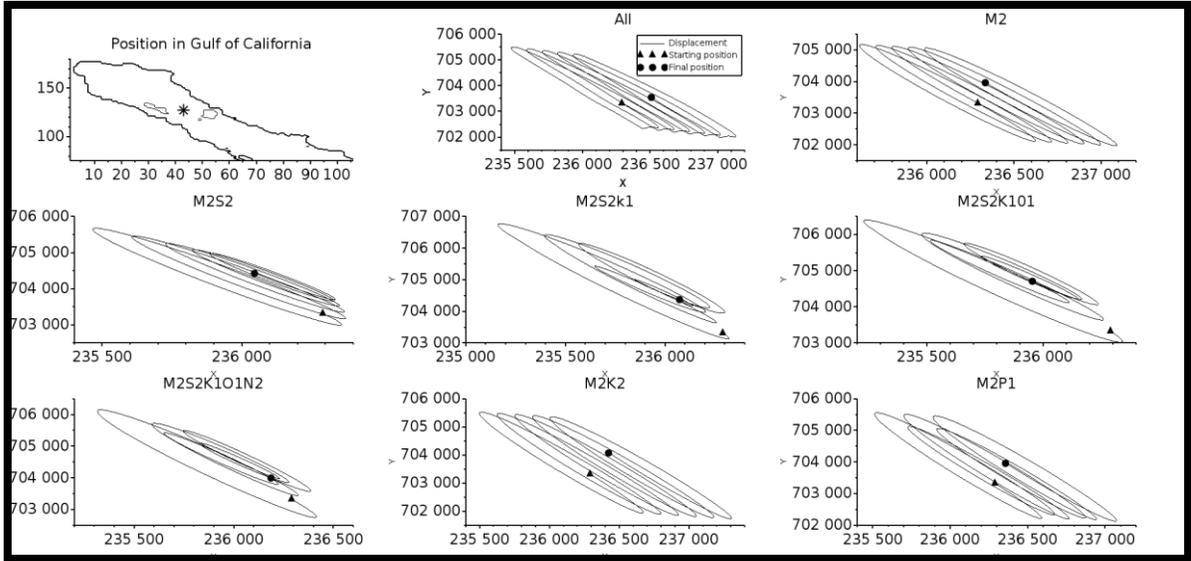


Figura 5.18. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto en el centro del archipiélago, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

La posición inicial está ubicada en el archipiélago, concretamente entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón (figura 5.18). Las trayectorias tienen un comportamiento sencillo en todos los casos.

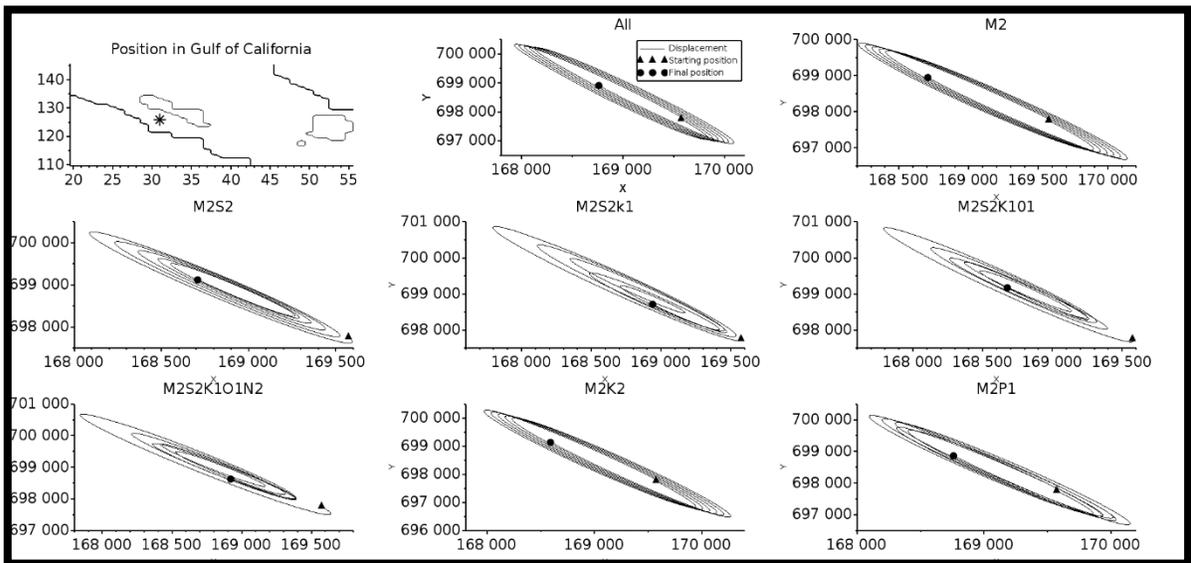


Figura 5.19. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto en el centro canal de ballenas.

En este punto, ubicado en el canal de Ballenas, las trayectorias tienden a ser de excentricidad pequeña debido a lo estrecho del canal (figura 5.19), pero las corrientes residuales si muestran una importante variabilidad. El inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo. Es interesante ya que está justo en medio del canal de ballenas entre Isla Ángel de la Guarda y la costa oeste del Golfo, la presencia de las dos costas se hace sentir provocando un movimiento que impide la libertad de acción de la partícula.

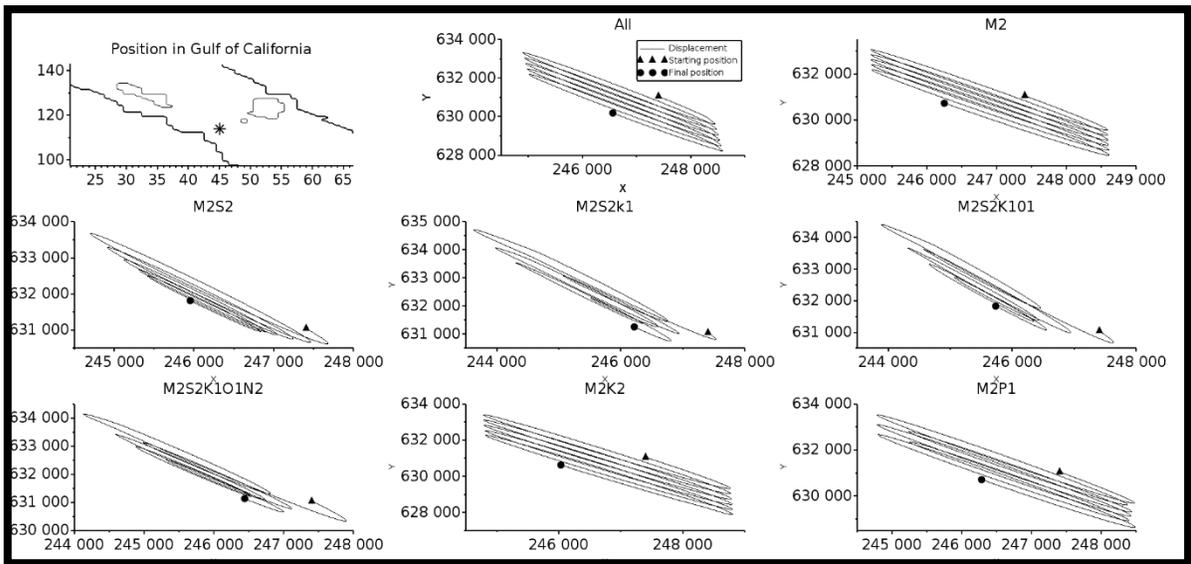


Figura 5.20. Combinación de diferentes componentes de marea y de la corriente M2 en un punto en la entrada sur del archipiélago, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

Este punto está ubicado en el umbral de Salsipuedes, en la transición de profundidades típicas de plataforma continental a profundidades de más de 3000 m en la parte sur del golfo. La combinación de mareas semi-diurnas con diurnas produce en esta posición una cierta complejidad en las trayectorias.

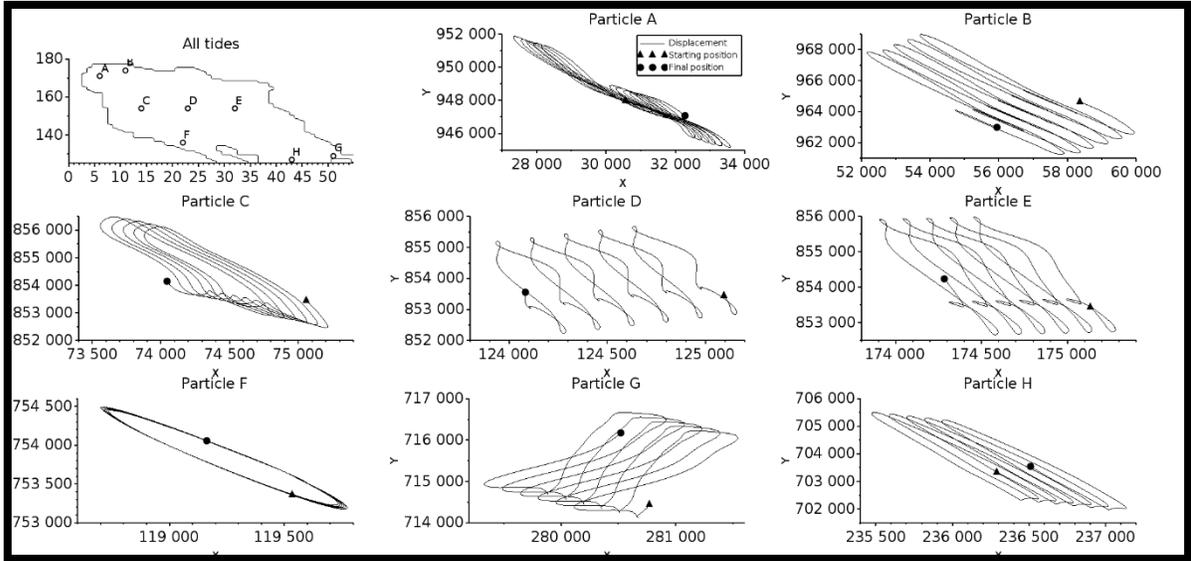


Figura 5.21. Combinación de todos componentes de marea en diferentes partes del Golfo, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

Aquí se puede observar cual es la trayectoria que siguen las partículas, sin componente aleatorio, pero con la combinación de todas las componentes de marea M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1. Se observa que en el punto F, localizado en las cercanías de la costa oeste del golfo la trayectoria traza elipses perfectas de pequeña excentricidad. Lo mismo ocurre en el punto H en la parte central del archipiélago. En todos los demás puntos las trayectorias son bastante complejas.

5.3.1 Trayectorias generadas por 7 mareas sin componente aleatorio, con viento y sin viento.

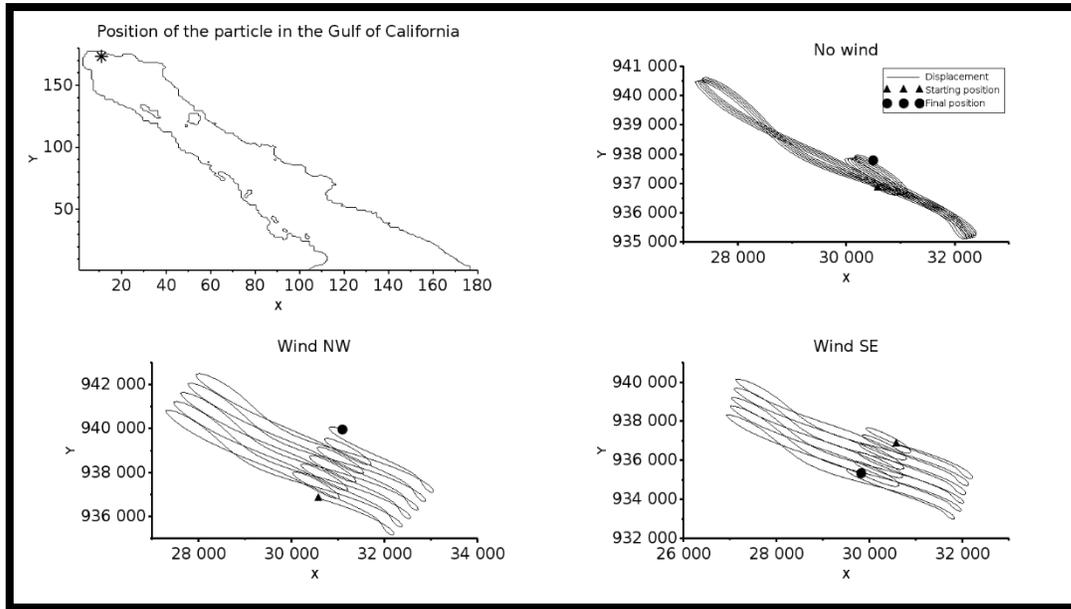


Figura 5.22. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo ubicado a la parte norte del Golfo cercano a la costa de Sonora, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

Sin viento, y componente aleatorio vemos que la partícula se comporta de forma muy particular, repitiendo los ciclos, en presencia de viento, el final de la partícula cambia dependiendo de donde se origine en viento. Por lo que vemos que en condiciones ideales, la presencia de viento si influye hacia donde termina el movimiento de la partícula, es decir, modifica la corriente residual.

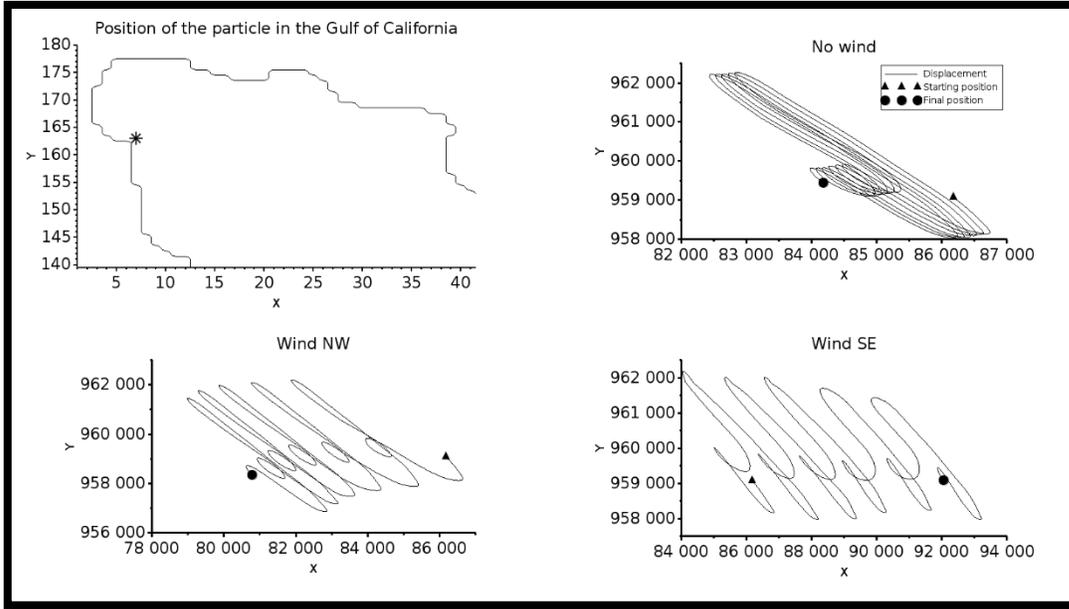


Figura 5.23. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo ubicado a la parte norte del Golfo cercano a la costa de Baja California Norte, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

En la figura 5.23 y 5.24, se observa que la acción del viento es separar las trayectorias, pero la trayectoria en si no se modifica notablemente. El efecto de la advección de agua y la compleja oscilación de las mareas se distingue en una mayor corriente residual. El hecho de aplicar varias mareas se refleja en lo complicado de las trayectorias resultantes. Estas trayectorias no se pueden intuir en una simple representación vectorial de los campos de velocidad.

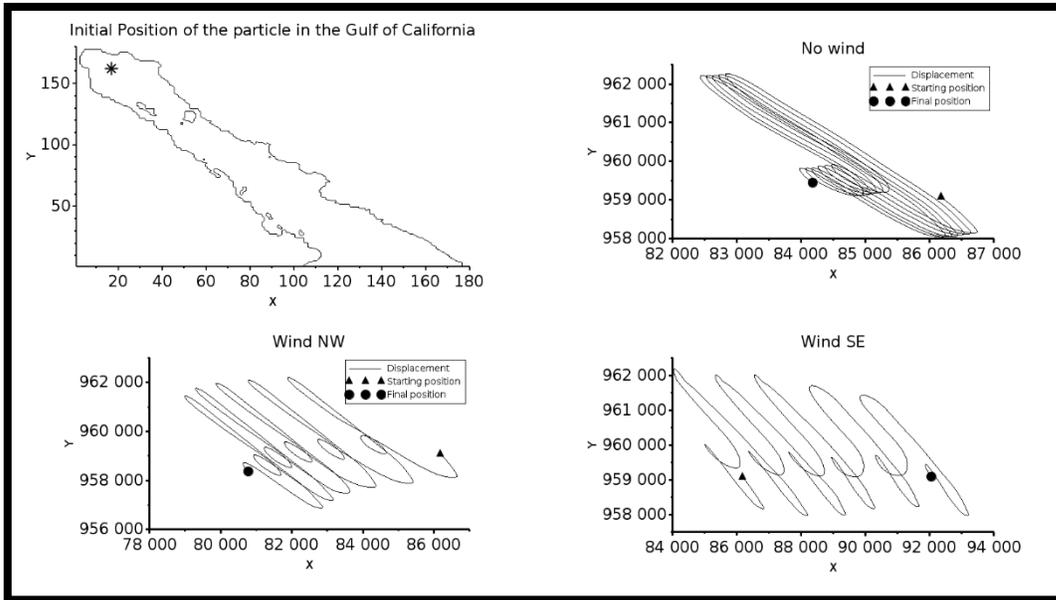


Figura 5.24. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo ubicado a la parte norte del Golfo al centro, del Golfo, entre Baja California Norte y la costa de Sonora, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

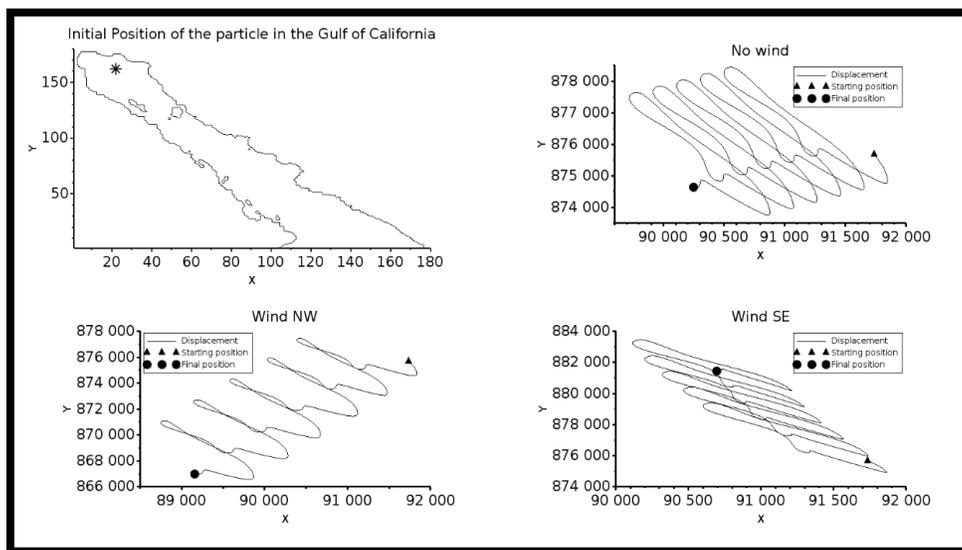


Figura 5.25. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo ubicado a la parte norte del Golfo al centro, del Golfo, entre Baja California Norte y la costa de Sonora, un poco más al sur que en la figura anterior, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

En la figura 5.25 se observan igualmente trayectorias muy complejas en donde la acción con viento del noroeste separa fuertemente las trayectorias sin modificar sustancialmente las trayectorias originales sin viento. Por el contrario, el caso con viento del sureste refleja que las trayectorias tienden a comprimirse con una corriente residual menor.

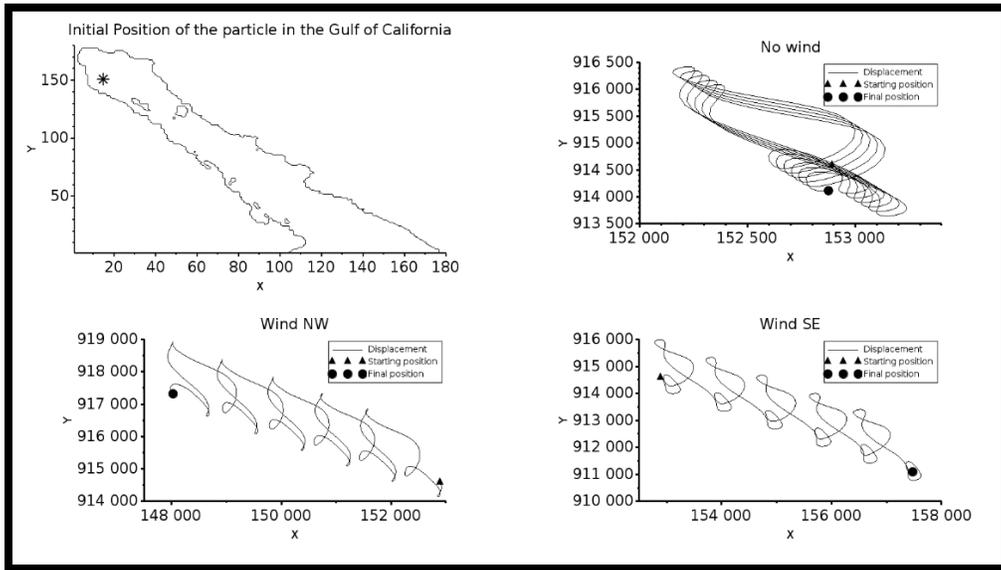


Figura 5.26. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo ubicado a la parte norte del Golfo al centro, del Golfo, entre Baja California Norte y la costa de Sonora, un poco más cercano a la costa de Baja California Norte que en la figura anterior, el inicio es representado por el triángulo y al final con un círculo.

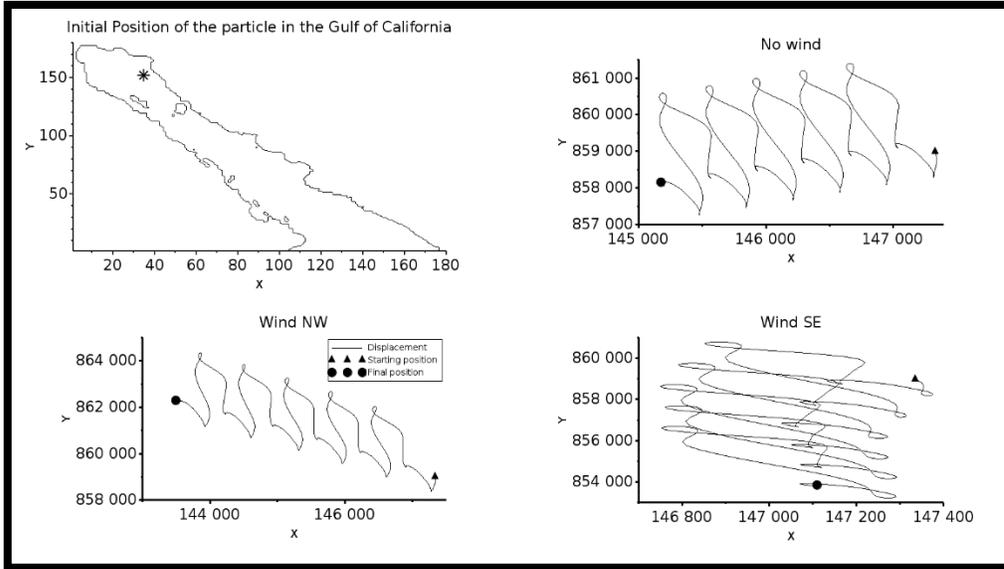


Figura 5.27. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo

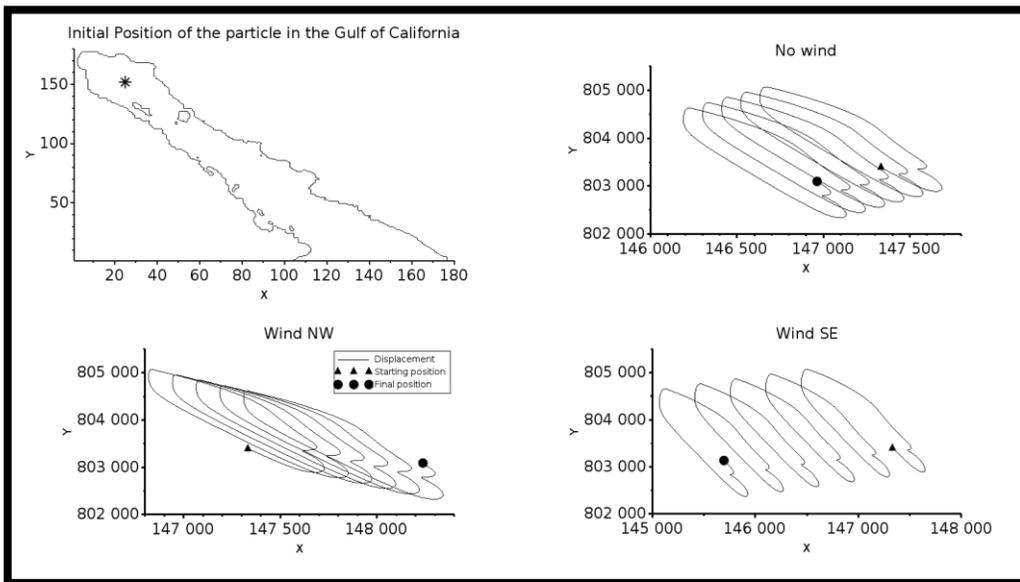


Figura 5.28. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo

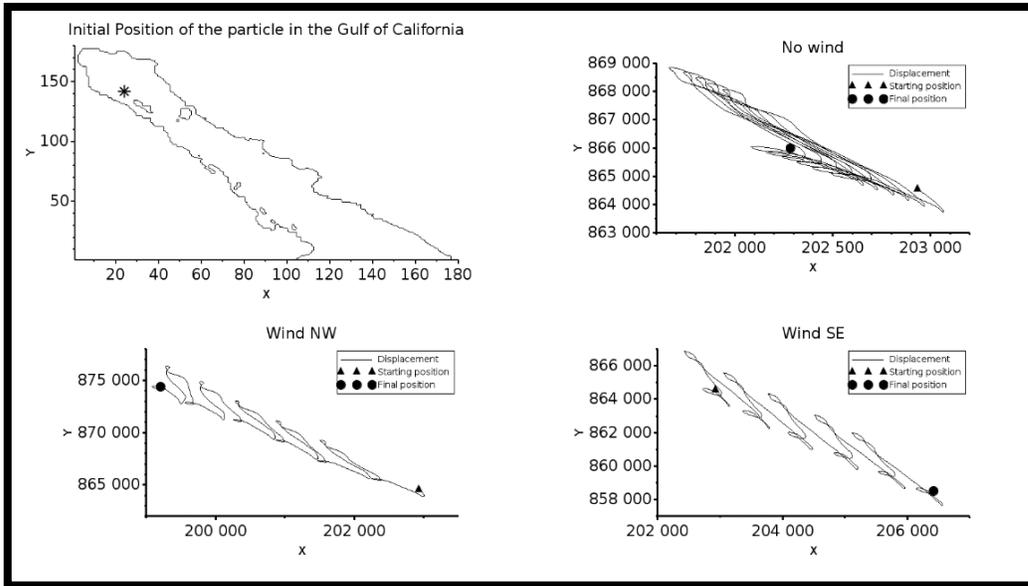


Figura 5.29. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo

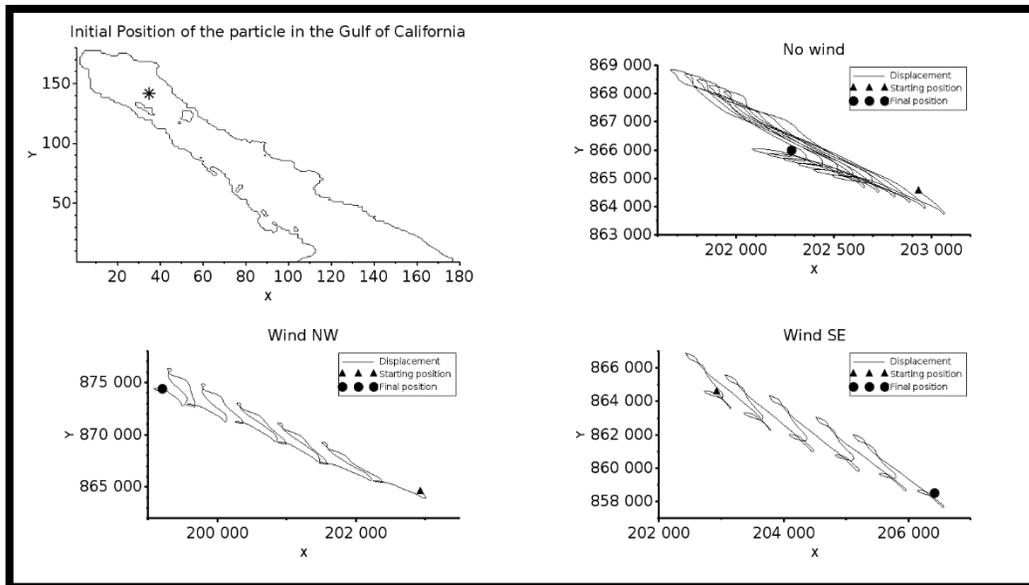


Figura 5.30. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo

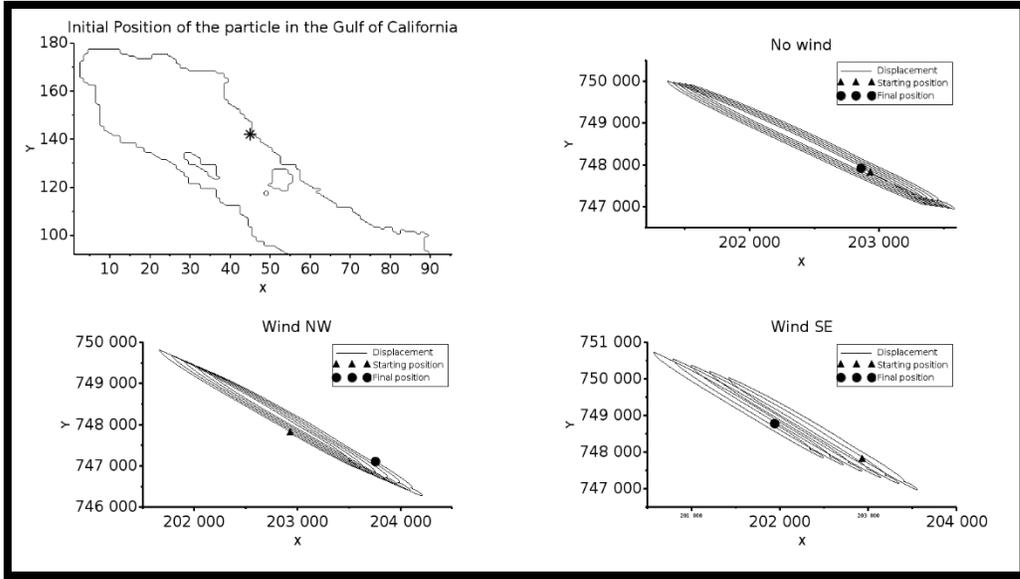


Figura 5.31. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo

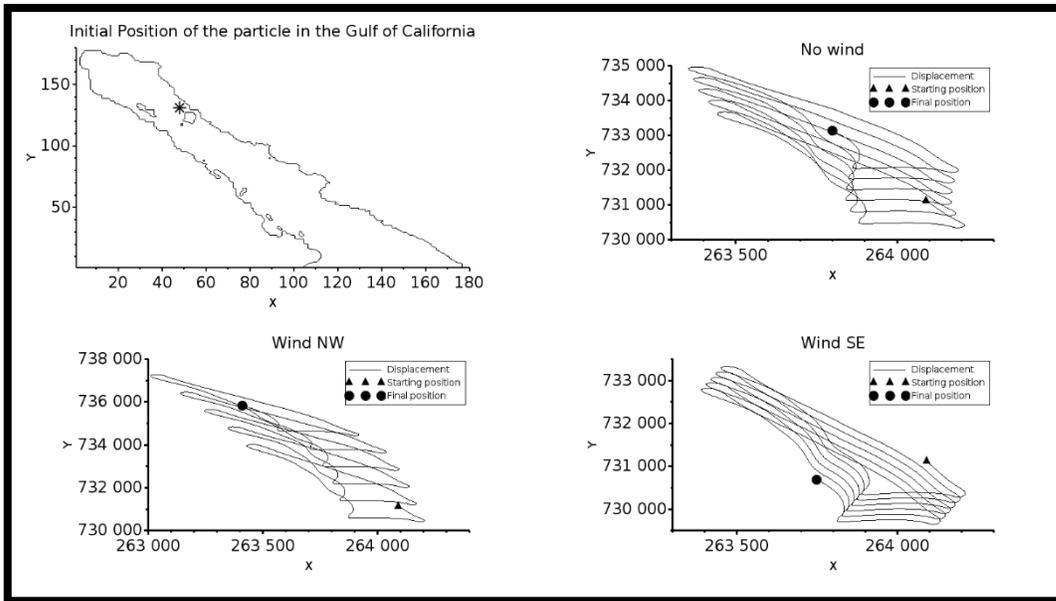


Figura 5.32. Combinación de todos componentes de marea en un solo punto del Golfo

La serie de figuras (5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 5.32) mostradas arriba dan una idea general sobre lo complejo de las trayectorias Lagrangianas. Se ha mostrado que para un mismo forzamiento de mareas (M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1), las trayectorias son siempre, en primer lugar, diferentes de punto a punto y en segundo lugar que pueden generar trayectorias muy complejas y completamente diferentes de punto a punto. Se ha visto que para diferentes combinaciones de componentes de marea, la posición inicial y la posición final siempre es diferente. Esto implica que la corriente residual estrictamente cambia de acuerdo a las componentes de marea que se aplican. Es importante señalar que esas trayectorias serían seguidas por objetos flotantes como experimentos con boyas. Normalmente lo que se calcula es la corriente residual de Lagrange que sólo considera la distancia entre la posición final e inicial, dividida entre el tiempo del ciclo considerado. Este cálculo de trayectorias nos da una idea de cómo son las corrientes residuales de Lagrange, pero se mostrara que de acuerdo como se observe el movimiento habrá diferentes tipos de corrientes residuales.

CAPÍTULO 6

Corrientes residuales (Euler, Lagrange, Stokes)

La dinámica del océano está regida por las leyes de Newton que explican las fuerzas que originan el movimiento y fuerzas que lo frenan. Existen dos tipos de descripción de la dinámica; los movimientos Eulerianos y Lagrangianos. La física del océano involucra movimientos y escalas tan pequeñas como centímetros y algunos pocos minutos de duración, hasta corrientes de decenas de kilómetros y escalas de tiempo de años o décadas, el movimiento del océanos se da tanto en la superficie, como en el interior del mismo, para generar movimiento influyen factores como la configuración astronómica, el viento, la batimetría y efectos volcánicos, telúricos y hasta antropogénicos. Un factor determinante en nuestro planeta son las mareas, ocasionadas por la luna y el sol y que varían de acuerdo a la configuración astronómica.

Se sabe que las mareas en el Golfo de California pertenecen a las más notables del mundo. Con altas amplitudes de la elevación de la superficie del mar en la parte más al norte del golfo y fuertes corrientes de marea en la mitad norte. Aunque hay información sobre más componentes de marea, las siete componentes aplicadas (M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1) son las más importantes. Los patrones de corriente mareomotriz (hacia el norte y hacia el sur) en diferentes momentos del cálculo se muestran en la Figura 6.1. Teniendo en cuenta que las mareas pueden extenderse cientos o miles de kilómetros desde la costa donde la amplitud es máxima y considerando que el Golfo de California es un mar estrecho, esto explica la presencia de un movimiento rectilíneo dominante, observado por ejemplo en la figura 4.15 . Solo la configuración costera y la presencia de varias islas en la región del archipiélago introducen algunas desviaciones del flujo rectilíneo. Este

movimiento rectilíneo se intensifica en el Delta del Río Colorado debido a un proceso de convergencia.

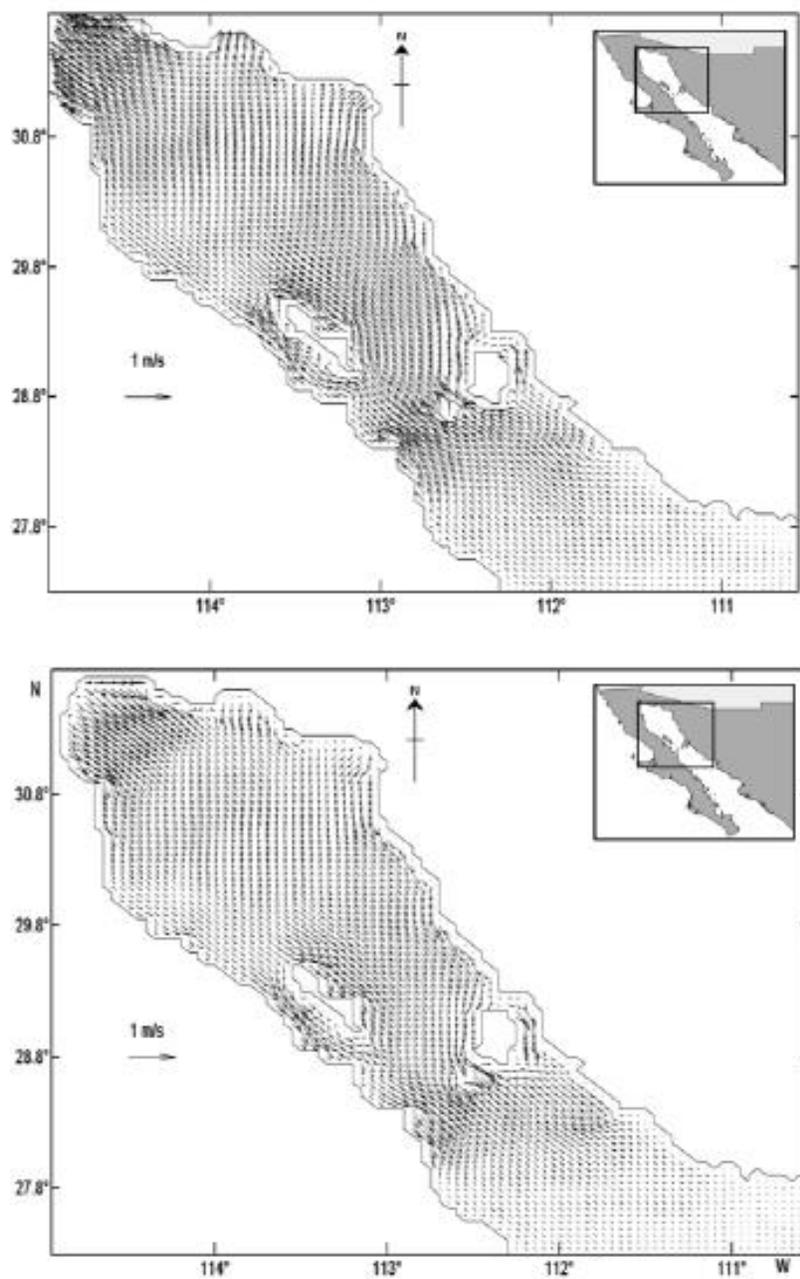


Figura 6.1 Corriente instantánea a un tiempo dado considerando siete componentes de marea. Cuando está en la etapa del flujo (arriba) y cuando ocurre el refluo (abajo).

Las ondas de marea se propagan en el océano y mares como ondas de Kelvin. De acuerdo a la teoría las ondas de Kelvin deben describir un movimiento oscilatorio rectilíneo, En principio lo estrecho del Golfo de California debería fortalecer aún más el comportamiento rectilíneo. Aquí surge la pregunta si este flujo rectilíneo dominante en combinación con una batimetría compleja y con algunas irregularidades geográficas genera un más sofisticado flujo residual. En la figura 6.1 se presentan para la parte norte, que es la zona de interés en este trabajo, las velocidades instantáneas en las etapas de flujo (arriba) y refluo (abajo). Aunque en la parte central se observa un flujo en buena medida rectilíneo, la geometría compleja del golfo introduce una fuerte variabilidad en las corrientes. Esto indudablemente sugiere que las corrientes residuales pueden tener un carácter más complejo de lo esperado para un mar estrecho. El conocimiento de las corrientes residuales en los mares donde dominan las mareas es importante para el cálculo del transporte de sustancias disueltas (contaminación y sedimentos) y de materia biológica como larvas, zooplancton, fitoplancton y microalgas.

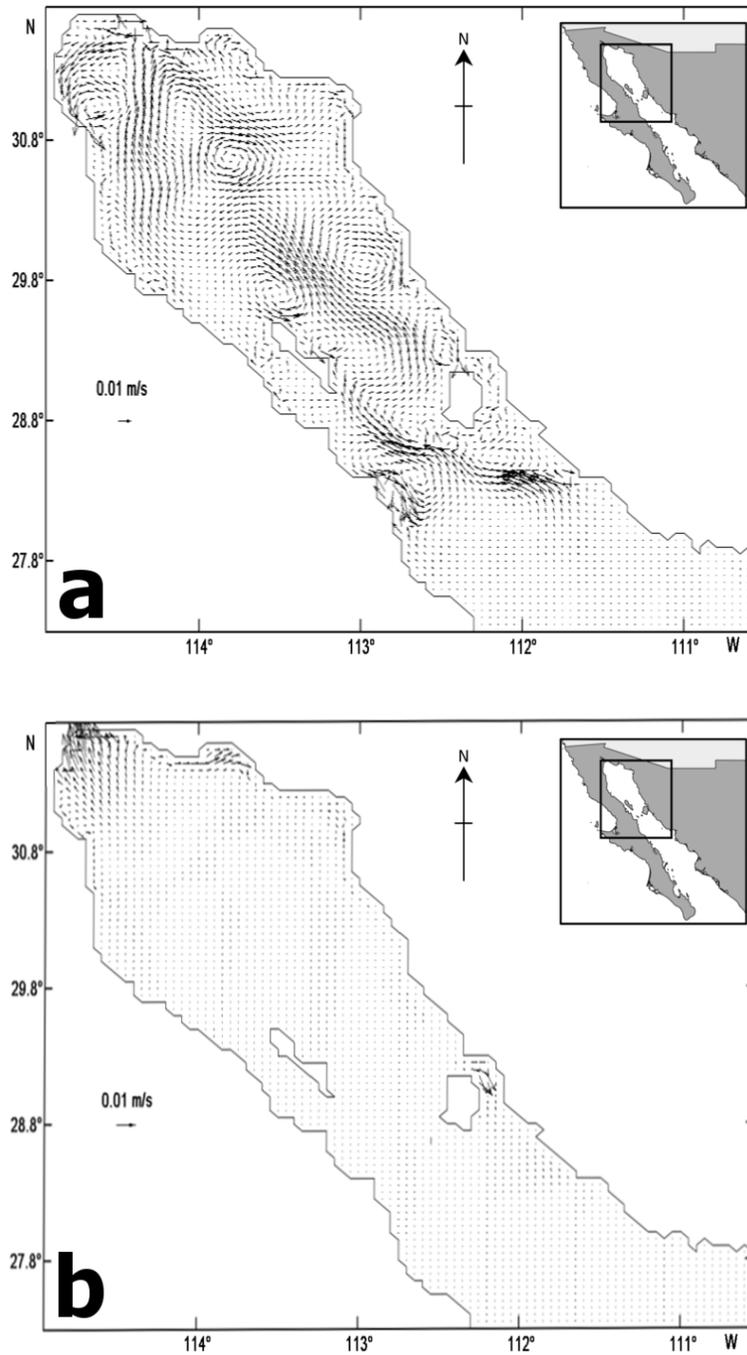


Figura 6.2. Corriente residual de Euler (a) y corriente residual de Stokes (b).

En la figura 6.2 se muestran las corrientes residuales de Euler y Stokes. Se puede distinguir que la corriente de Stokes (figura 6.2b) es importante sólo en el delta del Río Colorado, en la bahía de Adair y sobre todo en el canal del Infiernillo. El Golfo

de California es rico en procesos que involucran el transporte de materia suspendida por lo que el análisis de las corrientes residuales es muy importante. La corriente residual de Euler es relativamente intensa en toda la parte norte del golfo, particularmente en el delta del Río Colorado, en el umbral de Salsipuedes, canal del Infiernillo y en la parte central del golfo (figura 6.2). Las corrientes residuales indican las velocidades con las que los contaminantes se dispersan. Se ha reconocido que las corrientes residuales en un punto fijo (corriente residual de Euler) no son suficientes para explicar completamente las corrientes residuales. Es necesario considerar otras propiedades dinámicas a través de las corrientes residuales de Stokes y Lagrange. Longuet-Higgins (1969) encontró que la corriente residual de Lagrange se puede expresar como la suma de las corrientes residuales de Euler y Stokes (o deriva de Stokes).

Las corrientes residuales más calculadas en los estudios sobre la dinámica de las mareas es la corriente residual de Euler. Debido a su simplicidad, generalmente se calcula en estudios de mareas en regiones de plataforma. Se define como

$$u_{Euler} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u dt \quad (6.1)$$

Además, la corriente residual de Stokes se calcula de la siguiente manera

$$u_{Stokes} = \frac{1}{HT} \int_t^{t+T} u \zeta dt \quad (6.2)$$

En un análisis teórico sobre el mecanismo de la deriva de Stokes, Wei et al. (2004) encontraron una expresión similar a la ecuación (30), pero adicionalmente un término que considera la interacción entre la topografía, el desplazamiento actual y el desplazamiento neto. Esta interacción no lineal no se considera aquí.

La pregunta sobre la validez de la corriente residual de Lagrange, calculada usando cantidades de Euler, ha sido objeto de discusión en varios trabajos de investigación.

u_{Euler} y u_{Stokes} son estimaciones Eulerianas porque son propiedades en un punto fijo en el espacio (Cheng y Casulli, 1982). Zimmerman (1972) demostró que solo bajo ciertas circunstancias la relación $u_{Lagrange} \approx u_{Euler} + u_{Stokes}$ es válida, específicamente si la amplitud del desplazamiento del flujo oscilatorio es pequeña en comparación con la variabilidad del campo de velocidad. De acuerdo con Maier-Reimer (1977), la corriente residual de Lagrange, $u_{Lagrange}$ satisface la ecuación $u_{Lagrange} \approx u_{Euler} + u_{Stokes}$ en una buena aproximación en los océanos, Quan et al. (2014) demostraron que la corriente residual de Lagrange ha demostrado ser una descripción más adecuada de las corrientes residuales que cualquier otra velocidad residual.

En este trabajo de investigación, se llevaron a cabo diferentes experimentos numéricos para calcular la corriente residual de Lagrange; primero como la suma de las corrientes residuales de Euler y Stokes y luego usando trayectorias Lagrangianas. Otro objetivo principal de este trabajo de investigación fue examinar la posible generación de un proceso de rectificación de corrientes de marea por la presencia de islas en la parte central del Golfo de California.

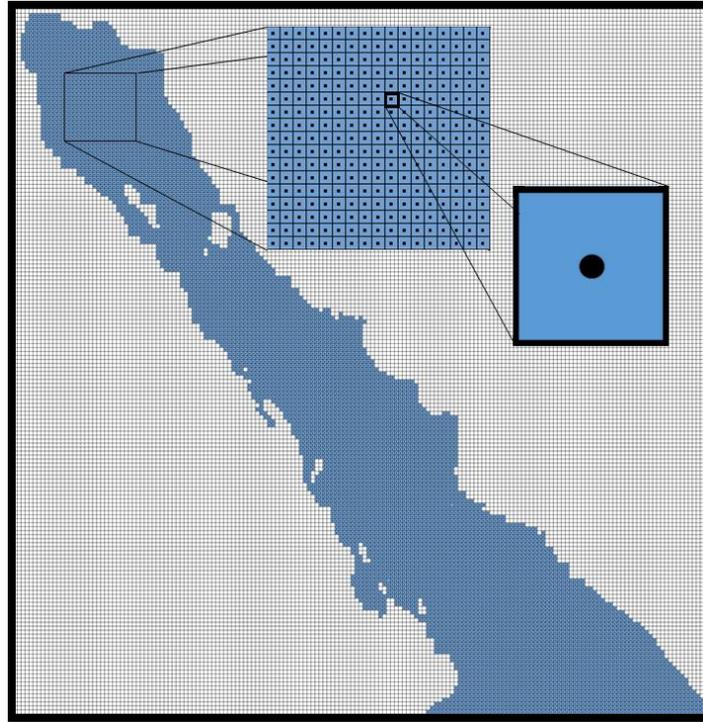


Figura 6.3. Punto medio de cada celda del Golfo de California donde salen 10 partículas para hacer la simulación de trayectorias Lagrangianas

Las trayectorias aplicadas para calcular las corrientes residuales Lagrangianas se simularon de la siguiente manera: el punto medio de cada celda Arakawa C del Golfo de California (figura 6.3) representaba la posición inicial de 10 partículas. Después del tiempo de simulación o ciclo modelado, desde la posición final de las 10 partículas, se calculó una posición media final. Como se conoce el tiempo de la simulación, permite la estimación de las componentes horizontales del vector de velocidad. En la Figura 6.4, se muestra la corriente residual de Lagrange, obtenida para la componente de marea M2 aplicando trayectorias, para la mitad norte del Golfo de California. Las corrientes residuales en la parte sur son muy pequeñas. Varios remolinos, ciclónicos y anticiclónicos, se pueden distinguir en la parte norte del golfo. Varias regiones con corrientes residuales relativamente fuertes se encuentran en la zona de transición (región del archipiélago) desde zonas muy profundas a áreas menos profundas. La estructura de las corrientes residuales

lagrangianas de la marea M2 sirve como referencia para la comparación con las corrientes residuales considerando varios componentes de las mareas.

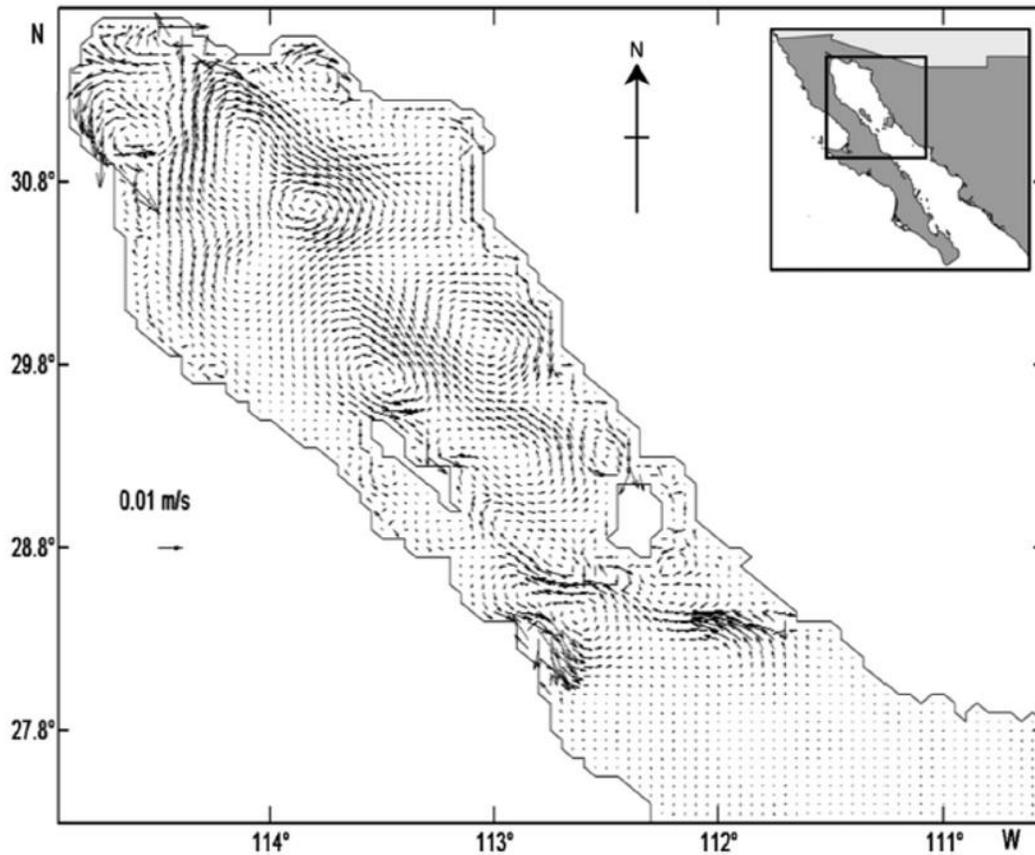


Figura 6.4. Corriente residual de Lagrange para la componente de marea M2. Calculada aplicando trayectorias lagrangianas.

Teniendo en cuenta siete componentes de la marea (M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1), las corrientes residuales de Lagrange, Euler y Stokes también se estimaron para un ciclo de marea de neap-spring, es decir, 14,765 días o medio mes sinódico. Para el cálculo de la corriente residual de Lagrange $u_{Lagrange}$ las trayectorias de las partículas se consideraron como se ha comentado anteriormente.

u_{Euler} y u_{Stokes} son calculadas aplicando las ecuaciones (6.1) y (6.2). Estas dos corrientes residuales se muestran en la Figura 6.5. Comparación de la corriente residual de Lagrange causada por la marea M2 (Figura 6.4) con la corriente residual

de Euler para el ciclo neap-spring considerando los componentes de la marea (M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1) revela que los patrones residuales son bastante similares.

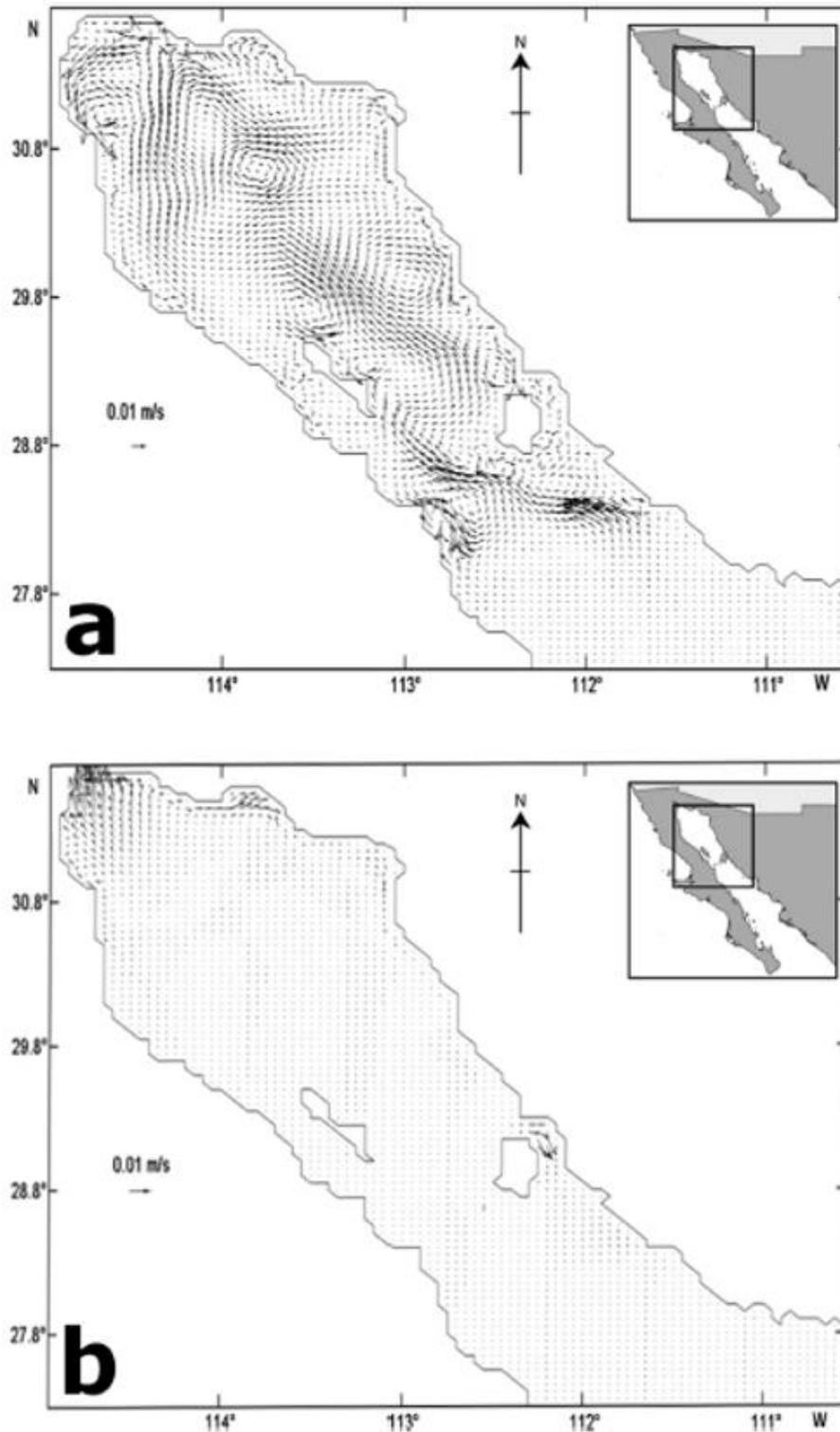


Figura 6.5. Corriente residual de Euler (a) y corriente residual de Stokes (b). Los cálculos fueron llevados a cabo para un periodo de marea viva – marea muerta.

Es una indicación de que las corrientes residuales dependen en gran medida de la geometría de la cuenca (batimetría y configuración costera). Aunque los patrones de corriente residual son bastante similares, la intensidad de las corrientes residuales es significativamente mayor con siete componentes de marea. Vale la pena mencionar el fuerte giro ciclónico sobre el umbral de Salsipuedes, en el lado oeste de la región del archipiélago. En el delta del río Colorado, un giro ciclónico relativamente fuerte y una circulación anticiclónica aparecen en la corriente residual de Euler. Vale la pena mencionar que en el canal de Infiernillo, la corriente residual de Stokes (Figura 6.5b) está hacia el sur mientras que en la corriente residual de Euler (Figura 6.5a) el flujo es predominantemente hacia el norte.

Una vez que se estimaron las corrientes residuales de Euler y Stokes aplicando las ecuaciones (6.1) y (6.2) para un ciclo de marea de marea muerta – marea viva, el siguiente paso fue estimar la corriente residual de Lagrange. La corriente residual de Lagrange, obtenida usando la ecuación, $u_{Lagrange} \approx u_{Euler} + u_{Stokes}$, se muestra en la Figura 6.5a. Se puede comparar con la corriente residual de Lagrange calculada mediante trayectorias, que se muestra en la Figura 6.5b. Ambos patrones son bastante similares, con los mismos giros en la parte norte del Golfo de California y con el mismo orden de magnitud. Es evidente que las correcciones introducidas por la corriente residual de Stokes (Figura 4b) en las áreas del Delta del Río Colorado, en la Bahía Adair y en el Canal Infiernillo aparecen en ambos cálculos de la corriente residual de Lagrange. La corriente residual de Lagrange alcanza valores que oscilan entre 0.01 y 0.03 ms⁻¹ en el área del Delta del Río Colorado. En el lado oeste de esta área, se desarrolla una fuerte circulación residual ciclónica. Un par de giros, uno de ellos ciclónico y el otro anticiclónico, se desarrollan en la parte central desde una corriente hacia el norte.

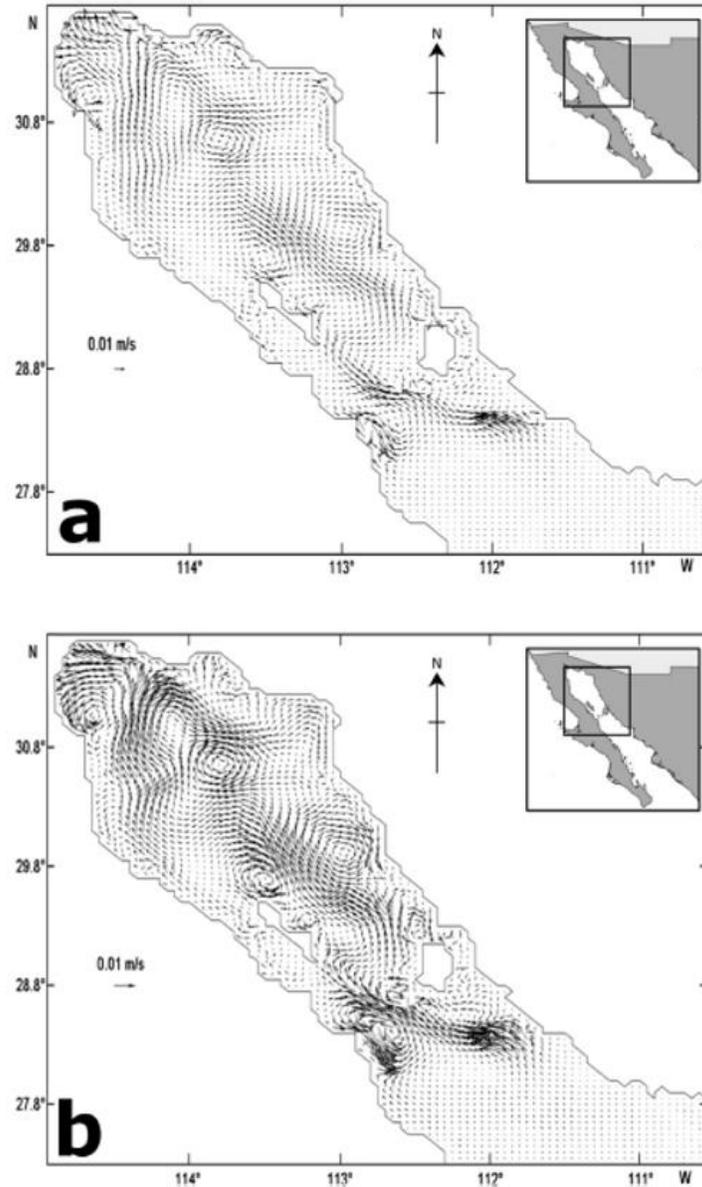


Figura 6.6. Corriente residual de Lagrange calculada como la suma de las corrientes residuales de Euler y Stokes (a). Corriente residual de Lagrange calculada usando trayectorias. El cálculo fue realizado para un ciclo de marea muerta – marea viva.

Una corriente residual de marea relativamente fuerte aparece al sur de la isla Tiburón, es decir, en la zona de transición desde las regiones más profundas a las menos profundas. Otro resultado interesante es que a lo largo de la costa este del golfo, la corriente residual está predominantemente hacia el sur mientras que a lo

largo de la costa oeste el flujo está hacia el norte. Desde la parte sur de la región del archipiélago hasta el delta del río Colorado en la parte más septentrional del golfo hay una corriente residual serpenteante producida por los siete componentes de la marea (M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1). Aunque no se muestra, vale la pena mencionar que las corrientes residuales de las mareas son muy pequeñas en la mitad sur del Golfo de California, solo en las áreas poco profundas de la costa este es la corriente residual de cierta importancia.

CAPÍTULO 7

DISCUSIÓN

Se sabe que en algunas áreas marinas del mundo, el ciclo de marea de marea muerta - marea viva está modulado por el mes sinódico, es decir, por los cambios de fase de la luna. Los ciclos sinodales primaverales ocurren cuando los componentes de las mareas M2 y S2 entran en fase o están desfasados (Pugh, 1987).

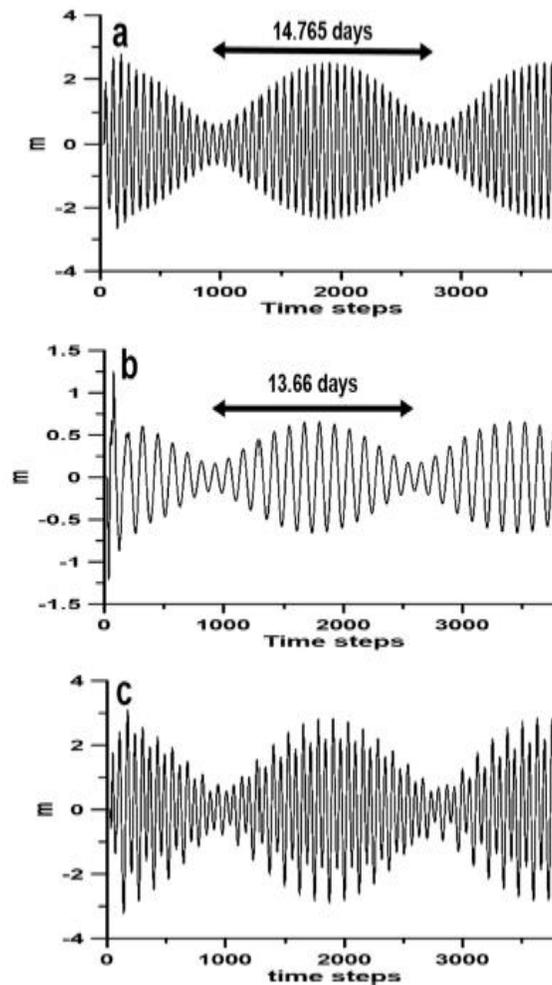


Figura 7.1. Series temporales de la elevación de la superficie del mar en un punto del Delta del río Colorado. Teniendo en cuenta los constituyentes de las mareas M2 y S2 (a). Simulación considerando los componentes mareales K1 y O1 (b). Consideración de los componentes mareales M2, S2, K1 y O1 (c). Observe que el ciclo de **marea muerta – marea viva** no es el mismo en (a) y (b).

No todos los ciclos de marea muerta - marea viva precedentes se determinan por un período de 14.765 días, es decir, la mitad de un mes sinódico. Hay cuencas en las que el ciclo de marea muerta-muerta viva es generado en la mitad de un mes tropical (13.66 días), como en el Golfo de México (Kvale, 2006). Este ciclo de de la mitad de un mes tropical es generado por los constituyentes de las mareas K1 y O1. En el Golfo de California, los componentes de las mareas M2 y S2 están en fase cada 14.765 días. En la parte norte del golfo, la importancia relativa de las mareas como K1 y O1 se ha considerado a menudo como pequeña. En la Figura 7.1, se muestran las series temporales de la elevación de la superficie del mar en un punto en el área del Delta del Río Colorado. Mientras que la combinación de los componentes de la marea M2 y S2 generan amplitudes de aproximadamente 3 m, los constituyentes de las mareas K1 y O1 producen amplitudes de aproximadamente 0,5 m. Obsérvese que el ciclo de marea muerta – marea viva es diferente para estos dos experimentos numéricos y que la influencia de los componentes de las mareas K1 y O1 es importante. Para calcular las corrientes residuales de Lagrange, Euler y Stokes, se aplicó un período de 14.765 días. Las características más importantes de las corrientes residuales de Euler, Stokes y Lagrange se han descrito anteriormente, haciendo hincapié en la generación de varios giros, algunos de ellos en pares. Otro resultado importante es una corriente continua y serpenteante con velocidades que varían entre 0.01 y 0.02 ms⁻¹ que se extiende desde la zona de transición, desde las regiones profundas a las menos profundas en la parte sur de la Isla Tiburón, hasta el Delta del Río Colorado en la parte más septentrional Golfo. Estas corrientes residuales de aproximadamente 0.02 ms⁻¹ transportarían un trazador pasivo a una distancia de aproximadamente 1730 m en un día, o aproximadamente 50 km en un mes.

El análisis de las corrientes residuales de Euler, Stokes y Lagrange también ha revelado otro proceso interesante en la región del archipiélago. En la Figura 7.2a, en el lado este de la Isla Tiburon (Canal de Infiernillo), hay una corriente residual de Euler hacia el norte con valores de aproximadamente 0.008 ms⁻¹. Todo lo contrario, es decir, se produce un flujo hacia el sur en la corriente residual de Stokes que se

muestra en la Figura 7.2b. Los valores de velocidad para esta corriente residual son del orden de 0.01 ms^{-1} . Este flujo hacia el sur más fuerte se superpone a la corriente residual de Euler, como se puede ver en la Figura 7.2c donde se muestra la corriente residual de Lagrange. La corriente residual de Euler y Stokes se calculó de acuerdo con las ecuaciones (6.1) y (6.2), respectivamente. La corriente residual de Lagrange se estimó utilizando trayectorias de partículas que iniciaron el desplazamiento en el medio de cada celda de la malla. Este resultado indica que de la superposición de las corrientes residuales de Euler y Stokes surge un proceso de rectificación del flujo de marea oscilante alrededor de la Isla Tiburón donde se genera una circulación anticiclónica (Figura 7.2c). Es importante mencionar que este proceso de rectificación se observa tanto en la suma de las corrientes residuales de Euler y Stokes como en la corriente residual de Lagrange calculada con las trayectorias de las partículas. El proceso de rectificación no es tan obvio en la Isla Ángel de la Guarda. Una circulación anticiclónica ocurre en casi tres cuartas partes de la longitud alrededor de la isla. En el lado sur, la presencia de un flujo hacia el norte relativamente fuerte inhibe la circulación anticiclónica completa alrededor de Ángel de la Guarda. La rectificación de los flujos de las mareas oscilantes se ha explicado de varias formas (Zimmerman, 1978; Loder, 1980). La continuidad, los efectos de Coriolis y la fricción del fondo juegan un papel relevante en el mecanismo de rectificación (Huthence 1973). Zimmerman (1978) aseveró que Coriolis y fricción causados por una batimetría de fondo variable, producen un campo de vorticidad que se transfiere al flujo medio mediante los términos de advección no lineales. Loder (1980) explicó el proceso de rectificación como una interacción del flujo medio y las corrientes de marea oscilantes en un gradiente topográfico. En este trabajo de investigación, para explicar la rectificación de las corrientes de las mareas por la presencia de la Isla Tiburón, se utilizan las corrientes residuales de Euler, Stokes y Lagrange. Loder (1980) llamó la atención sobre la importancia de la corriente residual de Stokes en el proceso de rectificación. El sentido de rotación en sentido horario de la circulación alrededor de la Isla Tiburón en el Golfo de California es el mismo que el calculado y observado en Georges Bank, en las cercanías del Golfo de Maine, en la costa oeste del Océano Atlántico Norte.

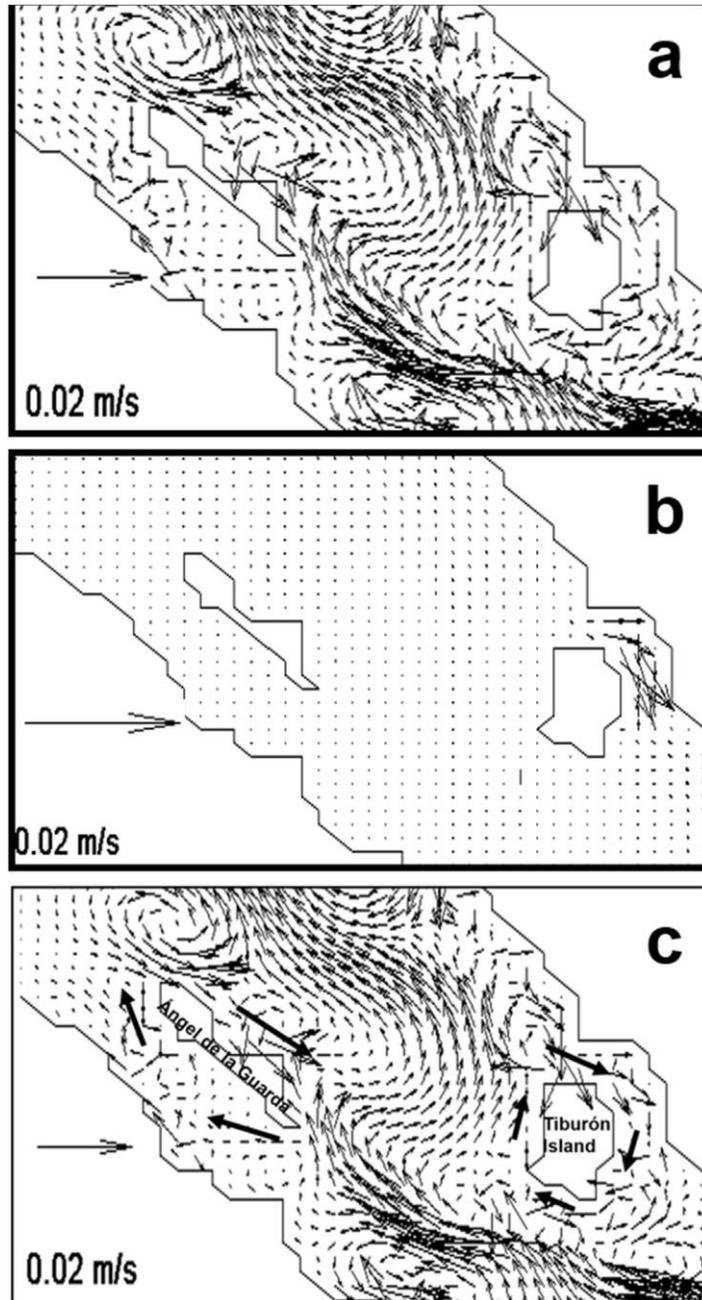


Figura 7.2. Corrientes residuales que aplican los constituyentes mareales M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1. (a) Corriente residual de Euler. (b) Corriente residual de Stokes. (c) Corriente residual de Lagrange como la superposición de las corrientes residuales de Euler y Stokes. El proceso de rectificación (flechas gruesas) es evidente alrededor de las islas Tiburón y Ángel de la Guarda como una circulación en el sentido de las agujas del reloj.

Para estimar las corrientes residuales de Lagrange fue necesario calcular las trayectorias de las partículas. Esto se llevó a cabo aplicando un método bilineal para interpolar los componentes horizontales del vector velocidad en una malla Arakawa C. Las trayectorias Lagrangianas de las partículas se calcularon en diferentes puntos en la parte norte del Golfo de California y para distintas combinaciones de constituyentes de las mareas. El principal interés fue visualizar la influencia de la geometría de la cuenca en las trayectorias. Las ondas Kelvin puras muestran un movimiento rectilíneo a lo largo de una costa rectilínea ideal. Aunque esta condición no se cumple en mares reales, el flujo de marea oscilante a menudo es casi rectilíneo cerca de la costa (en el lado derecho de una onda Kelvin que se propaga en el hemisferio norte). La presencia de bahías puede generar ondas de Poincaré con un aumento de la excentricidad de las elipses de las mareas. De esta discusión, se espera un flujo casi rectilíneo o elipses con una pequeña excentricidad en los alrededores de las costas. Dado que la disminución exponencial de las ondas de Kelvin no es la misma para los diferentes componentes de las mareas, lejos de la costa los valores de amplitud relativa cambian. Otro factor geométrico que puede influir en las trayectorias Lagrangianas es la presencia de islas, como en la región del archipiélago, en la parte central del Golfo de California. En la Figura 7.3, se muestran las trayectorias Lagrangianas generadas por la marea M2 en la parte norte del Golfo de California. Las trayectorias se muestran durante el tiempo equivalente a 5 períodos de la M2, es decir, alrededor de 62.1 horas. En los puntos A, B, C, E y F, la excentricidad de las elipses es pequeña. Estos puntos se encuentran en el barrio de las costas. La costa impone restricciones al flujo de acuerdo con la propiedad de ondas Kelvin de flujo rectilíneo.

El proceso de reflexión de la ola de Kelvin, descrito por Taylor (1921), impone también condiciones sobre la excentricidad de las elipses de las mareas. Es interesante observar que la corriente residual en F es muy pequeña. Esto se puede corroborar en las Figuras 4 y 5 donde las corrientes residuales de Euler, Stokes y Lagrange son muy pequeñas en esa área. En el punto H, las elipses no están

deformadas y la excentricidad de las elipses es pequeña. En los puntos D y G, las elipsis están fuertemente distorsionadas. El punto D está ubicado en una zona de convergencia de varios flujos con una corriente residual de Lagrange relativamente fuerte. La circulación en el sentido de las agujas del reloj alrededor de la isla Tiburón, producida en el proceso de rectificación, muestra un flujo en dirección noroeste en el área del punto G. El desplazamiento neto de esta partícula refleja este hecho. Dado que el punto G está ubicado en un área con corrientes residuales variables, las trayectorias tienen una forma complicada y no describen elipses cerradas.

Cuando se consideran varios componentes de las mareas en el cálculo de las trayectorias Lagrangianas, los caminos seguidos por las partículas son mucho más complejos. Dado que la disminución exponencial de las ondas de Kelvin no es la misma para los diferentes componentes de las mareas, lejos de la costa los valores de amplitud relativa cambian. Esto puede conducir a trayectorias complejas. Otro factor geométrico que puede influir en las trayectorias Lagrangianas es la presencia de islas, como en la región del archipiélago, en la parte central del Golfo de California. Las diferencias de fase también pueden jugar un papel en la complejidad de las trayectorias de las partículas. Aunque el Golfo de California es un mar angosto, las trayectorias Lagrangianas están lejos de ser un movimiento rectilíneo. La presencia de una geometría compleja, las costas y la batimetría contribuyen de manera uniforme a esta complejidad de las trayectorias de las partículas. En la Figura 7.3, las trayectorias de las partículas reflejan el hecho de que hay una transición de las mareas de curso a temprano, es decir, las amplitudes tienden a ser mayores.

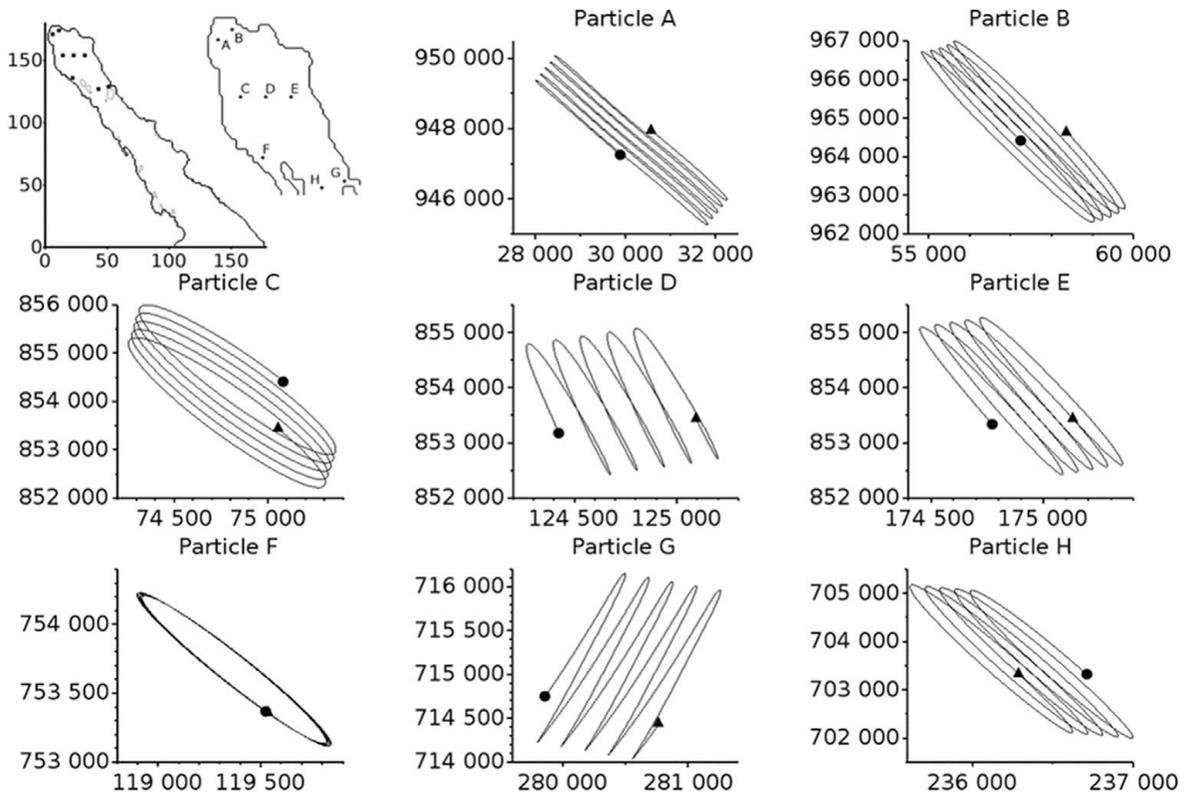


Figura 7.3. Trayectorias lagrangianas de partículas en diferentes zonas de la parte norte del Golfo de California. Las trayectorias se calcularon considerando los constituyentes de las mareas M2. Los triángulos indican el punto de partida.

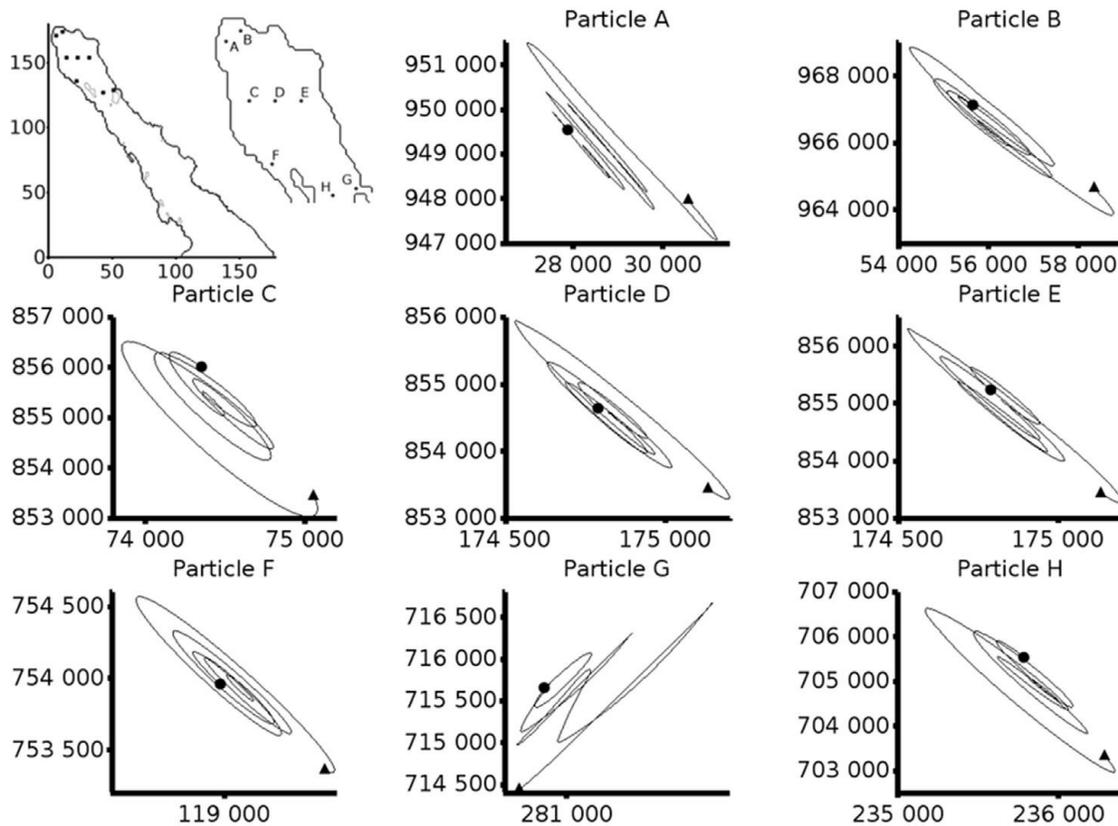


Figura 7.4. Trayectorias lagrangianas de partículas en diferentes zonas de la parte norte del Golfo de California. Las trayectorias se calcularon considerando los constituyentes de las mareas (M2, S2, K1, O1, N2). Los triángulos indican el punto de partida.

Es notable que no importa las complicadas trayectorias de las partículas de agua, como se muestra en la Figura 7.4 donde se consideraron 5 componentes de marea (M2, S2, K1, O1, N2), el efecto neto de estas trayectorias conduce a un comportamiento suave de las corrientes residuales. Como en el caso de la marea M2, en el punto G la trayectoria de la partícula en esa área es muy complicada. En la zona muy poco profunda del delta del río Colorado, la trayectoria en el punto A también es compleja. El punto inicial (triángulos) y el punto final (círculos negros) reflejan la tendencia de las corrientes residuales Lagrangianas. Finalmente, las fuertes corrientes de marea rectilíneas son rectificadas por la geometría de la cuenca produciendo una circulación neta en el sentido de las agujas del reloj

alrededor de la isla Tiburón y una serie de giros en sentido horario y anti horario en el norte del Golfo de California.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

Se ha presentado como parte central de este trabajo el desarrollo de un modelo hidrodinámico- numérico verticalmente integrado, en donde la aplicación de un aproximación semi-implícita de los términos inerciales condujo a una solución numérica nueva en donde al final se resuelve una ecuación de dos incógnitas. Con la finalidad de probar el modelo, se llevaron a cabo toda una serie de experimentos numéricos sobre el comportamiento de las mareas y circulación por viento.

En el trabajo de investigación, se llevó a cabo un estudio detallado de las corrientes residuales en el norte del Golfo de California. La corriente residual Lagrangiana para el M2 reveló varios giros ciclónicos y anticiclónicos. Cuando en el cálculo se consideraron varios componentes de marea (M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1), también se calcularon las corrientes residuales de Euler, Stokes y Lagrange. Los cálculos revelaron que para la marea M2, la estructura de las corrientes residuales de Euler y Lagrange es bastante similar, pero la intensidad de las corrientes es diferente. Esto indica que las corrientes residuales están fuertemente influenciadas por la geometría de la cuenca y por la fricción. De hecho, todos los giros calculados se pueden considerar como el resultado de un proceso de rectificación. Los períodos considerados en los cálculos fueron de 12.4206 horas para la corriente de marea M2 y de 14.765 días para el ciclo de marea muerta-marea viva. La corriente residual de Stokes reveló valores relativamente altos solo en algunas zonas de la parte norte del golfo, particularmente en el delta del río Colorado, en las bahías de Adair y San Carlos y en el canal de Infiernillo. Las corrientes residuales de Euler y Stokes son bastante diferentes, pero la superposición de ellas determina una imagen más realista de las corrientes residuales y es muy cercana a una corriente residual de Lagrange.

Referencias

A. Badan-Dangon, C. E. Dorman, M. a. Merrifield, and C. D. Winant, "The lower atmosphere over the Gulf of California," *J. Geophys. Res.*, vol. 96, no. Figure 1, pp. 16877–16896, 1991.

Álvarez A. y A. Molina, 1984. Aspectos paleoceanográficos cuaternarios del Golfo de California evidenciados por conjuntos de radiolarios. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, UNAM. En:

<http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1986-2/articulo218.html>

Argote, M.L., Amador, A., Lavín, M.F., Hunter, J.R., 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 100 (16), 103e116, 118.

Carbajal, N. 1993. Modelling of the circulation in the Gulf of California. Ph.D. Thesis, Hamburg University, Hamburg, Germany, 186 pp.

Carbajal, N., & Backhaus, J. O. (1998). Simulation of tides, residual flow and energy budget in the Gulf of California. *Oceanologica Acta*, 21(3), 429–446.
[http://doi.org/10.1016/S0399-1784\(98\)80028-5](http://doi.org/10.1016/S0399-1784(98)80028-5)

Carbajal, N., Montaña, Y., 2001. Comparison between predicted and observed physical features of sandbanks. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 52, 435-443

Carbajal, Noel; Montaña, "Delta Del Río Colorado Growth Rates and Scales of Sand Banks in the," *Ciencias Mar.*, vol. 25, pp. 525–540, 1999.

Castro-Aguirre, J.L., Balart, E.F. Y Arvizu Martínez, J. 1995. Contribución al conocimiento del origen y distribución de la ictiofauna del Golfo de California, México. *Hidrobiológica*, año/vol. 5, número 001-002. UAMI. pp. 57-78.

Cheng, R.T., Casulli, V., 1982. On Lagrangian residual currents with applications in south San Francisco Bay, California. *Water Resour. Res.* 18 (6), 1652-1662.

Filloux, J.H., 1973. Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California. *Nature* 243, 217-221.

Fu, L.L., Holt, B., 1984. Internal waves in the Gulf of California: observations from a spaceborne radar. *J. Geophys. Res.* 89 (C2), 2053-2060.

Grijalva, N., 1972. Tidal computation in the Gulf of California. *Geofísica Int.* 12 (2), 13-34.

Gutiérrez, O.Q., Marinone, S.G., Parés-Sierra, A., 2004. Lagrangian surface circulation in the Gulf of California from a 3D numerical model. *Deep Sea Res. II* 51, 659-672.

Hendershott, M.E., Speranza, A., 1971. Co-oscillating tides in long, narrow bays: the Taylor problem revisited. *Deep Sea Res.* 18, 959-980.

Herna, L., Carbajal, N., & Montan, Y. (2013). Bedload Transport of Sediments and Morphodynamics in the Northern Gulf of California. *Journal of Coastal Research*, 30(November), 1–9. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00026.1>

Hernández-Azcúnaga, L., Carbajal, N., Montañón-Ley, Y., 2013. Bedload transport of sediments and morphodynamics in the Northern Gulf of California. *J. Coast. Res.* 30 (2), 228-236.

Hidalgo-González, R., Álvarez-Borrego, S. and Zirino, A. (1997). Mixing in the large islands region of the Gulf of California: pCO₂ effects. *Ciencias Marinas*, 23: 317–327.

Huthnance, J.M., 1973. Tidal current asymmetries over the Norfolk Sandbanks. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* 1 (1), 89-99.

K. P. Bowman et al., "Input data requirements for Lagrangian trajectory models," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 94, no. 7, pp. 1051–1058, 2013.

Kvale, E.P., 2006. The origin of neap-spring tidal cycles. *Mar. Geol.* 235 (1e4, 20), 5-18.

Lavín, M.F., Beier, E. and Badan, A. (1997) Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. In: Lavín, M.F., Ed., *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 3, 141-171

Loder, J.W., 1980. Topographic rectification of tidal currents on the sides of Georges Banks. *J. Phys. Oceanogr.* 10 (9), 1399-1416.

Longuet-Higgins, M.S., 1969. On the transport of mass by time-varying ocean currents. *Deep Sea Res.* 16, 431-447.

Maier-Reimer, E., 1977. Residual circulation in the North Sea due to the M2-tide and mean annual wind stress. *Dt. Hydrogr. Z.* 32, 126-130.

Marinone, S.G., Lavín, F.M., 2003. Residual current and mixing in the large islands region of the central Gulf of California. In: Velasco Fuentes, O.U., et al. (Eds.), *Non-linear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publisher, pp. 213-236.

Montaño, Y., Carbajal, N., 2008. Numerical experiments on the long term morphodynamics of the Colorado River Delta. *Ocean. Dyn.* 58, 19-29.

Morales, R.A., Gutiérrez, G., 1989. Mareas en el Golfo de California. *Geofísica Int.* 28-1, 25-46.

Núñez Lara-Lara, J.R., et al. 2008. Los ecosistemas marinos, en *Capital natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México, pp. 135-159.

O. U. Velasco Fuentes and S. G. Marinone, "A numerical study of the Lagrangian circulation in the Gulf of California," *J. Mar. Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–12, 1999.

P. C. Roos and H. M. Schuttelaars, "Influence of topography on tide propagation and amplification in semi-enclosed basins," *Ocean Dyn.*, vol. 61, no. 1, pp. 21–38, 2011.

Pegau, W. S., Boss, E., & Martínez, A. (2002). Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, 29(9), 6-1-6–3. <http://doi.org/10.1029/2001GL014076>

Pugh, D.T., 1987. *Tides, Surges and Mean Sea Level*. John Wiley and Sons, New York, 472 pp.

Quan, Q., Mao, X., Jiang, W., 2014. Numerical computation of the tidally induced Lagrangian residual current in a model bay. *Ocean Dynam.* 64, 471-486.

Quiros, G., Badan-Dangon, A., Ripa, P., 1992. M2 Currents and residual flow in the Gulf of California. *Netherlands. J. Sea Res.* 28 (4), 251-259.

Ripa, P. & G. Velázquez. 1993. Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California. *Geofísica Internacional*3: 41-56.

Ripa, P. (1997). Toward a Physical Explanation of the Seasonal Dynamics and Thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27(5), 597–614. [http://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<0597:TAPEOT>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<0597:TAPEOT>2.0.CO;2)

Roden, G. I. (1958). Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science*, 12(1), 21–45. <http://doi.org/http://hdl.handle.net/10125/7874>

Salas de León, D.A., Carbajal, N., Monreal-Gómez, M.A., Gil-Zurita, A., 2011. Vorticity and mixing induced by the barotropic M2 tidal current and zooplankton biomass distribution in the Gulf of California. *J. Sea Res.* 66, 143-153.

Salas-de-Leo, David Alberto, Noel Carbajal-Pérez, M. A. M.-G., & Barrientos-MacGregor, G. (2003). Residual circulation and tidal stress in the Gulf of California.

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 108.
<http://doi.org/10.1029/2002JC001621>

Stock, G.G., 1976. Modelling of Tides and Tidal Dissipation in the Gulf of California. Ph.D. thesis, 102 pp., Scripps Inst. of Oceanography. Univ. of Calif., San Diego.

Stohl, Andreas & Seibert, P & Wotawa, Gerhard & Arnold, Delia & Burkhart, John & Eckhardt, S & Tapia, C & Vargas, A & Yasunari, Tepei. (2012). Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: Determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 12. 2313-2343. 10.5194/acp-12-2313-2012.

Taylor, G.I., 1921. Tidal oscillations in Gulfs and rectangular basins. *Proc. Lond. Math. Soc.* 20, 148-181.

Wei, H., Hainbucher, D., Pohlmann, T., Fenga, S., Sündermann, J., 2004. Tidal induced Lagrangian and Eulerian mean circulation in the Bohai Sea. *J. Mar. Syst.* 44, 141-151.

Zeitzschel, B. (1969). Primary productivity in the Gulf of California. *Mar. Biol.*, 3(3): 201-207.

Zimmerman, J.T.F., 1978. Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) currents. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* 11, 35-47.

Ziveri P, Thunell R *Deep-Sea Research Part II*, vol. 47, issue 9-11 (2000) pp. 2073-2100