

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Ciencias



Validación de modelos de turbulencia con Teledetección para el estudio de la recirculación de plumas térmicas en zonas costeras. Aplicación a la descarga de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, México.

Disertación presentada por

Luis Fernando Laguna Zarate

sometida a la

Escuela de Ingeniería y Ciencias

como un requisito parcial para obtener el grado académico de

Doctor

en

Ciencias de la Ingeniería

con especialidad en Dinámica de Fluidos Computacional

Monterrey Nuevo León, 01 de Junio de 2022

Declaración de autoría

Yo, Luis Fernando Laguna Zarate, declaro que esta disertación titulada, 'Validación de modelos de turbulencia con Teledetección para el estudio de la recirculación de plumas térmicas en zonas costeras. Aplicación a la descarga de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, México', y el trabajo que se presenta en ella es de mi autoría. Adicionalmente, confirmo que:

- Realice este trabajo en su totalidad durante mi candidatura al grado de doctor en esta universidad.
- He dado crédito a cualquier parte de esta disertación que haya sido previamente sometida para obtener un grado académico o cualquier otro tipo de titulación en esta o cualquier otra universidad.
- He dado crédito a cualquier trabajo previamente publicado que se haya consultado en esta disertación.
- He citado el trabajo consultado de otros autores, y la fuente de donde los obtuve.
- He dado crédito a todas las fuentes de ayuda utilizadas.
- He dado crédito a las contribuciones de mis coautores, cuando los resultados corresponden a un trabajo colaborativo.
- Esta disertación es enteramente mía, con excepción de las citas indicadas.

Luis Fernando Laguna Zarate

Monterrey Nuevo León, 01 Junio de 2022

Cuando yo muera y esté en el cielo, interrogaré a Dios sobre dos aspectos: la mecánica cuántica y la turbulencia. Sobre el primero tengo esperanzas que me responda.

Sir Horace Lamb (1849-1934)

Matemático inglés

Dedicatoria

A la memoria de mi señor padre, ya que a pesar de saber el riesgo que tu actividad implicaba, NO mantuviste tu neutralidad en estos tiempos de crisis moral.

Siempre observaste lealtad al Juramento Hipocrático que un día protéstate cumplir, especialmente en la batalla contra el llamado Sars-Cov-2; dando tu vida por aquellos en necesidad y yo soy fiel testigo de ello.

Reconocimientos

Al **Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM)**, por haberme alojado en sus aulas e instalaciones durante mis estudios doctorales, por permitirme vivir la experiencia de la cultura emprendedora y por la beca de colegiatura conferida a mi persona.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por la valiosa beca de manutención proporcionada durante el doctorado.

Al director de esta disertación, **Dr. Héctor Alfonso Barrios Piña** por la orientación, confianza y su desinteresado apoyo durante todo este tiempo. También por sus palabras alentadoras principalmente en esos momentos de adversidad, lo que demuestra su profesionalidad, integridad y sentido de la enseñanza.

A mi co-asesor, **Dr. Hermilo Ramirez León** por todo el conocimiento compartido respecto a la Dinámica de Fluidos Computacional y aún más en el desafiante tema de la Turbulencia. Jamás terminaré de expresar mi gratitud hacia usted por su infinita paciencia, guía y sus reflexiones críticas en relación con el tema.

Al comité revisor de esta disertación **Dr. Aldo Iván Ramirez Orozco, Dr. Miguel Ángel López Zavala, Dr. Jose Luis López Salinas** y al **Dr. Eduardo Ramos Mora** por todos sus comentarios valiosos y retroalimentación para mejora de este trabajo de investigación. Además, por las agudas reflexiones sobre el comportamiento del agua, me permitieron actualizar mi sistema de creencias en este tema...y en muchos otros.

Al **M. en C. Raudel García Díaz** por compartir las imágenes de Teledetección y la enorme disposición a colaborar en este trabajo de investigación.

Finalmente, y no por ello menos importante, a mis profesores y amigos de los **Campus Monterrey y Guadalajara del Tecnológico de Monterrey** y a quienes que de alguna u otra manera también colaboraron, por mínimo que haya sido.

Validación de modelos de turbulencia con Teledetección para el estudio de la recirculación de plumas térmicas en zonas costeras. Aplicación a la descarga de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, México.

por

Luis Fernando Laguna Zarate

Resumen

En el presente trabajo se estudia, mediante modelación numérica y con apoyo de teledetección, la dispersión térmica de la pluma de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde (CNLV), Veracruz, localizada en la costa del Golfo de México. Se llevaron a cabo simulaciones numéricas con el modelo Delft3D-FLOW para dos escenarios, invierno y primavera, para los cuales se detectó previamente con la teledetección, la recirculación de la pluma hacia la obra de toma de la CNLV, situación no favorable para su rendimiento. El modelo se calibró y validó, mediante un proceso exhaustivo, con apoyo de las imágenes de la teledetección, con diferentes grosores de malla. Además, se llevó a cabo un análisis del proceso termodinámico que ocurre durante la descarga de agua caliente en el mar, mediante un análisis con parámetros adimensionales característicos de los fenómenos de convección natural, forzada y mixta. Asimismo, los resultados del modelo numérico se utilizaron para investigar sobre el rendimiento de los modelos de turbulencia AEM, $k - L$ y $k - \varepsilon$, disponibles en el Delft3D-FLOW. La contribución del modelo de turbulencia HLES también se analizó. Los resultados mostraron que la convección forzada es predominante cerca de la zona de la descarga de la pluma térmica y en la zona cercana a la obra de toma. De acuerdo con las métricas calculadas, todos los modelos de turbulencia reproducen con buena aproximación la pluma, comparando los resultados con las imágenes de la Teledetección, excepto cuando se considera el esquema HLES del modelo numérico. Por último, las simulaciones numéricas proveen información valiosa para el estudio de este tipo de dispersiones térmicas en el mar, más allá de las limitaciones de otras técnicas de monitoreo. Sin embargo, su uso combinado es útil para una mejor comprensión de la dispersión de plumas térmicas.

Turbulence modeling validation using Remote Sensing to study the recirculation of thermal plumes on coastal zones. Case study: Laguna Verde Nuclear Power Plant, Mexico.

by

Luis Fernando Laguna Zarate

Abstract

This investigation studies, by numerical modeling and remote sensing, the thermal dispersion of a plume discharged into the sea by the Laguna Verde Nuclear Power Plant (LVNPP), located in Veracruz, Mexico. Numerical simulations were carried out with the Delft3D-FLOW model for two seasonal scenarios, winter and spring, where in both of them the thermal plume recirculation towards the intake area of LVNPP was detected, a non-favorable situation for the LVNPP's performance. The model was calibrated and validated, through an exhaustive process, by using remote sensing images and several grid sizes. Moreover, a thermodynamic process analysis was carried out during the warm water discharge by means of dimensionless parameters associated with natural, forced or mixed convection phenomenon. Furthermore, the numerical model results were employed to investigate the performance of the AEM, $k - L$ and $k - \varepsilon$ turbulence models, available in the Delft3D-FLOW model. The contribution of the HLES turbulence model was also analyzed. The results show that forced convection is predominant at the vicinity of the plume discharge zone and near the intake structure. According to the metrics computed, all turbulence models produced good agreement with the remote sensing data, except when the HLES model was considered. Finally, from the numerical simulations valuable information can be obtained to study this type of thermal dispersion on the sea, beyond the individual limitations of other thermal plumes monitoring methods. Nonetheless, their combined use is useful to better understand thermal plumes dispersion.

Contenido

	Pag
Resumen	VII
Abstract	VIII
Índice	IX
Lista de Figuras	XII
Lista de Tablas	XVI
Lista de Acrónimos	XVII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y CONTEXTO	2
1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	5
1.4 OBJETIVOS.....	6
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.4.1 OBJETIVOS PARTICULARES	6
1.5 ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN.....	7
1.6 PRINCIPALES CONTRIBUCIONES.....	8
1.7 ESTRUCTURA DE LA DISERTACIÓN.....	9
2. LAS DESCARGAS TÉRMICAS EN MEDIOS MARINOS	11
2.1 GENERALIDADES	11
2.2 EL PROBLEMA DE LA RECIRCULACIÓN EN LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO ABIERTOS	15
2.2.1 En la generación de energía.....	16
2.2.2 Impacto al medio ambiente.....	17
2.3 MÉTODOS DE MONITOREO DE DESCARGAS TÉRMICAS	18
2.3.1 Equipo de medición en campo	18
2.3.2 Teledetección.....	24
2.3.3 Simulaciones numéricas.....	26
2.4 REVISIÓN DE LA LITERATURA ESPECIALIZADA.....	27
2.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	40
3. LA CFD EN LOS PROBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MEZCLADO..	42
3.1 INTRODUCCIÓN	42
3.2 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN	44
3.2.1 Ecuación de conservación de masa.....	45
3.2.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento	45

3.2.3 Ecuación de conservación de la energía	46
3.3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN NUMÉRICA.....	47
3.3.1 Diferencias finitas.....	47
3.3.2 Elemento Finito	48
3.3.3 Volumen Finito	49
3.4 MODELACIÓN DE LA TURBULENCIA	50
3.4.1 Simulaciones numéricas directas (DNS).....	51
3.4.2 Large Eddy Simulation (LES)	52
3.4.3 Técnica RANS.....	54
3.5 ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL MOVIMIENTO DE LAS AGUAS SOMERAS	60
3.6 MODELOS HIDRODINÁMICOS CON CAPACIDAD DE SIMULAR LA DISPERSIÓN TÉRMICA	62
3.6.1 Mike 3.....	63
3.6.2 FLOW-3D HYDRO	64
3.6.3 TELEMAC-MASCARET	65
3.6.4 EFDC Explorer	66
3.6.5 MOHID STUDIO.....	67
3.6.6 Delft3D	68
3.7 MODELO DELFT3D-FLOW	69
3.7.1 Sistemas de coordenadas en la horizontal	69
3.7.2 Malla vertical	71
3.7.3 Ecuaciones que describen el flujo de las aguas someras expresadas en coordenadas curvilíneas ortogonales	72
3.7.4 Modelación de la turbulencia en Delft3D-FLOW	76
3.7.5. Modelo Horizontal Large Eddy Simulation (HLES)	79
3.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	80
4. DESCARGA TÉRMICA DE LA CNLV	82
4.1 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO FÍSICO DE LA CNLV	82
4.1.1 Parámetros de succión y de descarga de la CNLV	83
4.1.2 Batimetría	84
4.2 CONDICIONES HIDROLÓGICAS, OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS DE LA ZONA.....	85
4.2.1 Análisis hidrológico	85
4.2.2 Datos oceanográficos	94
4.2.3 Datos meteorológicos	95

4.3 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LA DESCARGA TÉRMICA DE LA CNLV	99
4.3.1 Estudios en campo.....	99
4.3.2 Estudios con modelación numérica.....	101
4.3.3 Estudios con Teledetección.....	103
4.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	111
5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DELFT3D-FLOW A LA ZONA DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	113
5.1 INTRODUCCIÓN.....	113
5.2 EJECUCIÓN DEL MODELO DELFT3D-FLOW	114
5.2.1 Delimitación del dominio computacional	114
5.2.2 Mallas computacionales.....	114
5.2.3 Batimetría y puntos monitores	118
5.2.4 Selección de escenarios y periodos de simulación.....	119
5.2.5 Condiciones iniciales y de frontera	120
5.2.6 Esquema de solución numérico.....	123
5.2.7 Calibración y validación de las simulaciones numéricas	123
5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS.....	131
5.3.1 Campos de temperatura	131
5.3.2 Números adimensionales en procesos termodinámicos	138
5.3.3 Interpolación pesada.....	140
5.3.4 Análisis por escenarios	142
5.4 COMPARATIVO DE EFICACIA ENTRE LOS MODELOS DE TURBULENCIA	162
5.5 CONCLUSIONES DEL CAPITULO.....	164
6. CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS	167
6.1 CONCLUSIONES GENERALES.....	167
6.2 PERSPECTIVAS	171
Bibliografía	173
Anexos	180
Apéndice A.....	180
Apéndice B.....	189
Apéndice C.....	213

Lista de Figuras

Figura 2.1: Diagrama de una Central Nucleoeléctrica.	13
Figura 2.2: Diagrama de un sistema de enfriamiento abierto.	14
Figura 2.3: Diagrama de un sistema de enfriamiento cerrado.	14
Figura 2.4: Partes de la CNLV.	15
Figura 2.5: Perfilador, marca CastAway-CTD.	18
Figura 2.6: Ejemplo de mediciones obtenidas con CTD.....	19
Figura 2.7: Sonda multiparamétrica.....	19
Figura 2.8: Termistores.	20
Figura 2.9: Termómetro portátil.....	20
Figura 2.10: Perfilador Acoustic Doppler Current Profiler.	21
Figura 2.11: Advanced Doppler Velocimetry.	21
Figura 2.12: Remote Operative Vehicle.....	22
Figura 2.13: Boyas oceanográficas.....	22
Figura 2.14: Ejemplo de isotermas generadas con mediciones in situ en la CNLV.	23
Figura 2.15: Fuentes de radiación utilizadas en Teledetección.	25
Figura 2.16: Ejemplo de isotermas generadas con teledetección.	25
Figura 2.17: Ejemplo de pluma térmica generada con simulación numérica.	27
Figura 3.1: Volumen de control fijo.	44
Figura 3.2: Discretización con el método de diferencias finitas.	48
Figura 3.3: Discretización con el método de elemento finito.....	49
Figura 3.4: Discretización con el método de volumen finito.	49
Figura 3.5: Fluctuaciones de una cantidad turbulenta.....	54
Figura 3.6: Sistema de coordenadas curvilíneo (ξ, η)	70
Figura 3.7: Mapeo del espacio físico al espacio computacional.	70
Figura 3.8: Malla 3D tipo Arakawa-C.....	71
Figura 3.9: Ejemplo de malla tipo σ (izquierda) y malla tipo Z (derecha)..	72
Figura 4.1: Ubicación de la CNLV.....	83
Figura 4.2: Escolleras de la CNLV.....	84
Figura 4.3: Batimetría de la zona de estudio.....	84

Figura 4.4: Cuenca “El Viejón”	85
Figura 4.5: Perfil topográfico del cauce principal.....	86
Figura 4.6: Pendiente del cauce principal obtenida por el método de áreas iguales	87
Figura 4.7: Pendiente del cauce principal calculada con la fórmula de Taylor-Schwarz...88	
Figura 4.8: Comparativo gráfico de las cuatro distribuciones de probabilidad.	91
Figura 4.9: Curvas I-D-Tr para la zona de estudio	93
Figura 4.10: Gasto pico por el método racional.....	93
Figura 4.11: Pronóstico de mareas anuales en la CNLV.	94
Figura 4.12: Corrientes superficiales cercanas a la costa Veracruzana.....	95
Figura 4.13: Humedad relativa en el puerto de Veracruz.....	96
Figura 4.14: Radiación solar media de México, en (MJ/m ²): (a) primavera, (b) verano (c) otoño y (d) invierno.....	97
Figura 4.15: Rosa de los vientos de la CNLV para el periodo de 1980-2009: (a) Frecuencia y dirección. (b) Intervalo de rapidez.....	97
Figura 4.16: Temperaturas anuales reportadas por la estación climatológica LA MANCHA: (a) Máximas y mínimas. (b) Promedio.. ..	98
Figura 4.17: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV medida el 29 de enero de 2003.. ..	99
Figura 4.18: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV medida en mayo de 2011.	100
Figura 4.19: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV medida en enero de 2012.....	100
Figura 4.20: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV medida en julio de 2013.....	101
Figura 4.21: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV generada con el modelo Stolzembach -Harleman en 1993.....	102
Figura 4.22: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV generada con simulación numérica.....	102
Figura 4.23: Ubicación de los monitores de la SEMAR.. ..	108
Figura 4.24: Regresión lineal de las cuatro imágenes utilizadas en el proceso de validación.....	109
Figura 4.25: Isotermas obtenidas con Teledetección: (a) 25/01/2017; (b) 17/05/2017; (c) 19/09/2016; (d) 08/10/2017.....	110
Figura 5.1: Dominio computacional seleccionado para realizar las simulaciones.	115
Figura 5.2: Mallas computacionales:	116
Figura 5.3: Corte transversal en la malla 3 y su discretización vertical.	117

Figura 5.4: Batimetría y puntos monitores.....	118
Figura 5.5: Asignación de las condiciones iniciales y de frontera.....	121
Figura 5. 6: Magnitud de la velocidad de las corrientes marinas:	121
Figura 5.7: Tren de mareas: (a) Invierno; (b) Primavera	122
Figura 5.8: Radiación solar de la zona cercana a CNLV: (a) Invierno; (b) Primavera.....	122
Figura 5.9: Rosa de los vientos de la zona cercana a CNLV: (a) Invierno; (b) Primavera.	123
Figura 5.10: Puntaje de la métrica NS y tiempo de cómputo para las 5 mallas, escenario de primavera: (a) Sin HLES; (b) con HLES	127
Figura 5.11: Comparativo de temperaturas para la malla 3, escenario de invierno.	129
Figura 5.12: Comparativo de temperaturas para la malla 1, escenario de primavera.	129
Figura 5.13: Comparativo de temperaturas para la malla 2, escenario de primavera.	129
Figura 5.14: Comparativo de temperaturas para la malla 3, escenario de primavera.	130
Figura 5.15: Comparativo de temperaturas para la malla 4, escenario de primavera.	130
Figura 5.16: Comparativo de temperaturas para la malla 5, escenario de primavera.	130
Figura 5.17: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 3, escenario de invierno, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \varepsilon$ con HLES; (d) $k - \varepsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.	132
Figura 5.18: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 1, escenario de primavera, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \varepsilon$ con HLES; (d) $k - \varepsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.....	133
Figura 5.19: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 2, escenario de primavera, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \varepsilon$ con HLES; (d) $k - \varepsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.....	134
Figura 5.20: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 3, escenario de primavera, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \varepsilon$ con HLES; (d) $k - \varepsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.....	135
Figura 5.21: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 4, escenario de primavera, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \varepsilon$ con HLES; (d) $k - \varepsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.....	136
Figura 5.22: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 5, escenario de primavera, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \varepsilon$ con HLES; (d) $k - \varepsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.....	137
Figura 5.23: Esquema utilizado en la interpolación pesada.....	140

Figura 5.24: Re vs X^* para el escenario de primavera:	145
Figura 5.25: Frd vs X^* para el escenario de primavera:	146
Figura 5. 26: Gr vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.....	147
Figura 5. 27: Pe vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.....	148
Figura 5.28: Frd vs T^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.....	149
Figura 5.29: S vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.....	150
Figura 5.30: U^* vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.....	151
Figura 5.31: vt^* vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.....	152
Figura 5.32: k^* vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.....	153
Figura 5.33: ε^* vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.....	154
Figura 5.34: Ri vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.....	155
Figura 5.35: $FD(T)$ vs U^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.	156
Figura 5.36: $FD(T)$ vs T^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.	157
Figura 5.37: Evolución de P7 a P1 de distintos números adimensionales para los diversos modelos de turbulencia considerados en el escenario de invierno: (a) Re ; (b) Frd ; (c) Gr ; (d) Pe ; (e) Frd vs T^* ; (f) S	160
Figura 5.38: Evolución de P7 a P1 para dos modelos de turbulencia considerados en el escenario de invierno de: (a) U^* ; (b) vt^* ; (c) k^* ; (d) ε^*	161
Figura 5.39: Comportamiento para diversos modelos de turbulencia considerados en el escenario de invierno de: (a) $FD(T)$ vs U^* ; (b) $FD(T)$ vs T^* ; (c) Ri vs X^*	162

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Clasificación de modelos de turbulencia bajo la técnica RANS	57
Tabla 3.2: Sitios web de los modelos hidrodinámicos descritos.	62
Tabla 4.1: Gasto y temperatura promedio de la CNLV	83
Tabla 4.2: Pendiente del cauce principal	88
Tabla 4.3: Comparativo del tiempo de concentración.....	89
Tabla 4.4: Características técnicas del Landsat 8.	105
Tabla 4.5: Errores de los campos de temperatura obtenidos con Teledetección.	108
Tabla 4.6: Características de las plumas térmicas obtenidas con Teledetección.....	111
Tabla 5.1: Características de las mallas	116
Tabla 5.2: Coordenadas de los puntos monitores.	119
Tabla 5.3: Inicializaciones consideradas para cada escenario.	120
Tabla 5.4: Valores finales obtenidos después de calibrar y validar las temperaturas.	124
Tabla 5.5: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de invierno en malla3.	125
Tabla 5.6: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de primavera en malla 1.	125
Tabla 5.7: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de primavera en malla 2.	125
Tabla 5.8: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de primavera en malla 3.	125
Tabla 5.9: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de primavera en malla 4.	125
Tabla 5.10: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de primavera en malla 5	126
Tabla 5.11: Definición de las variables adimensionales	138
Tabla 5.12: Valores de R^2 para el modelo AEM con HLES	163
Tabla 5.13: Valores de R^2 para el modelo AEM sin HLES	163
Tabla 5.14: Valores de R^2 para el modelo $k - \varepsilon$ con HLES.....	163
Tabla 5.15: Valores de R^2 para el modelo $k - \varepsilon$ sin HLES.....	163
Tabla 5.16: Valores de R^2 para el modelo $k - L$ con HLES	163
Tabla 5.17: Valores de R^2 para el modelo $k - L$ sin HLES.....	164

Lista de Acrónimos

AEM	Algebraic Eddy Viscosity Model
CICESE	Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CGE	Central de Generación de Electricidad
CN	Central Nucleoeléctrica
CNLV	Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde
CONABIO	Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CT	Central Termoeléctrica
DNS	Direct Numerical Simulation
HLES	Horizontal Large Eddy Simulation
HYCOM	HYbrid Coordinate Ocean Model
IITCA	Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua UAEMéx
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LES	Large Eddy Simulation
MIA	Manifestación de Impacto Ambiental
NS	Nash-Sutcliffe Error
m	Mass Balance Error
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RMSE	Root Mean Square Error
SEMAR	Secretaría de Marina
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SST	Sea Surface Temperature
TIRS	Thermal Infrared Sensor

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Esta investigación contribuye al conocimiento técnico científico de la recirculación de las plumas térmicas en la zona costera, cuando son emitidas por las Centrales de Generación de Energía (CGE) como las Centrales Termoeléctricas (CT) o las Centrales Nucleoeléctricas (CN). Se involucran varias disciplinas directamente, como la Medición Experimental *in situ*, Calidad del Agua, Teledetección, Dinámica de Fluidos, Turbulencia y Análisis Numérico. Indirectamente se involucran la Oceanografía, la Meteorología y la Hidrología. Todas estas disciplinas se combinan para cumplir el propósito de este trabajo de investigación, que es el de aportar conocimiento indagando en las escalas más finas del movimiento, en un problema de dispersión de un contaminante en un medio marino costero, en este caso, la temperatura.

La parte medular de este trabajo se basa en tres disciplinas: la Mecánica de Fluidos, la Teoría de la Turbulencia y el Análisis Numérico; elementos fundamentales y constituyentes de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Específicamente, se vincula la CFD con la modelación de la turbulencia por medio del uso de un modelo hidrodinámico y de dispersión térmica el cual es capaz de caracterizar plumas térmicas en zonas costeras y de representar con distintas metodologías diversas escalas de la turbulencia. Así, es posible generar análisis integrales de la dinámica ambiental de cuerpos de aguas costeros. Lo anterior es relevante dado que los resultados numéricos obtenidos al considerar uno u otro método para representar a la turbulencia pudieran estar sobrestimados o subestimados con respecto a un valor esperado. Analizar con una mejor certidumbre la dispersión térmica en zonas costeras generada por las

descargas de las CGE contribuye al conocimiento técnico-científico de la fenomenología que rige este comportamiento y que incide directamente en el control y manejo del organismo operador de las CGE.

Por lo anterior, queda claro que es justificable realizar investigación en el tema, pues la dispersión térmica no ha sido totalmente explorada y sigue siendo de interés para la comunidad científica nacional e internacional.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y CONTEXTO

Las zonas costeras son lugares ideales para la operación de CGE debido a la vasta disponibilidad de agua de mar, la cual es utilizada para fines de enfriamiento de los sistemas de generación. En el caso particular de las CN, el requerimiento de agua resulta ser mayor pues su demanda se incrementa entre un 30% y 100%; el cual es un incremento notorio respecto a otras fuentes que tienen una producción de energía eléctrica similar [1]. Al completarse el ciclo de enfriamiento, el agua tomada originalmente es regresada al mar observando mayor temperatura. Este gradiente de temperatura genera contaminación en forma de plumas térmicas que terminan mezclándose con el mar.

Desde un punto de vista ambiental, las plumas térmicas provocan un desequilibrio en el hábitat marino y son perjudiciales para la vida marina debido a que un incremento de temperatura, más allá de la temperatura ambiente, constante y por largos periodos de tiempo, puede alterar el fitoplancton y el zooplancton de un ecosistema repercutiendo en las cadenas tróficas y de reproducción; consecuentemente, se modifican los ciclos biogeoquímicos de las especies endémicas de la zona en estudio, desencadenando en una serie de eventos dañinos que gradualmente incrementan en severidad [2, 3].

Desde un punto de vista operacional, la eficiencia de los sistemas de enfriamiento de las CGE puede verse comprometida si la pluma térmica recircula hacia la obra de toma. Esto puede traducirse en una generación de energía eléctrica reducida y puede reflejar también pérdidas económicas considerables.

Por las razones previamente mencionadas, la dispersión de dichas plumas térmicas debe ser analizada y monitoreada para identificar su área de influencia y sus efectos. En las zonas costeras, el monitoreo se ha llevado a cabo con distintos métodos. Uno de ellos es la medición *in situ* la cual puede hacerse por medio de termistores, cadenas de

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y CONTEXTO

termistores, sondas multiparamétricas, CTDs (Conductivity, Temperature, and Depth), entre otras.

Existe otra alternativa para el monitoreo conocida como Teledetección, la cual provee de una visión sinóptica de la temperatura en cuerpos de agua [4, 5] y se ha utilizado para estudiar las plumas térmicas [6-8], debido a que con ella es posible el monitoreo de la dinámica espaciotemporal de la temperatura superficial del agua [9]. La Teledetección necesita calibrar las imágenes satelitales con mediciones *in situ* para ampliar su validez al área de influencia de la pluma térmica [10]. En apoyo a la Teledetección también existe la toma de videos y fotografías con drones de alta resolución, la cual ofrece ventajas de que los vuelos pueden ser programados en la fecha y hora que se requieran.

Otro método de monitoreo es la CFD la cual simula con un modelo numérico las plumas térmicas en ambientes marinos costeros. Si la dispersión térmica se analiza con CFD y además se complementa con otras técnicas de monitoreo de plumas térmicas, se obtiene un panorama integral del fenómeno en estudio. Utilizar CFD no es tarea trivial debido a la gran cantidad de variables que deben considerarse para estudiar apropiadamente la dispersión térmica en zonas costeras, Más aún, es importante la experiencia de investigadores reconocidos, pues no debe olvidarse que una modelación numérica hecha con CFD, por más sofisticada que sea, es una simplificación de la realidad. Por ello, los resultados obtenidos requieren de interpretación, validación y justificación. El nivel de precisión de la predicción obtenida depende de factores como los mencionados anteriormente y los inherentes a toda simulación numérica, por ejemplo, el tipo y nivel de discretización de las ecuaciones, las condiciones iniciales y de frontera, la convergencia del esquema numérico, etc. También está el aspecto de los recursos computacionales disponibles, pues una computadora poderosa permitirá considerar la complejidad que conlleva simular este tipo de fenómenos en un tiempo razonable.

En la zona costera convergen diversos procesos físicos complejos los cuales, para representarlos apropiadamente, es conveniente utilizar la técnica CFD. Esto es debido a que la CFD, en sus fundamentos, utiliza los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y de energía. Dichos principios son expresados por medio de ecuaciones matemáticas simplificadas conocidas como las ecuaciones de continuidad, las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación para la temperatura, respectivamente.

Las ecuaciones de Navier-Stokes aplicadas a problemas hidráulicos permiten modelar cuerpos de agua pues con ellas se pueden considerar variables de gran escala como la velocidad del agua horizontal y vertical, la variación de la superficie libre, etc. Las ecuaciones de Navier-Stokes para los problemas de dispersión térmica se resuelven acopladamente con la ecuación de continuidad y la de transporte de temperatura. También, es posible conocer el valor de las variables de pequeña escala asociadas a la turbulencia como son la viscosidad turbulenta (ν_t), la tasa de energía cinética (k) y su tasa de disipación (ε). Una manera preferida para determinar los valores de las últimas escalas es el de efectuar un promedio estadístico a las ecuaciones de Navier-Stokes, el cual deriva en las ecuaciones conocidas como Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Detalles de las ecuaciones RANS y de las metodologías existentes para determinar los valores de pequeña escala pueden consultarse en la subsección 3.5.3.

A pesar de que en años recientes diversos modelos hidrodinámicos se han empleado para analizar las plumas térmicas generadas por las descargas de CGE [11-16], los efectos de transporte de pequeña escala de las plumas térmicas descargadas en cuerpos de agua son raramente estudiados [17]. Más aún, los efectos de la viscosidad y difusividad turbulenta son modelados con constantes, o en el mejor de los casos con simples fórmulas algebraicas [18]. En ocasiones, dichos efectos son analizados al emitir plumas térmicas cuando el agua se encuentra estancada (quieta). Además, en la zona costera, resultados tanto numéricos como experimentales han evidenciado que la difusión vertical es tan importante como la horizontal [19] y distintos valores para ambas difusividades deben considerarse. Por lo tanto, para conseguir una mejor comprensión respecto a la dinámica descargada en el mar, sus características se deben analizar en agua en movimiento [20]. Las plumas térmicas emitidas por CGE son consideradas plumas térmicas que tienen un patrón de comportamiento mixto desde plumas forzadas hasta un chorro libre [21].

La modelación de la turbulencia a diferentes escalas demanda recursos computacionales por lo que, mientras más sofisticado sea el modelo de turbulencia, mayores recursos son necesarios para almacenar y procesar datos. Aunado a lo anterior, análisis rigurosos del desempeño de diversos modelos de turbulencia no es frecuente realizarlos al lidiar con problemas de índole ambiental. La mayoría de los modelos de turbulencia se basan en la aproximación RANS, utilizados para caracterizar las escalas pequeñas en términos del tiempo y del espacio [22]. Se pueden encontrar en la literatura científica modelos de

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y CONTEXTO

turbulencia del tipo RANS simples, conocidos como modelos de cero ecuaciones, los cuales consideran variables medias y en donde el movimiento turbulento es agrupado en una escala energética [23, 24]. También hay otros modelos de turbulencia más elaborados de una y dos ecuaciones, como los modelos $k - L$ y $k - \varepsilon$, respectivamente. Dichos modelos de turbulencia, disponibles en modelos hidrodinámicos y de dispersión térmica tanto del tipo libre (Open Source) como comercial, han sido aplicados a una gran variedad de flujos en muchas pruebas y aplicaciones, alcanzando un éxito razonable [25]. Adicionalmente, al seleccionar un modelo de turbulencia en particular, deben tomarse en cuenta factores como la experiencia del usuario, recursos computacionales y la información disponible para la correcta calibración y validación de sus coeficientes.

Existen alternativas a los modelos tipos RANS, una se conoce como modelos tipo Large-Eddy Simulación (LES) y otra como Direct Numerical Simulation (DNS). En la primera, todo el movimiento turbulento es resuelto con la escala de malla y las fluctuaciones son modeladas por un modelo de escala de sub-malla. Algunas simulaciones numéricas con modelos tipos LES relacionadas al flujo de aguas someras controlado pueden ser consultadas en [26]. Sin embargo, en problemas reales de aplicación práctica su desempeño no ha sido totalmente explorado. De la segunda alternativa su factibilidad de uso es reducida debido a la excesiva demanda de recursos computacionales, limitándola entonces para casos donde se presenten números de Reynolds pequeños.

México actualmente cuenta con solo una CN para la generación de energía. Ella es conocida como la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde (CNLV) y, al igual que otras fuentes de generación de electricidad, también produce contaminación térmica en la zona costera aledaña a su ubicación. Dado a que contados estudios se han realizado respecto al análisis de dicha contaminación [27-29], que tiene impacto ambiental y operacional, así como al desempeño no explorado de los modelos de turbulencia en este tipo de escenarios, resulta ser un caso apropiado para abordar la problemática antes expuesta por medio de simulaciones numéricas.

1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Al revisar la literatura científica especializada en la dispersión de plumas térmicas emitidas por CGE y que son vertidas al mar, no se encontraron publicaciones en donde se observe que un modelo hidrodinámico y de dispersión térmica fuera calibrado con imágenes generadas con Teledetección. Además, no existen suficientes aportaciones

científicas que analicen la pertinencia de diversos modelos de turbulencia en la caracterización de plumas térmicas. Más aun, no se encontró evidencia alguna que presente análisis termodinámicos y ambientales basados en números adimensionales que ayuden a mejorar la comprensión de las plumas térmicas en aguas costeras.

Esta tesis se enfocará en responder lo siguiente:

- ¿Es una opción factible calibrar un modelo hidrodinámico y de dispersión térmica que permita simular dispersión térmica con información obtenida de imágenes generadas con la técnica de Teledetección?
- ¿Qué diferencias se observarán en la dispersión de plumas térmicas utilizando distintos modelos de turbulencia y cuál modelo puede ser el más apropiado para caracterizarlas?
- ¿Cuál es el estado termodinámico y ambiental de la zona costera al ser afectada por contaminación térmica?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis exhaustivo de la dispersión térmica de una CGE en el mar, mediante simulación numérica y con apoyo de teledetección, como herramienta de calibración y validación, indagando en las escalas más finas del movimiento, inmersas en los procesos de la termodinámica marina.

1.4.1 OBJETIVOS PARTICULARES

El presente trabajo de investigación posee los siguientes objetivos específicos:

1. Seleccionar los escenarios de análisis con ayuda de imágenes de teledetección.
2. Calibrar y validar rigurosamente el modelo Delft3D-FLOW por medio de información extraída de las imágenes de teledetección.
3. Analizar la pertinencia de diversos modelos de turbulencia incluidos en el Delft3D-FLOW en la simulación de la pluma térmica de la CNLV.
4. Identificar y caracterizar, mediante un análisis de números adimensionales, la fenomenología metoceánica del proceso de dispersión térmica costera.

5. Poner de manifiesto las ventajas que ofrece el uso complementario de dos técnicas de análisis del fenómeno de dispersión térmica en el mar: la teledetección y la modelación numérica.

1.5 ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

Esta investigación contribuye al conocimiento de la problemática antes expuesta, al proveer de los elementos físicos, ambientales y numéricos que permiten mejorar el conocimiento de la dispersión de plumas térmicas en zonas costeras. Para esto, se requerirán de dos útiles técnicas para el monitoreo de plumas térmicas: la Teledetección y la CFD. La primera permite observar el estado estacionario de una pluma térmica y servirá como base para la calibración de un modelo hidrodinámico y de dispersión térmica. La segunda es implementando el modelo hidrodinámico Delft3D-FLOW, el cual permite observar los estados estacionarios y no estacionarios de plumas térmicas; además de que con ello permite extraer información que no se obtiene con la primera técnica. Algunos trabajos se han llevado a cabo para describir el diseño [30], desarrollo [31] y validación [32] del modelo Delft3D-FLOW. Este modelo tiene disponible cuatro modelos de turbulencia para simulaciones en 3D tipo RANS: coeficientes constantes, AEM, $k - L$ y la versión estándar del $k - \varepsilon$. En esta disertación solo se utilizan los últimos tres. Además, dispone de un modelo de turbulencia de submalla denominado HLES para simulaciones en 2D. Los fundamentos de estos modelos pueden ser consultados a detalle en [33] y son brevemente resumidos en el Capítulo 3. Utilizar cada modelo de turbulencia tiene implicaciones en los resultados numéricos obtenidos, pues como ya se mencionó, los resultados pueden estar sobreestimados o subestimados al utilizar uno u otro modelo en las simulaciones numéricas. Por tanto, se realizarán una serie de comparaciones entre distintas simulaciones utilizando estos 3 modelos de turbulencia en combinación con el esquema HLES a fin de determinar su pertinencia en la caracterización de plumas térmicas en medios marinos. Adicionalmente, para conocer mejor el estado termodinámico y ambiental de la zona costera, se hará un análisis de los procesos de transferencia de calor involucrados por medio de números adimensionales.

1.6 PRINCIPALES CONTRIBUCIONES

Derivado de los resultados obtenidos en la presente investigación, se evidencian las siguientes contribuciones principales:

- Revisión del estado del arte (literatura especializada) en plumas térmicas de las últimas 2 décadas.
- Recopilación, depuración y tratamiento apropiado de información necesaria (oceanográfica, atmosférica, hidrológica, ambiental y de operación de la CNLV) para alimentar el modelo Delft3D-FLOW; información útil para investigaciones futuras.
- Una metodología para calibrar el modelo Delft3D-FLOW por medio de la extracción información de imágenes generadas con Teledetección y la posterior validación del modelo con 3 métricas que miden la eficiencia de las simulaciones.
- Se presenta y analizan dos escenarios en los que se observa recirculación térmica hacia la obra de toma de la CNLV. En el primero, elegido en la primavera del 2017, se consideraron 5 grados de mallado a fin de observar la variación de la precisión numérica por efecto del tamaño de celda en los resultados. En el segundo, solo se realizaron simulaciones para una sola malla en un escenario de invierno de 2017. En cada una de las simulaciones, sin importar la malla empleada, se utilizaron 3 modelos de turbulencia tipo RANS en combinación con uno tipo LES para evaluar la pertinencia de elegir uno u otro modelo de turbulencia sobre las simulaciones de descargas térmicas.
- Se muestran los valores óptimos obtenidos de los coeficientes de calibración, producto de haber realizado cientos de simulaciones variando dichos coeficientes con la técnica de prueba y error, para cada uno de los escenarios simulados.
- Un análisis de distintos procesos de transferencia de calor por medio de diversos números adimensionales en cada una de las mallas consideradas en esta investigación.
- La introducción de una cantidad adimensional denominada Factor de Densidad $F_{D(T)}$, cantidad en principio aceptada en la publicación científica emanada de esta disertación y puede consultarse en [34], como auxiliar para clasificar los regímenes de convección forzada, mixta y natural.

1.7 ESTRUCTURA DE LA DISERTACIÓN

El **Capítulo 1** presenta el contexto de la dispersión de las plumas térmicas emitidas por CGE, la contaminación térmica producida por ella y sus consecuentes problemáticas ambientales y operacionales. Complementando desde una perspectiva científica, se menciona la importancia del modelado de la turbulencia en la simulación numérica de plumas térmicas. Todo lo anterior es justificación suficiente para realizar la presente investigación. Adicionalmente, se presenta la estrategia de solución, las contribuciones principales y la estructura de la presente disertación.

En el **Capítulo 2** se describen los problemas generados por la recirculación de descargas térmicas, los métodos en cómo se monitorean dichas descargas y la revisión de la literatura científica especializada. Dicha revisión incluye un resumen de diversos artículos científicos que conforman al estado del arte relacionado a la dispersión térmica emitidas por CGE en las últimas 2 décadas.

Los fundamentos de la CFD se presentan en el **Capítulo 3**. Se presentan las bases teóricas detrás de los modelos hidrodinámicos y de dispersión térmica, algunos esquemas de solución numérica, una breve introducción a la modelación de la turbulencia, se mencionan algunos modelos hidrodinámicos disponibles en el mercado que sean capaces de reproducir la dispersión térmica emitida por CGE. Para concluir, se presenta un resumen de las características técnicas del modelo Delft3D-FLOW y se describen los modelos de turbulencia disponibles en Delft3D-FLOW.

El **Capítulo 4** presenta una descripción del entorno físico de la CNLV: su localización, los parámetros de operación de la CNLV, las condiciones hidrológicas, meteorológicas, ambientales y oceanográficas. También se mencionan los estudios previos efectuados en el lugar, siendo estos llevados a cabo con diversas técnicas como las mediciones *in situ*, la Teledetección y la aplicación de la CFD.

En el **Capítulo 5** se presenta la implementación del modelo Delft3D-FLOW a la zona de estudio. Se muestran los diversos parámetros considerados en las simulaciones, tales como las corrientes, marea, batimetría, caudal de descarga y aportaciones fluviales, etc. Los escenarios contemplados y los periodos de simulación definidos también son descritos. Se presenta la metodología de calibración utilizando imágenes de Teledetección. Después, se lleva a cabo el proceso de validación por medio de las

métricas Root Mean Square Error (RMSE), Nash-Sutcliffe (NS) y mass balance error (m) para garantizar el óptimo desempeño de las simulaciones generadas con Delft3D-FLOW.

Posteriormente se realiza un análisis de los procesos de transferencia de calor involucrados por medio de comparativas entre diversos números adimensionales, algunos clásicos de la mecánica de fluidos como el número de Reynolds, el número densimétrico de Froude, el número de Grashof, el número de Peclet y el número de Richardson. Adicionalmente, se analiza el comportamiento en versión adimensional de dos variables de gran escala: la velocidad y temperatura. Además, se efectúa el análisis del comportamiento de tres variables de pequeña escala: la viscosidad turbulenta, la energía turbulenta y su tasa de disipación. Complementando el análisis, se introduce la cantidad adimensional $F_{D(T)}$, nombrándolo en esta investigación como Factor de Densidad, como un auxiliar en la clasificación de los distintos regímenes de convección. Dicha cantidad adimensional fue utilizada en el artículo emanado de esta investigación, aceptado en una revista indizada en Scopus [34]. Se tiene la intención de patentar al $F_{D(T)}$ al explorarlo más a detalle. Finalmente, se lleva a cabo una comparativa entre los modelos de turbulencia utilizados con el objetivo de observar su pertinencia en la caracterización de plumas térmicas.

La presente disertación culmina con conclusiones generales, en donde se resaltan los principales hallazgos, los logros alcanzados y se da respuesta a las preguntas de investigación mostradas en este primer Capítulo. Adicionalmente, se mencionan las perspectivas futuras de investigación. Posteriormente, se incluyen las referencias consultadas.

En la sección de los Anexos, se incluyen: un artículo de investigación científica ya aceptado y publicado, un artículo de congreso y una breve guía para la compilación del código fuente del modelo Delft3D en su versión Open Source.

Capítulo 2

2. LAS DESCARGAS TÉRMICAS EN MEDIOS MARINOS

2.1 GENERALIDADES

La generación y distribución de energía eléctrica juega un factor clave en el desarrollo de cualquier país [35], pues actualmente varias de las actividades productivas y hasta el estilo de vida de ciertas poblaciones, dependen directamente de su continuo suministro. Para mantener y mejorar el grado de progreso nacional, México cuenta con los siguientes centros de transformación para la generación de energía eléctrica [36]: Coquizadoras y hornos, refinерías y despuntadoras, plantas de gas y fraccionadoras y, finalmente, las CGE. De las últimas, estas son catalogadas como: Públicas, Productores independientes de electricidad, Autogeneración y generadoras. Respecto a las CGE públicas, se cuentan con: Carboeléctricas, Nucleoeléctricas, Termoeléctricas, Hidroeléctricas, Geotermoeléctricas, Eoloeléctricas, y Fotovoltaicas. En específico de las Nucleoeléctricas, México hoy en día posee solamente una de su tipo, la CNLV, y es en la que se centra el presente trabajo de investigación.

Para producir electricidad, las CN utilizan la energía liberada en los procesos de fisión nuclear, por tanto, no emiten gases de efecto invernadero pues no necesitan de combustibles fósiles como fuente de energía primaria para operar. No obstante, las CN como todo tipo de tecnologías que producen energía eléctrica generan desperdicios,

particularmente radioactivos y térmicos, que se derivan de sus procesos operativos impactando con ello al medio ambiente [37]. Este trabajo solo se enfoca en el segundo tipo de contaminación.

Las CGE, sin importar su fuente de energía primaria (petróleo, gas, carbón, material radioactivo) utilizan el mismo principio para funcionar: convertir el calor en energía eléctrica. Dicha conversión consiste en tres etapas [38]:

1. Producir vapor a alta presión y temperatura producto de la fuente de energía.
2. Transformar la energía del vapor a movimiento de una turbina.
3. La rotación de una turbina es transmitida a un generador, produciendo así la energía eléctrica.

Particularmente, las CN son distintas al resto de las CGE por la primera etapa, esto es, la producción del vapor. A diferencia de las segundas que cuentan con una caldera donde, por ejemplo, se quema carbón o gas para producir vapor, en las primeras se cuenta con un reactor nuclear (que equivale a la caldera). La mayoría de los reactores tienen en común los siguientes componentes: combustible nuclear, moderador, contenedor, generador de vapor, barras de control, vasija del reactor o tubería presurizada, condensador, generador de electricidad y el fluido refrigerante. Detalles de los componentes puede consultarse en [39]. Del último componente, su función principal es la de mantener una temperatura estable en los distintos elementos dentro del reactor pues éstos aumentan su temperatura a consecuencia de la reacción nuclear. Algunos fluidos útiles para ello son el Helio, el agua pesada o la ligera (ordinaria). Un diagrama de una CN puede observarse en la Figura 2.1.

En el caso particular de la CNLV, el fluido refrigerante es agua desmineralizada la cual, dentro del ciclo termodinámico en el reactor, termina convertida en vapor para mover las turbinas. Posteriormente, dicho vapor de baja presión pasa a la caja del condensador para ser enfriado con agua del mar y regresar al estado líquido. Así, el agua de refrigeración calentada se devuelve al medio de donde se extrajo [38].

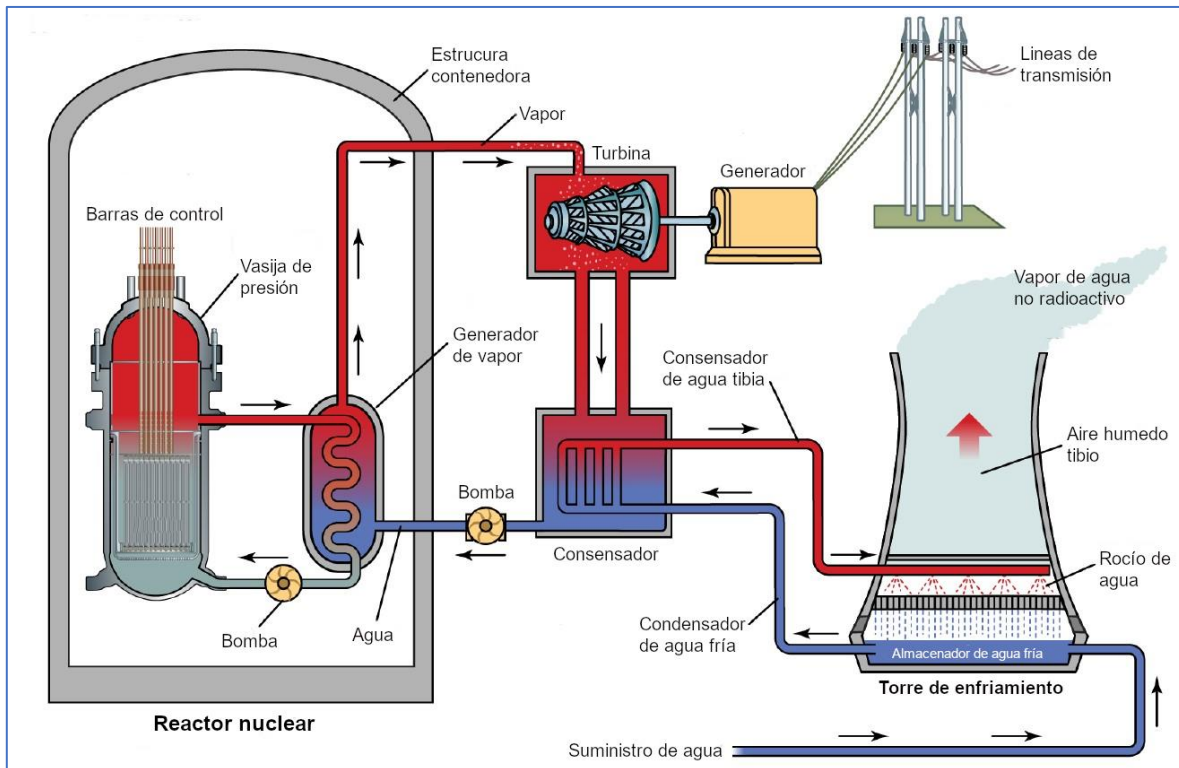


Figura 2.1: Diagrama de una Central Nucleoeléctrica. Adaptado de [40]

Respecto de los sistemas de refrigeración, algunas CN cuentan con torres de enfriamiento que remueven el calor residual hacia la atmosfera en forma de vapor caliente. Por el contrario, las CN que no cuentan con torres de enfriamiento depositan el calor residual en forma de agua caliente en un cuerpo de agua, que en el caso de la CNLV es el mar. Los sistemas de enfriamiento pueden ser abiertos, cerrados y, en contados casos, de aire. A estos sistemas también se les conoce como de enfriamiento directo o “un solo paso”, de enfriamiento indirecto o “recirculatorio” y enfriamiento en seco, respectivamente. Una breve descripción de los dos primeros sistemas se presenta a continuación:

Sistemas de enfriamiento abiertos. Este esquema, mostrado en la Figura 2.2, es el óptimo cuando la localización de una CGE es en zonas costeras, junto a un río caudaloso o un a cuerpo de agua grande. Esto es debido a que los condensadores necesitan de cantidades masivas de agua y deben ser suministradas a los condensadores en una “sola pasada” para posteriormente regresar dicha agua más caliente al mar o cuerpo de agua y sin mucha perdida de la cantidad extraída. Resulta ser el método más simple, por tanto, el más utilizado.

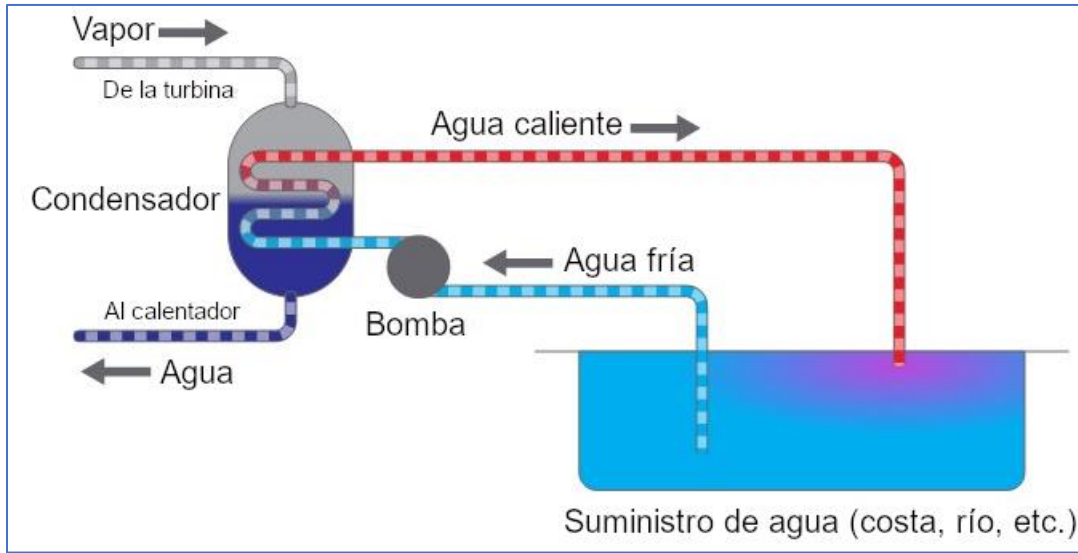


Figura 2.2: Diagrama de un sistema de enfriamiento abierto. Adaptado de [41]

Sistemas de enfriamiento cerrados. De no haber abundante agua disponible para la CGE, el enfriamiento puede realizarse cuando el vapor es pasado al condensador y posteriormente utilizar una torre de enfriamiento; donde aire con mayor altitud, haciendo uso de gotas diminutas de agua, enfría al agua. En su mayoría, el enfriamiento se hace por evaporación. La torre de enfriamiento evapora hasta el 5% del flujo y el agua enfriada regresa al condensador de la CGE (Figura 2.3). Esto forma un ciclo recirculatorio.

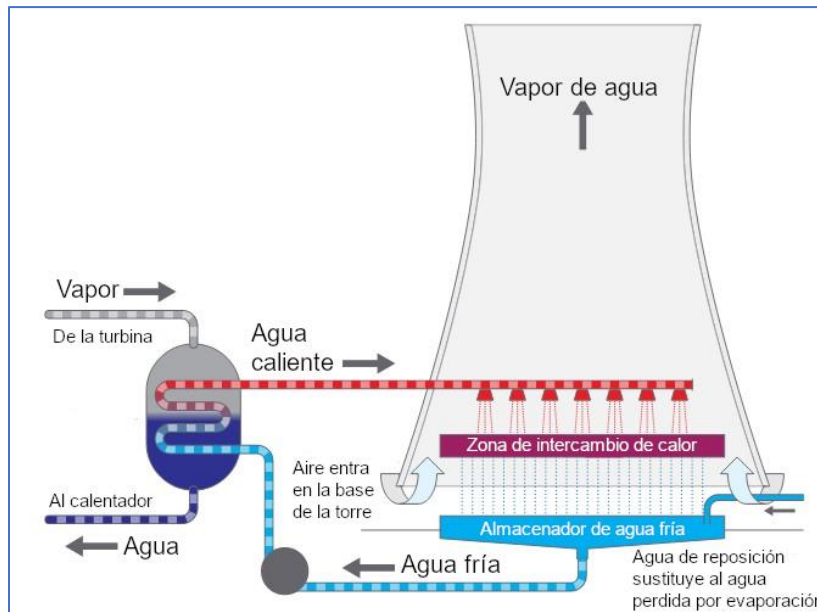


Figura 2.3: Diagrama de un sistema de enfriamiento cerrado. Adaptado de [41]

2.2 EL PROBLEMA DE LA RECIRCULACIÓN EN LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO ABIERTOS

La mayoría de las CN están ubicadas en zonas costeras para utilizar vastas cantidades de agua en su sistema de enfriamiento. Cuando el sistema es del tipo abierto, el calor residual volverá en el agua. Por tanto, es importante tomar en cuenta estas descargas que regresan al mar pues producen contaminación térmica [1, 42] que termina mezclándose en la zona costera. Esta contaminación debe ser analizada y monitoreada ya que, por un lado, ha sido catalogada como un agente amenazante de la composición ecológica en las aguas costeras [11] y, por otro lado, una porción de agua caliente regresa directamente a la obra de toma, afectando la eficiencia de las unidades operativas en las CN de una manera negativa [43]. A manera de ejemplo, en la Figura 2.4 se pueden observar algunas partes de la CNLV.



Figura 2.4: Partes de la CNLV.

Resulta entonces necesario analizar estas descargas que en la zona costera toman forma de plumas o penachos térmicos con el fin de no perjudicar la flora y fauna marina endémica, así como para evitar una recirculación de agua caliente que disminuya el rendimiento de los sistemas de enfriamiento.

2.2.1 En la generación de energía

La eficiencia de los sistemas de enfriamiento puede estar comprometida si la descarga térmica recircula hacia la obra de toma. La ubicación de la obra de toma debe de estar lo suficientemente alejada de la zona de descarga para que la pluma térmica se pueda desarrollar a fin de permitir que la temperatura de la pluma decaiga y la obra de toma reciba agua menos caliente. También el tamaño de la obra de toma y el sistema de descarga se deben elegir apropiadamente para prevenir la acumulación de agua caliente en la obra de toma y así evitar disminuir la eficiencia de los sistemas de enfriamiento [44].

Además, el diseño del sistema de enfriamiento debe considerar la variabilidad climática y su localización geográfica. Por ejemplo, en aguas influenciadas por la marea, la pluma térmica cambiara constantemente su forma y posición. Cuando el flujo de mareas sea fuerte, en los periodos en que tiene a medio inundar o cuando hay reflujo, la pluma estará elongada y se dispersara de forma paralela a la línea de costa; en condiciones de bajar, la pluma se expandirá radialmente mostrando anchura en su forma [45]. Adicionalmente debe tomarse en consideración los efectos de la variabilidad climática y del cambio climático de años recientes, ya que ellos tienen un efecto directo en la temperatura superficial del mar [46].

Por tanto, es necesario conocer los parámetros que definen y conducen la dispersión térmica [11-16]: la batimetría del lugar, información relacionada a la operación de la CGE, datos oceanográficos como corrientes, mareas, oleaje, salinidad, temperatura, densidad; datos hidrológicos, también datos meteorológicos como la velocidad y dirección del viento, radiación solar, humedad relativa, nubosidad, temperatura del aire, historial de precipitación.

Respecto a la conservación y mantenimiento de los sistemas de enfriamiento, una supervisión constante es sugerida para evaluar el impacto de la recirculación. Se pueden presentar casos en que los sistemas de enfriamiento puedan ser afectados por erosión y corrosión causadas por altas velocidades y temperaturas elevadas del agua, respectivamente. Dicha afectación, en consecuencia, disminuye la generación de electricidad por parte de la CGE. Más aún, es necesaria en la obra de toma evitar la intrusión de minerales granulados exógenos para proteger de daños severos a los sistemas de enfriamiento. El cribado mecánico es una práctica empleada en estos casos para reducir material, separarlo y finalmente, retirarlo. Además, naves denominadas dragas movilizan y recogen los sedimentos arenosos y arcillosos del fondo para evitar que

2.2 EL PROBLEMA DE LA RECIRC EN LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO ABIERTOS

se transporten con el agua que se usara en los sistemas de enfriamiento; dichos sedimentos son depositados posteriormente en lugares alejados de la costa.

El cuidado del medio ambiente es un tema latente de los últimos años. Dependiendo de la zona de descarga, las regulaciones suelen ser restrictivas con respecto a la temperatura permitida. Por ejemplo, en la Unión Europea algunos de sus países miembros no permiten que la temperatura máxima sea mayor a los 30 °C o que el incremento de temperatura no exceda de 1 °C [11]. En los casos en que no es posible cumplir con las regulaciones sanitarias o cuando aun cumpliéndolas persiste el fenómeno de recirculación de la pluma térmica en la superficie, se puede optar por una alternativa conocida como descarga submarina. Estas descargas se realizan por medio de tuberías submarinas (emisores) trasladando el flujo de agua caliente mar adentro lejos de la playa y de la obra de toma. [47]. En México, quien marca la pauta para restringir legalmente las máximas descargas de temperatura en las aguas nacionales es la NOM-001-SEMARNAT-1996. La Tabla 2 de dicha norma muestra la restricción a que la temperatura máxima, ya sea promedio diario o promedio mensual, sea de 40°C en las aguas costeras [48].

2.2.2 Impacto al medio ambiente

Al existir contaminación térmica en las aguas costeras, se pueden generar condiciones ambientales perjudiciales sobre el ecosistema marino. Dada la importancia de no alterar la cadena trófica del área costera, es imprescindible cumplir con las reglamentaciones ambientales para no perjudicar la flora y fauna del lugar.

En la zona denominada obra de toma, existe una extracción permanente de agua de mar hacia el circuito de enfriamiento. En esa zona y en el agua que circula hacia los condensadores, habitan diversas especies marinas clasificadas como macroorganismos (crustáceos, peces, moluscos, etc.) y microorganismos (como el fitoplancton, zooplancton y bacterias) [13], los cuales hay que tener en consideración con el fin de no perjudicarlos y que ellos no alteren el ciclo de enfriamiento.

En la zona adyacente a la descarga, el agua caliente es regresada al mar pudiendo alterar a la cadena trófica. Así, un efluente térmico con altas temperaturas podría disminuir el oxígeno disuelto del agua de mar pudiendo abarcar cientos de metros de impacto y provocar una disminución de la biomasa béntica, de biomasa microbiana, producción primaria y de biomasa del zooplancton [49] y de productividad total [50]. Algunos

organismos viven en un entorno natural cercano a su límite de tolerancia térmica, por lo que el calentamiento artificial de su hábitat sin duda les generaría daños irreversibles.

2.3 MÉTODOS DE MONITOREO DE DESCARGAS TÉRMICAS

Existen diversas técnicas para evaluar el efluente térmico de las CGE. Dichas técnicas varían desde mediciones *in situ*, monitoreo con percepción remota (satelital) y por medio de herramientas computacionales. La elección de cada técnica dependerá del alcance del monitoreo (espacial y temporal), la disponibilidad de recursos humanos y económicos y, además, de información relativa a la operación de la CGE aunada a condiciones atmosféricas y oceanográficas del lugar.

2.3.1 Equipo de medición en campo

Existen instrumentos para medir la temperatura superficial del mar. A continuación, se describen los más representativos.

- **Conductivity, Temperature, Depth (CTD)**

Es un instrumento (Figura 2.5) utilizado principalmente en aguas costeras con profundidades de hasta los 100 m para medir la conductividad, la temperatura y la presión del agua. El CTD lleva un contrapeso y se deja caer en caída libre hasta tocar fondo; cuenta con Global Positioning System (GPS, por sus siglas en inglés) por lo que registra la posición geográfica de cada punto de medición. El procesamiento de los datos consiste en eliminar los picos y promediar el descenso/descenso.



Figura 2.5: Perfilador, marca CastAway-CTD.

2.3 MÉTODOS DE MONITOREO DE DESCARGAS TÉRMICAS

Con este instrumento, se puede obtener información de la columna de agua en distintas profundidades. Debe mencionarse una desventaja de utilizar CTD: la información obtenida es puntual y limitada al periodo de medición. Un ejemplo de mediciones obtenidas con CTD se muestra en la Figura 2.6.

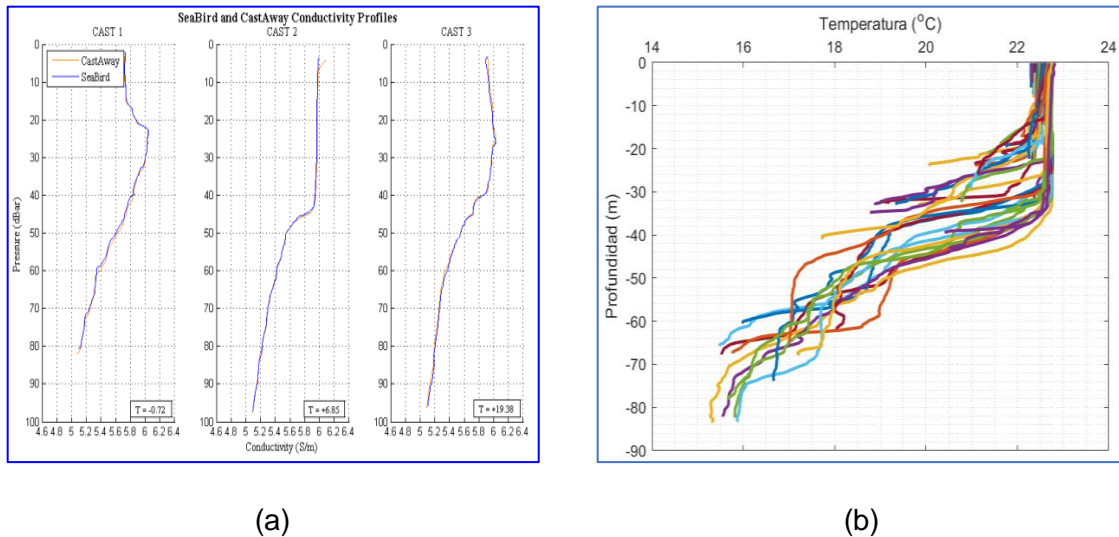


Figura 2.6: Ejemplo de mediciones obtenidas con CTD. Conductividad; (b) Temperatura.

- **Sondas multiparamétricas YSI.**

Son instrumentos (Figura 2.7) que miden parámetros fisicoquímicos para determinar la calidad del agua en lagos, mares, ríos, reservorios, canales, etc. Permiten operar para mediciones puntuales o en sistemas de medición continua. Pueden medir desde dos parámetros hasta diecisiete parámetros en forma simultánea, entre los cuales se tienen: conductividad, temperatura, salinidad, profundidad, pH, OD turbiedad, etc.



Figura 2.7: Sonda multiparamétrica.

- **Termistores y cadenas de termistores**

El HOB0 Water Temp Pro v2 (Figura 2.8) mide temperaturas hasta de 50 °C en el agua. Su estuche impermeable y aerodinámico permite un despliegue prolongado en agua dulce o salada. Además, la interfaz USB óptica permite descargar datos incluso cuando el registrador está mojado o bajo el agua. Se puede colocar uno solo o bien en cadena y se acopla con una boya para obtener datos en la columna de agua.

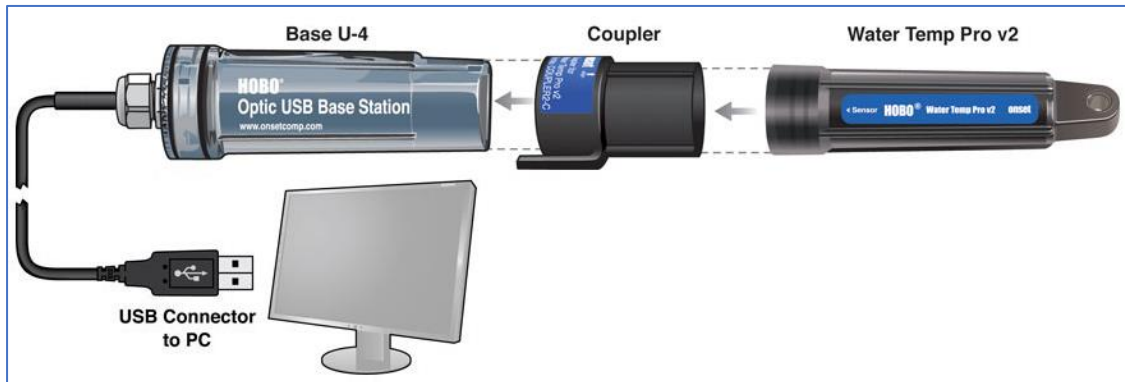


Figura 2.8: Termistores.

- **Termómetros portátiles**

Un termómetro digital permite brindar resultados fiables de manera instantánea. Pueden almacenar los datos de varios registros para diferentes sitios. Son utilizados cuando se toman muestras de agua para evaluar calidad del agua de un cuerpo de agua en laboratorio. La Figura 2.9 muestra un ejemplo de termómetro portátil.



Figura 2.9: Termómetro portátil.

- **Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)**

Esta herramienta se utiliza en diversos cuerpos de agua como lagos, canales, estuarios, ríos, océano, etc. (Figura 2.10). Su principio de trabajo es utilizar transductores piezoeléctricos para transmitir y recibir señales sonoras en un punto o trayecto. Principalmente está diseñado para la medición de la velocidad de corrientes de agua hasta cierta profundidad, sin embargo, acoplando sensores (termistores) de temperatura también es posible conocer la temperatura del agua.

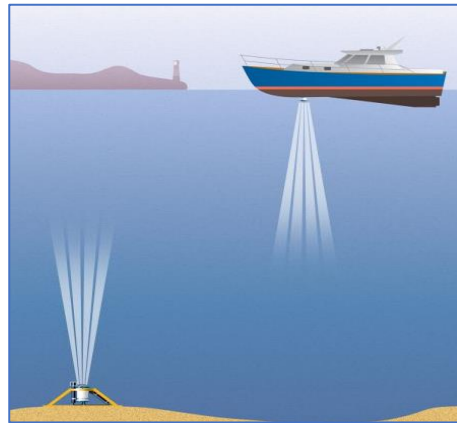


Figura 2.10: Perfilador Acoustic Doppler Current Profiler.

- **Advanced Doppler Velocimetry (ADV)**

Es un instrumento útil para medir variables de pequeña escala, como las variaciones de turbulencia, esfuerzos cortantes, esfuerzos de fondo, velocidades de sedimentación, etc. Es ideal para aguas someras (ríos, lagos, estuarios, zona costera, etc) o en instalaciones experimentales. Pueden realizar mediciones en 2D y 3D. Este instrumento se muestra en la Figura 2.11.

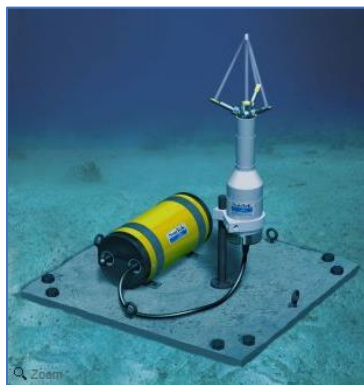


Figura 2.11: Advanced Doppler Velocimetry.

- **Remote Operative Vehicule (ROV)**

Son vehículos de operación remota, que pueden ser controlados desde una embarcación. Pueden ser autónomos o bien controlados con un cable. Puede contener cámaras de video que cubran los 360 grados, equiparse con algunos sensores para medir velocidades puntuales, temperatura, salinidad, etc. Son ampliamente utilizados en ambientes hostiles y de difícil acceso. Este vehículo se muestra en la Figura 2.12.

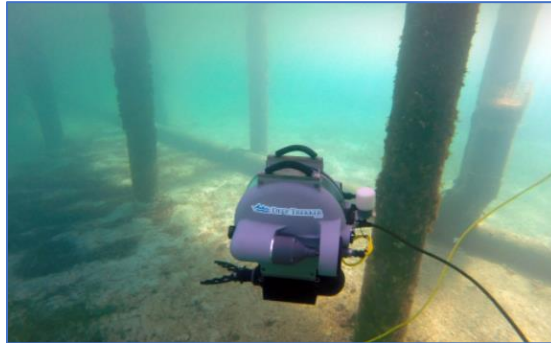


Figura 2.12: Remote Operative Vehicle.

- **Boyas Oceanográficas**

Son plataformas de instrumentación (Figura 2.13) versátiles, ideales para la recolección de datos aplicados a la oceanografía y meteorología. Pueden contener diversos sensores para medir calidad del agua, contener un ADCP o un ADV, para la medición de velocidades. Pueden medir datos meteorológicos como presión, viento, humedad relativa y temperatura atmosférica. Se pueden equipar con paneles solares, luces de navegación/advertencia. La gama de opciones para transmisión de datos puede ser por medio de telemetría UHF/VHF, GSM, GPRS o por satélite.



Figura 2.13: Boyas oceanográficas.

2.3 MÉTODOS DE MONITOREO DE DESCARGAS TÉRMICAS

Un ejemplo de monitoreo de una descarga térmica a través de mediciones en campo se ilustra en la Figura 2.14 donde se observan las diferentes isotermas generadas a partir de mediciones *in situ*.

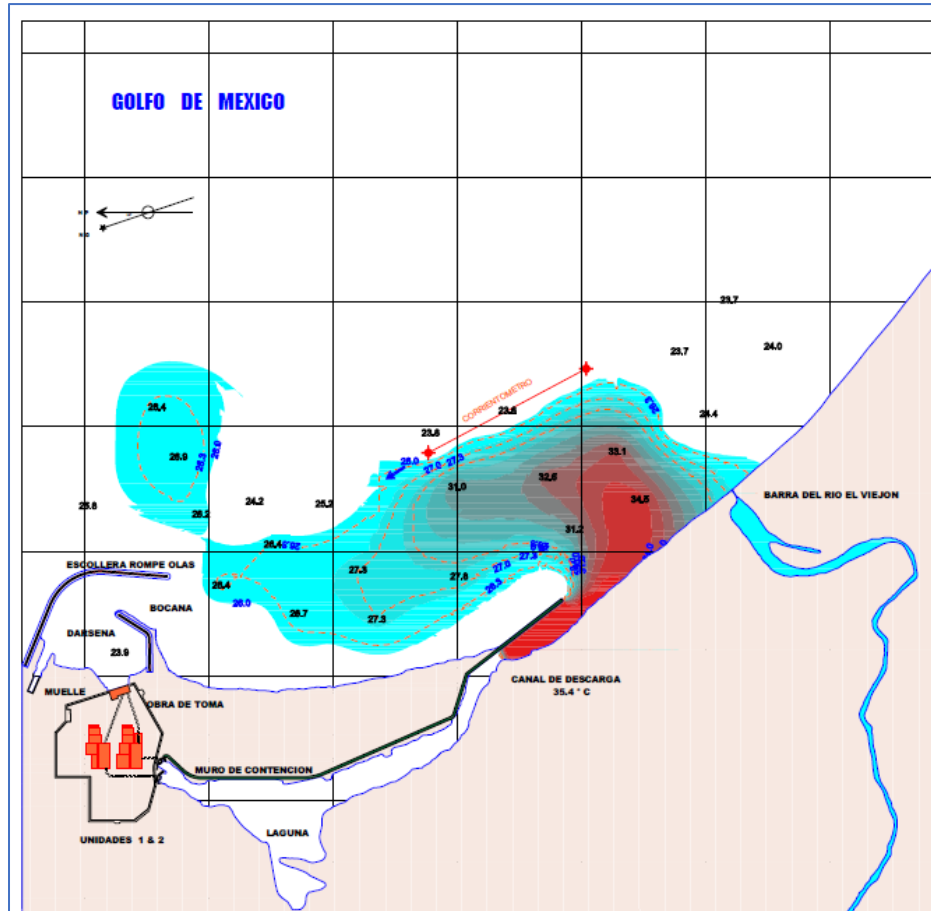


Figura 2.14: Ejemplo de isotermas generadas con mediciones *in situ* en la CNLV. Tomada de [51].

2.3.2 Teledetección

Si bien es cierto que las mediciones *in situ* permiten obtener datos de temperatura (boyas y plataformas móviles, por ejemplo), tienen el inconveniente de ser mediciones costosas y que consumen tiempo para desplegarse sobre amplias extensiones de cuerpos de agua. Para lidiar con lo anterior, se recurren a técnicas alternativas conocidas como de percepción remota.

Estas técnicas, también conocidas como Teledetección, habilitan la obtención de imágenes a nivel superficial en zonas marítimas y continentales con sensores instalados en estaciones espaciales. De esta manera, es posible medir y registrar la radiación electromagnética, la cual funciona como un medio de transmisión de información entre el sensor y un objeto. La cantidad y tipo de radiación emitida por objetos o seres vivos depende de su temperatura. Las tres formas de adquirir información con esta técnica son: reflexión, emisión y emisión-reflexión. La primera, que es la más utilizada e importante en Teledetección, es la radiación solar. La segunda es la radiación emitida por objetos, como un estuario o un árbol. Finalmente, la tercera corresponde al caso en que es el mismo sensor quien *emite* y posteriormente capta la *reflexión*, un ejemplo son los radares [52]. Estas fuentes de radiación son presentadas en la Figura 2.15, señalado por I, II y III para la emisión, reflexión y emisión-reflexión, respectivamente.

Basado en el uso de imágenes remotas termales-infrarrojas, con Teledetección es posible hacer mediciones espacialmente variadas de la temperatura radiada por los cuerpos de agua. Esta técnica es otra alternativa para evaluar la contaminación térmica emitida por las CGE en los cuerpos de agua. Un ejemplo de monitoreo utilizando Teledetección se muestra en la Figura 2.16.

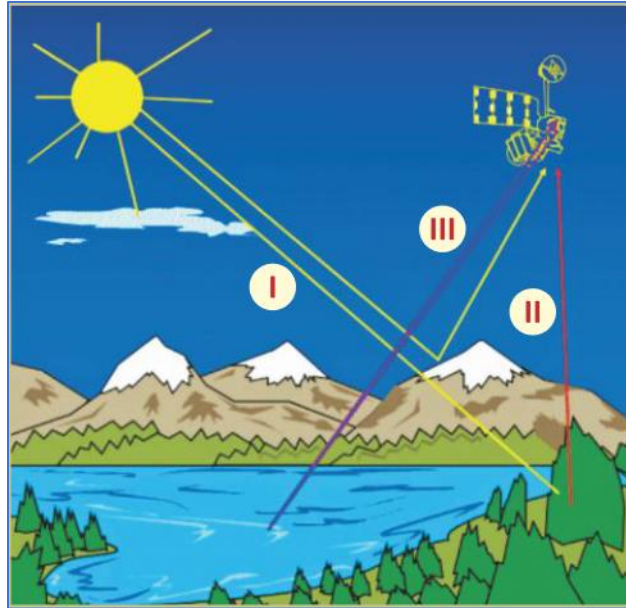


Figura 2.15: Fuentes de radiación utilizadas en Teledetección. Tomada de [52].

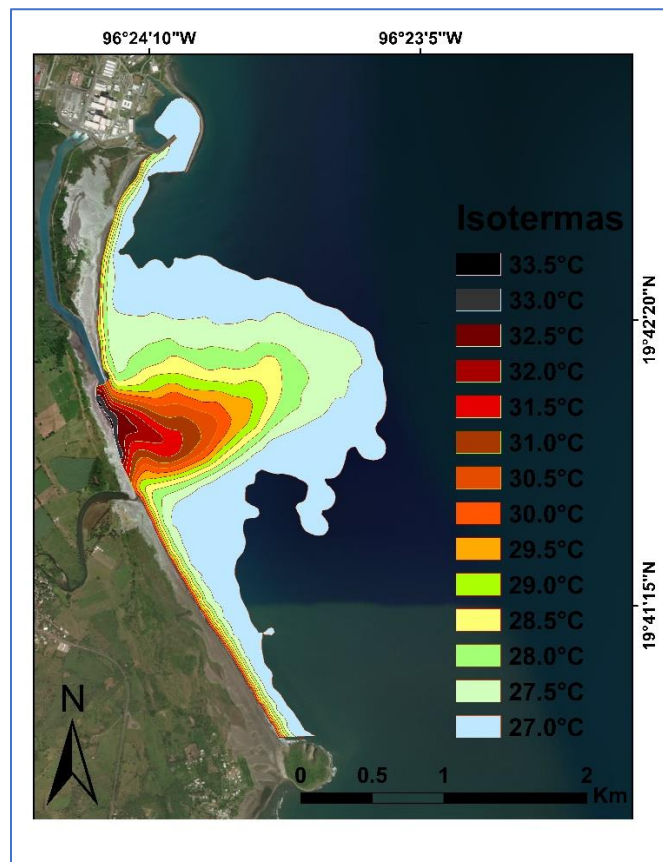


Figura 2.16: Ejemplo de isotermas generadas con teledetección. Tomada de [10].

2.3.3 Simulaciones numéricas

Una de las alternativas que ha tomado relevancia en las últimas décadas es la técnica capaz de simular el flujo de fluidos y se le conoce como simulaciones numéricas. La piedra angular de esta técnica son los fundamentos teóricos de la CFD, con la cual es posible hacer un sinnúmero de simulaciones numéricas de diversos tipos de fluidos, incluida el agua. Utilizar esta técnica, implica representar un comportamiento físico de forma matemática, con una o varias hipótesis y supuestos que permitan simplificar la complejidad del fenómeno en estudio. Los fundamentos de la CFD se describen en el Capítulo 3. Analizar a los cuerpos de agua con simulaciones numéricas permite obtener información como el compartimento de las corrientes marinas, la variación de la superficie libre y los gradientes de temperatura. En años recientes, gracias al creciente progreso del avance tecnológico, ha sido posible desarrollar diversos modelos numéricos que hacen posible resolver fenómenos complejos con una precisión aceptable y en tiempos de cómputo razonables. A estos desarrollos actualmente los conocemos como modelos hidrodinámicos y de calidad del agua. Dichos modelos pueden aplicarse a una infinidad de cuerpos de agua a superficie libre, como: lagunas, ríos, lagos, estuarios y el mar.

Los modelos hidrodinámicos y de dispersión térmica han evolucionado desde aquellos basados en expresiones algebraicas simples hasta los más complejos en que se resuelven sistemas de ecuaciones diferenciales parciales con una alta aproximación numérica. En consecuencia, es posible considerar gran parte de la complejidad involucrada en los problemas a superficie libre y obtener resultados más realistas. A diferencia de las técnicas *in situ* y de Teledetección, las simulaciones numéricas mientras cuenten con información y recursos computacionales suficientes, no están condicionadas a limitaciones espaciotemporales, pudiendo entonces predecir apropiadamente las variaciones de los parámetros involucrados en un problema específico.

Por tanto, otra opción viable para el análisis y monitoreo de plumas térmicas en cuerpos de agua es utilizando modelos numéricos, los cuales son excelentes complementos a las técnicas de monitoreo previamente mencionadas. La Sección 3.6 presenta una breve descripción de algunos modelos hidrodinámicos y de dispersión térmica capaces de simular plumas térmicas. Un ejemplo de monitoreo a través de simulaciones numéricas se ilustra en la Figura 2.9, la cual fue generada a partir de considerar información meteorológica y oceanográfica para diversos escenarios con el modelo hidrodinámico TELEMAC para una CGE en el Sur de Italia [11].

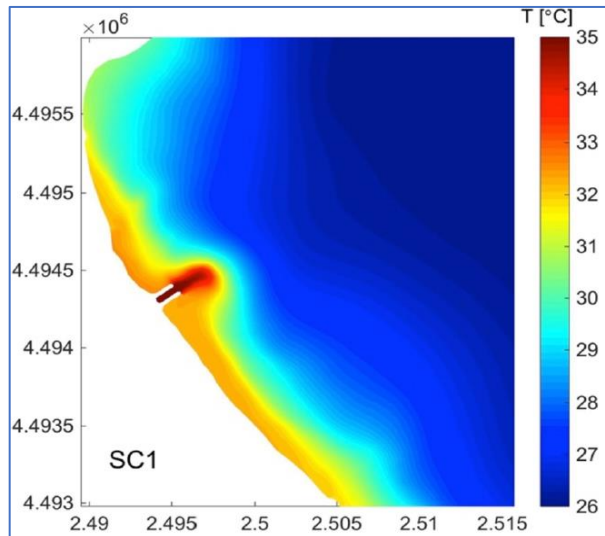


Figura 2.17: Ejemplo de pluma térmica generada con simulación numérica. Tomada de [11].

2.4 REVISIÓN DE LA LITERATURA ESPECIALIZADA

En las secciones previas se ha mencionado que mantener la calidad del agua costera en óptimas condiciones es crucial tanto para el cuidado del medio ambiente como para la correcta ejecución de las actividades humanas en la zona costera aledaña a una CGE. Al analizar las descargas térmicas con el objetivo de preservar la calidad del agua, numerosos estudios se han realizado con el pasar de los años con diversas metodologías, siendo algunas de ellas las mencionadas anteriormente: mediciones *in situ*, Teledetección y simulaciones numéricas. A continuación, se presentan las síntesis de algunos artículos científicos dedicados al análisis de las plumas térmicas en aguas superficiales para las últimas 2 décadas.

- **A hybrid near-field/far-field thermal discharge model for coastal area**, 2001 [53].
Este trabajo emplea el modelo hidrodinámico CORMIX 3 en el campo cercano para simular la dispersión de calor de las descargas superficiales de la CT Boryong en Corea del Sur. Dicho modelo es combinado con un modelo de nombre ELA (Eulerian-Lagrangian Transport Model) el cual es más apropiado para predecir el comportamiento de la dispersión en el campo lejano; de esta manera se hace un mejor análisis de este fenómeno en las zonas costeras al combinar el campo cercano con el campo lejano. Se utiliza el número de Froude densimétrico local para explicar las características de la descarga térmica. Las simulaciones híbridas muestran que la

temperatura en exceso de 1 °C alcanza distancias de hasta 1.2 km durante pleamar y de 2 km en bajamar. Este enfoque de esquemas combinados mostró que se puede simular mezclado de jet en campo cercano y la dispersión en el campo lejano con precisión aceptable.

- **Transport of waste heat from a nuclear power plant into coastal water, 2002 [54].**

Se estudia el transporte de calor por medio de modelación numérica y experimental generado por una CN en Daya Bay, China. Por medio de la modelación numérica, utilizando el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ promediado en la vertical; se pudo predecir el flujo de marea y la distribución de la temperatura en el campo lejano. Un modelo totalmente físico se utilizó para discutir el efecto de la distorsión con respecto a un modelo físico local con escala normal. Se encontró que el modelo totalmente físico simula las capas de agua caliente con un grosor más pequeño al esperado y que las diferencias de temperatura entre la capa superficial y la de fondo son mayores a las obtenidas con mediciones *in situ*. La modelación experimental mostró que un modelo físico con una escala de distorsión de 10, para el caso de estudio, es aplicable para simular flujo de marea y transporte de calor en zonas costeras.

- **AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay, nuclear power station, China, 2003 [55].**

Se probó la factibilidad de caracterizar la pluma térmica de la CN en Daya Bay, China utilizando un sensor de un radiómetro avanzado de alta resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés). Se procesaron y evaluaron imágenes de temperatura superficial del mar dentro del periodo de noviembre de 1997 a junio de 1999, caracterizando la pluma térmica emitida por la CN. Los resultados muestran variaciones estacionales, observando que en invierno la pluma térmica es más pequeña con Δt de 1.5 °C y en los meses de verano-otoño es más grande con Δt de 1.0 °C. Se encontró un incremento de temperatura de 1-3 °C asociados con la descarga de la CN.

- **Physical properties of thermal plumes from a nuclear power plant in the Southernmost Taiwan, 2004 [56].**

Por medio de mediciones, se analizó la circulación y las variaciones hidrográficas en una bahía adyacente a una CN en Taiwán con datos del 2003-2004. Los resultados muestran que las corrientes cercanas a la costa están dominadas por las mareas, variando su flujo en temporada de pleamar y de bajamar. Por medio de campañas de

medición utilizando CTD y trayectoria de partículas, se observó que el efluente térmico tiene una tasa espacial de decaimiento en la temperatura de alrededor -0.008 a -0.01 °C/m en los primeros 500-800 m de la salida.

- **Numerical simulation and comparison of water intake-outlet methods in power plants**, 2006 [57].

Se comparan métodos de toma-descarga de agua en CGEs y sus efectos en la dispersión térmica por medio de simulaciones numéricas utilizando el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. Se evalúa el tradicional método de trayectoria (march-past) el cual separa horizontalmente la toma y la descarga y también el método de eclipsado (eclipsed) donde no hay distancia horizontal sino vertical entre la toma y la descarga. Los resultados para el segundo método muestran que la temperatura en la toma decrementa para ciertas condiciones en los parámetros evaluados.

- **Thermal effects on heterotrophic processes in a coastal ecosystem adjacent to a nuclear power plant**, 2006 [49].

En este artículo se representan los mecanismos que controlan las variaciones estacionales de la respiración en la comunidad de microplancton (CR) y de respiración bacteriana (BR) en la obra de toma, en la descarga y en la pluma térmica que se forma cercana a la descarga de una CN en Taiwán, donde el carbón orgánico disuelto es considerable. Lo anterior se realiza con mediciones *in situ*. Se hicieron muestreos semanales de octubre de 2001 a agosto de 2002 en la entrada y salida de la CN, encontrándose que la pluma térmica tiene un efecto tanto en la BR como en la CR.

- **Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea**, 2006 [5].

En el artículo se caracteriza la pluma térmica de la CN Youngwang en la costa oeste de Corea del Sur, utilizando datos satelitales infrarrojos. El estudio se centra en mostrar las características espaciales y temporales de la pluma térmica en la zona costera de Yonggwang utilizando Thematic Mapper (TM) y el Enhanced Thematic Mapper (ETM+) ambos del satélite Landsat 5 y 7 además de datos satelitales de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 12,14,16 y 17. Los resultados muestran que la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) obtenida con AVHRR provee el patrón general de la huella de la pluma térmica y su extensión, mientras que la que se obtiene con el TM devuelve información más

detallada como forma, tamaño, orientación y dirección de la dispersión térmica. Se observó que la alta resolución de datos TM y ETM con Thermal InfraRed (TIR) proveen de mejor información acerca de los aspectos espaciales y temporales de la pluma térmica comparado con una resolución espacial-baja de datos AVHRR.

- **Finite element modelling of the thermal outflow of three power plants in Huelva Estuary, 2007 [58].**

En esta investigación, se evalúan las repercusiones ambientales de las descargas térmicas provenientes de 3 CGE en el estuario de Huelva, España. Se utilizó un modelo hidrodinámico y de transporte diseñado por los autores nombrado SEASCAPE el cual está basado en elemento finito para la simulación de la dispersión térmica en 2D. Para la evaluación del coeficiente de difusión horizontal, se utilizó un valor constante el cual fue variado en el rango de 0 a 1 m²/s, siendo el último valor el que devolvió resultados realísticos. Este modelo, es capaz de reproducir apropiadamente la pluma térmica generada por las 3 descargas simultáneamente. Se encontró que dichas descargas incrementan considerablemente la temperatura del estuario, principalmente en el área cercana a ellas.

- **The numerical simulation and remote sensing of the thermal discharge from the Qinshan nuclear power station, 2008 [59].**

Se estudia la influencia del efecto de la descarga térmica en la distribución espaciotemporal del agua caliente vertida al mar en las cercanías de la CN Qinshan (QNPS) en China por medio de mediciones *in situ*, una imagen de Teledetección y una simulación numérica. Esta CN ha aumentado su producción de electricidad por medio de diversos proyectos, los cuales fueron incorporados en 3 fases. La imagen de Teledetección, obtenida con el airborne multi-spectrum scanner (MAMS) fue utilizada para obtener la distribución de la SST en la zona costera. Por su parte, el modelo COHERENS fue utilizado para explorar la difusión de la descarga térmica y la distribución de la SST en la zona costera alrededor de la QNPS. Las mediciones *in situ*, realizadas el 24 y 27 de noviembre de 2007, mostraron que la temperatura es mayor en la salida de la fase 2 que en la de la fase 3. Respecto del campo de temperatura obtenido con MAMS, se mostró que el efluente térmico influye el agua costera en una pequeña escala. Finalmente, las simulaciones numéricas muestran que existe un mayor incremento de temperatura en presencia de mareas de inundación que en las de refluo.

- **Numerical research on flow and thermal transport in cooling pool of electrical power station using three depth-averaged turbulence models**, 2009 [17].

El artículo describe un modelo hidrodinámico cuasi-tridimensional que puede ser utilizado para simular el flujo y el transporte térmico del agua tanto en zonas naturales como en casos artificiales. El modelo fue probado en un cuerpo de agua artificial, utilizando los modelos de turbulencia $k - \varepsilon$, $k - w$ y $k - \omega$, cada uno de ellos promediados en la vertical para simular el flujo y el transporte de calor en dicho cuerpo de agua artificial. Se observó un mezclado en las etapas iniciales de la descarga. En general, los tres modelos presentan distribuciones de temperatura similares. Sin embargo, debido a que la versión del modelo $k - \omega$ utilizada en este artículo para el caso de estudio analizado es relativamente nueva, se debe mencionar que sus propiedades y habilidades son de cierta manera diferentes a las de los otros dos.

- **Case study: Three-dimensional hydrodynamic model of a power plant thermal discharge**, 2011 [60].

En esta investigación, se utilizó el modelo Mike 3 para el análisis de la pluma térmica de una CGE localizada en East River, Queens, New York City. En dicho análisis se modelaron 2 plumas térmicas independientes entre ellas empleando el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. Se realizaron simulaciones para casos en donde se presentan las peores condiciones para generar la máxima pluma térmica de la CGE, la cual se presenta en condiciones de agua quieta derivadas de las bajas velocidades y la poca disponibilidad de volumen de agua para la dilución en el río. También se observaron zonas donde dicha pluma se semi-estanca, acumulándose hasta que se presente un cambio en la marea.

- **Effects of topography on diffusion of thermal discharge in power plant**, 2011 [61].

Se analizan los efectos de la topografía en la dispersión de la descarga térmica para un caso hipotético que representa a una CGE. Los resultados muestran que mientras mayor sea la pendiente topográfica, más grande es la dispersión horizontal de la descarga térmica. Además, cuando la pendiente es pequeña, la dispersión en la dirección vertical es mayor y los gradientes de temperatura son mayores. Además, la velocidad de la difusión vertical es mayor que el nivel de descarga térmica.

- **Numerical study of the effect of a power plant cooling water discharge in the Montevideo Bay, 2011 [62].**

Se desarrolló un modelo que pueda representar la temperatura del agua en la obra de toma y en la salida para así determinar el tamaño y la distribución espacial de la pluma térmica consecuencia de la descarga de la CGE Central Batlle, en Uruguay. Se utiliza un modelo hidrodinámico y de transporte bidimensional para resolver apropiadamente las variaciones horizontales de la temperatura en el agua para el campo cercano y lejano. Los coeficientes de viscosidad y difusividad turbulenta fueron obtenidos con el método de Smagorinsky, el cual utiliza una generalización del método de longitud de mezclado. Se analizan los cambios de corriente y de los campos de temperatura inducidos por la obra de toma y la descarga en diversas estaciones del año. Debido a que las simulaciones fueron ejecutadas en verano e invierno, se observó que en dichas temporadas la distribución espacial de la pluma térmica es diferente. Por ejemplo, que el incremento máximo de temperatura fue de 2.3 °C.

- **The effect of velocity and outlet angle of the thermal discharge on its diffusion with basic flow in power plant, 2011 [63].**

El artículo se enfoca en establecer un modelo apropiado para un canal de agua, utilizando del modelo de turbulencia $k - \epsilon$ para después simular los campos de velocidad y la distribución de la temperatura probando distintas velocidades y ángulos en la descarga térmica. Respecto al ángulo de salida, cuando este es 90° ó 60° se puede apreciar que existe una zona de recirculación en las inmediaciones de esta, y a medida que el ángulo disminuye dicha zona tiene a desaparecer. Respecto a la dispersión de la temperatura, cuando la salida tiene un ángulo de 90° se observa un área mayor de agua caliente e isothermas de mayor magnitud; mientras que, si el ángulo decrementa, tanto la magnitud de las isothermas como su área de dispersión también disminuyen.

Los resultados muestran una zona de separación la cual se ve afectada por la velocidad y el ángulo de la descarga térmica, permitiendo así que se opte por una velocidad y ángulo apropiados para reducir el impacto de la descarga térmica en la obra de toma.

- **Consequences of thermal pollution from a nuclear plant on lake temperature and mixing regime**, 2013 [1].

Considerando los efectos de la contaminación térmica y del calentamiento climático en el pequeño lago Stechlin en Alemania, se analizan la respuesta del lago a ambos estresores de calor. Dicho lago recibe descargas térmicas de una CN. Para esto se utilizó el modelo FLAKE, el cual es capaz de predecir la estructura de la temperatura vertical y las condiciones de mezclado de lagos. También, separando los efectos del calentamiento climático y de la descarga de agua caliente, se realizó un análisis estadístico para diversos periodos antes, durante y después de la operación de la CN. Se combinaron entonces análisis de serie de tiempo de las temperaturas del lago y modelado de régimen térmico, cuantificando así los efectos de los estresores térmicos en el régimen de mezclado del lago. Los resultados muestran haber encontrado que en invierno hay mayores consecuencias drásticas para el régimen térmico del lago que para una misma contaminación observada en verano. El calor liberado en invierno a temperaturas inferiores a los 4 °C se mezcla con la columna de agua y queda almacenado en el hipolimnion hasta el siguiente verano, alterando el régimen de mezclado estacional. El efecto climático en el régimen de la temperatura del lago es cuantitativamente comparable al de la contaminación térmica.

- **Modelación numérica de la descarga térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde**, 2013 [29].

En el artículo se realiza un estudio de la dispersión térmica generada por la descarga de la CNLV, por medio de la implementación de un modelo numérico el cual aproxima la viscosidad turbulenta con el modelo de turbulencia de Smagorinsky. El modelo numérico fue validado con datos medidos *in situ*. Con las simulaciones numéricas, fue posible determinar si la CNLV puede verse afectada si existe recirculación de agua caliente. Los resultados obtenidos presentan precisión aceptable al estar en concordancia los resultados numéricos con las mediciones *in situ*, el criterio de Nash-Sutcliffe fue utilizado para evaluar dicha concordancia. Se hicieron modelaciones para los periodos de secas y lluvias, encontrando que en el último escenario se presenta recirculación térmica hacia la obra de toma, afectando así el sistema de enfriamiento de la CNLV, pues el agua que recibe dicho sistema tiene una temperatura de 30 °C; es decir 2 °C mayor a la temperatura media del mar.

- **Physical model to investigate the effect of the thermal discharge on the mixing zone (Case Study: North Giza Power Plant, Egypt), 2013 [64].**

La dimensión de la pluma térmica en el campo cercano producida por la descarga de una Central Hidrotérmica en Giza es investigada con un modelo a escala físico en este artículo. Dicha investigación se centra en analizar los efectos de efluentes, de la temperatura en exceso y el régimen de flujo en la zona de mezclado utilizando como modelo una cama fija a una escala sin distorsionar de 1:50. Se observa que el aumento en la descarga del efluente en un 30%, bajo flujo constante, incrementa el área de la zona de mezclado en un 60%, su longitud en un 60% y su ancho cerca de un 25%. Si se incrementa la temperatura en exceso por encima de la ambiental en un 20%, se incrementa el área de la zona de mezclado entre 80-400%, su longitud de mezclado entre 20-150% y su ancho alrededor de 50-100% de acuerdo con el régimen del flujo.

- **Effects of a coastal power plant thermal discharge on phytoplankton community structure in Zhanjiang Bay, China, 2014 [2].**

En este artículo, se utilizaron mediciones *in situ* y se recolectaron muestras de agua para evaluar los efectos de la contaminación térmica generadas por una CGE en la bahía de Zhanjiang para determinar los efectos de la descarga térmica en el phytoplankton. Los resultados muestran que la riqueza de especies, conteo celular y *Ch1* en zonas de mezclado y de control fueron significativamente mayores que en las zonas más calientes. Umbrales de los efectos de la temperatura fueron determinados por medio del periodo donde no hay regreso de flujo al mar en la comunidad de phytoplankton.

- **Modelling the thermal effluent of a near coast power plant (Sines, Portugal), 2015 [65].**

Esta investigación presenta una metodología basada en la implementación del modelo numérico tridimensional MOHID para estudiar la dinámica de la pluma térmica originada por una CGE localizada en el occidente de Portugal. Distintos escenarios fueron comparados con y sin efluente térmico considerando distintas condiciones del viento. Respecto de la viscosidad horizontal, esta fue utilizada como uniforme en todo el dominio computacional, mientras que la vertical fue obtenida con el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. Se simuló el transporte del efluente térmico para dos escenarios donde dominan los vientos del Norte y Sur. Se encontró que la temperatura decae de 10 °C en la descarga a los 2 °C en una distancia de 2 km medida desde la descarga.

Cuando hay dominancia del viento del Sur, se presenta el escenario menos favorable para el medio ambiente costero y la eficiencia operacional de la CGE. Los resultados del modelo permitieron una representación apropiada de los efectos del efluente térmico en la circulación costera.

- **Thermal dispersion model for cooling water of thermal power plant system, 2015 [66].**

En este artículo se evalúa la pluma térmica generada por una CGE ubicada en los Estados Unidos de América y descargada a un río, considerando los campos cercanos y lejanos en que se dispersa dicha pluma. Las evaluaciones son realizadas con simulaciones numéricas utilizando el modelo hidrodinámico FLOW3D y para estimar la viscosidad turbulenta se seleccionó el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ estándar.

Además, se estudia la línea central de decaimiento de la temperatura por medio de una ecuación algebraica junto al área formada por isoterma en el campo cercano. En los resultados se aprecia que la descarga térmica muestra en un inicio una forma clásica de champiñón pequeño la cual crece en tamaño al pasar el tiempo. Se obtienen resultados similares entre la temperatura teórica y la simulada.

- **Influence of geographic setting on thermal discharge from coastal power plants, 2016 [12].**

En este trabajo, la descarga térmica de tres CGEs costeras en la bahía Dacheng en China, fueron estudiadas. Las CGE están situada en un estuario, bahía y en mar abierto, respectivamente. El análisis de la descarga, realizado con un modelo numérico bidimensional desarrollado por los autores, empleó 2 mallas anidadas: un modelo exterior con malla gruesa para simular la elevación de la superficie forzada con marea y un modelo interior con una resolución de malla fina para simular la circulación costera y la hidrografía sobre cada CGE en las aguas costeras adyacentes. Además, se consideró una viscosidad turbulenta horizontal constante e igual a $50 \text{ m}^2/\text{s}$ para el modelo exterior y $20 \text{ m}^2/\text{s}$ para el interior. Los resultados muestran que el incremento de temperatura en la dispersión de la descarga térmica tiende a disminuir a medida que el flujo individual expulsado de cada CGE es en dirección a mar abierto. Analizando el incremento de temperatura individual de cada CGE, se encontró que la situada en bahía presentaba las variaciones más altas, seguida por la localizada en un estuario y las variaciones más pequeñas son producidas por la de mar abierto.

- **Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant under various operational capacities, 2016 [14].**

El artículo presenta un modelo matemático para simular la distribución de temperatura de una descarga térmica para diferentes capacidades operacionales de una CGE localizada en Kazakhstan, en Asia Central. El modelo está desarrollado con un algoritmo basado en volumen finito y considera en las ecuaciones de cantidad de movimiento un término para el desarrollo de estratificación. Este modelo matemático utiliza un modelo de turbulencia del tipo Large Eddy Simulation (LES) basándose en el modelo dinámico de Smagorinsky para caracterizar la turbulencia, filtrando las ecuaciones base de la CFD con el enfoque de Favre. Las consideraciones anteriores fueron seleccionadas así para poder analizar las diversas heterogeneidades verticales de reservorios estratificados. El modelo matemático fue aplicado para determinar el tamaño y la distribución espacial de temperatura de la descarga proveniente de una CGE para distintas capacidades operativas. Los resultados muestran que el modelo reproduce apropiadamente la hidrodinámica del lugar de estudio, ya que se compararon dichos resultados con datos experimentales encontrando concordancia entre ellos. Finalmente, el modelo puede ser utilizado para predecir las características dinámicas relevantes de la columna de agua en escenarios hipotéticos.

- **Numerical modeling of water thermal plumes emitted by thermal power plants, 2016 [16].**

Se realizó un estudio de la dispersión térmica proveniente de la descarga de una CT en Veracruz, México para caracterizar sus efectos por medio de simulaciones numéricas. Se implementó, calibró y validó el modelo hidrodinámico Delft3D-FLOW y un modelo de transporte, con mediciones en campo para aplicarlo a un escenario crítico en donde diversas condiciones meteorológicas y atmosféricas fueron consideradas para reproducir apropiadamente las condiciones físicas del entorno. Dos métricas para la validación de los resultados fueron contempladas. Los resultados muestran un efecto físico local de las plumas térmicas dentro de la zona de estudio, debido al efecto preponderante del viento sobre el área estudiada. También se observó que el área de influencia de la pluma térmica es de aproximadamente 12 km² y que una disipación del 94% de ésta se presenta dentro de los primeros 1,500 m dirección mar adentro.

- **Detection of thermal pollution from power plants on China's eastern coast using remote sensing data**, 2017 [67].

Se realiza un estudio basándose en los métodos de recuperación de datos aplicables a TIR con diferentes fuentes de datos de Teledetección para obtener la SST con resolución espacial alta en la zona cercana a la CT en la bahía Yueqing, China. Los resultados muestran que los datos relacionados a MODIS, Landsat ETM+ y HJ-1B IRS con resolución espacial alta son más aplicables para estimar la SST de pequeña escala; mientras que por su parte los datos IRS con alta resolución temporal son más útiles para estudiar la variación espaciotemporal de las plumas térmicas de plantas de generación de electricidad costeras.

- **Analysis of dispersion of heated effluent from power plant: a case study**, 2017 [15].

En este trabajo se utilizaron simulaciones numéricas y mediciones de campo para estudiar la dispersión del efluente térmico proveniente de la CN Kakrapar, el cual es vertido al lago Moticher, en India. Se utiliza un modelo a escala de laboratorio para validar los resultados numéricos. Se consideraron diversos factores para escalar el modelo de laboratorio; como el número de Reynolds, el cual garantizó que el flujo fuera totalmente turbulento; otro número adimensional para asegurar que este modelo a escala tuviera patrones similares a los encontrados en el cuerpo de agua fue el número de Froude densimétrico, por lo que se seleccionó un valor apropiado para ello. De los resultados numéricos se deduce que cuando se considera al viento, éste tiene un efecto significativo en la zona de influencia de la pluma térmica, la cual se reporta en 28 m. Además, se hace mención que los resultados numéricos sobreestiman a los experimentales. Finalmente, la ubicación de la purga (blowdown) resulta ser crucial ya que minimiza la zona de influencia de la dispersión térmica si es ubicada estratégicamente.

- **Numerical simulation of thermal pollution zones' formations in the water environment from the activities of the power plant**, 2019 [44].

En esta investigación se evalúa la distribución de temperatura a partir de la potencial construcción y ubicación de una CN, en la margen izquierda del río Irtysh, dentro de la república de Kazakhstan. Se utilizó el modelo ANSYS Fluent bajo la aproximación de aguas someras para realizar simulaciones numéricas. Diversos modelos de turbulencia fueron utilizados: $k - \varepsilon$ (versiones estándar, RNG y realizable), $k - \omega$, y el modelo

DES. Este último modelo combina las mejores propiedades de RANS y LES en uno solo. Los resultados obtenidos se pueden utilizar para estudiar problemas asociados al mezclado de agua caliente descargada desde una dirección lateral hacia el flujo transversal. Se determinaron las áreas de contaminación térmica para diferentes velocidades y el impacto de la descarga del agua caliente en el río.

- **Numerical investigation of thermal discharge to coastal areas: A case study in South Italy, 2020 [11].**

El estudio fue realizado en las inmediaciones de una CGE en Cerano, en el Sur de Italia. Se implemento y calibró el modelo TELEMAC-MASCARET para investigar el efecto de la dispersión térmica en diversos escenarios hipotéticos para una combinación de condiciones meteoceánicas y características operativas de la GGE. Las simulaciones consideraron al modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. Los resultados fueron comparados y evaluados con base en la tasa de dispersión del calor y su área de influencia, proveyendo una mejor perspicacia de los procesos numéricos y los efectos potenciales en esa área costera. Este artículo incluye una pequeña sección donde se mencionan diversas regulaciones europeas con respecto a temperaturas máximas permisibles de la descarga térmica y extensión máxima de su dispersión en el mar.

- **The impact of thermal power stations on coastline and benthic fauna: Case study of El-Burullus power plant in Egypt, 2020 [13].**

El estudio fue generado para la CT El-Burullus, con el objetivo de evaluar la influencia del líquido enfriador de la CT y sus estructuras (obra de toma y de descarga) sobre la fauna béntica lejana a la costa y la eficiencia de dicha CT. También se analizó la estabilidad de la línea de costa, en la costa oeste de la ciudad El-Burullus, en Egipto. Este estudio fue llevado a cabo con mediciones *in situ* y con simulaciones numéricas utilizando el modelo Delft3D-FLOW. Los resultados muestran que la obra de toma y la de descarga están lo suficientemente separados para permitir el mezclado del efluente térmico con el agua de mar ambiental y así reducir la temperatura y salinidad en caso de recirculación. En consecuencia, la recirculación no afecta la eficiencia de la CT. La vida béntica lejana a la CT no se ve afectada por la dispersión térmica, sin embargo, efectos negativos pueden manifestarse en la fauna béntica próxima a la costa. Finalmente, se puede decir que la dispersión térmica no afecta a la línea de costa.

- **Experimental study on the effect of heat-retaining and diversion facilities on thermal discharge from a power plant**, 2020 [42].

En este trabajo se presentó un modelo físico y fue aplicado a la CGE de Huadian Kemen establecida en China para estudiar el transporte de calor y analizar los efectos de la retención de calor y de estructuras de desviación cerca de la obra de toma y de descarga para 6 escenarios. Se encontró que las estructuras de retención de calor (muro) y de desviación de calor (dique) decremantan el calor en exceso en la obra de toma. Se observan reducciones significativas de temperatura al implementar dichas estructuras en el modelo. Además, se varió la altura de la cresta en el dique para evaluar su impacto, encontrando que una altura de 2 m es suficiente para tener un desempeño efectivo al disminuir el regreso de calor.

- **Assessing water surface temperature from Landsat imagery and its relationship with a nuclear power plant**, 2021 [9].

Se analiza el efecto de la descarga de agua caliente proveniente de una CN en la temperatura del agua del río Tercero en Argentina por medio de la adquisición de información del Landsat 7 ETM+ y del Landsat 8 TIRS. Se realizó un análisis estadístico para detectar las variaciones significativas en la temperatura del agua debida a la contaminación térmica con datos de un periodo de 6 años, de los cuales la CN no estuvo operando por 3 años. Los resultados muestran que el agua descargada por la CN no promueve un incremento significativo en la temperatura media superficial del río, sin embargo, existe un efecto local por la contaminación térmica, el cual fue el principal flujo de calor dentro del reservorio. Dicho efecto puede ser visto con una línea de disipación la cual es revelada gracias a implementar las imágenes Landsat.

- **Discharge water temperature assessment of thermal power plant using remote sensing techniques**, 2021 [68].

En esta investigación se analiza la dispersión de la pluma térmica proveniente de la descarga de la CT Gujarat localizada en la India. Se demuestra la aplicabilidad de datos térmicos infrarrojos para monitoreo y que su uso es justificable en comparación con otras técnicas de monitoreo como las mediciones en campo periódicas. Particularmente, los datos de Landsat-8 TIRS fueron utilizados para poder entender las variaciones estacionales y temporales en el año 2018 de la diferencia de temperatura (ΔT) entre la descarga y el agua de mar en la CT. El análisis de ΔT fue llevado a cabo por medio de perfiles de temperatura, por lo que la selección de los pixeles para la

extracción de información fue estratégicamente seleccionada, considerando solamente áreas con agua. En los resultados se encontró que la ΔT es de 3 °C siendo esta menor al umbral permitido de 7 °C. Además, se observó que las mediciones de temperatura de los datos de Landsat 8 es representativo en el sensor (radiante) y no la es la temperatura actual (temperatura cinética), pudiendo no representar la temperatura actual real.

2.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo, se presentaron diversos conceptos y temáticas asociados a las CGE, poniendo mayor énfasis en la dispersión térmica emitida por ellas, la cual normalmente es vertida en las aguas de zonas costeras.

Para conocer el estado del arte respecto al tema de las plumas térmicas emitidas por CGE, se realizó una revisión de la literatura científica especializándose en una breve síntesis de los artículos consultados. Los casos de estudio de las plumas térmicas varían globalmente y el hecho de ver publicaciones recientes permite deducir que es un tema con oportunidad de investigación. Con esta revisión, se encontraron diversos métodos de monitoreo de plumas térmicas y al estudiarlas se pudieron detectar las ventajas y desventajas de utilizar uno u otro método; resaltando como mejor estrategia de monitoreo la combinación de dichos métodos para obtener una mejor comprensión del caso en estudio.

Respecto al orden de preferencia de uso de los métodos de monitoreo, la mayor detectada fue la simulación numérica, seguida de la experimentación y por último la Teledetección. Vale la pena mencionar que, particularmente para el análisis de plumas térmicas, no se observó una inclinación a utilizar modelos hidrodinámicos ya sea comerciales o de libre acceso, en algunos casos diversos autores optaron por desarrollar su propio código, o bien su propio modelo experimental de estudio. No obstante, al hablar de los modelos comerciales y libres (Open Source), destaca una mayor selección del modelo Delft3D-FLOW por la comunidad científica.

Por otra parte, respecto al análisis de la modelación de la turbulencia al caracterizar la descarga térmica proveniente de CGE y su dispersión en el mar, la literatura científica muestra avances o contribuciones significativas en este tema. Es necesario mencionar que, de los casos revisados, algunos de ellos son controlados (muchas veces en aguas quietas); utilizando simplemente un modelo de turbulencia popular (e.g. $k - \epsilon$ o $k - \omega$) o

2.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

simplemente constantes para calcular la viscosidad turbulenta. En otros casos se ejecutan simulaciones 2D (promediadas en la vertical) obviando con ello las aportaciones de las escalas pequeñas. Con lo anterior emerge una oportunidad de investigación: una comparativa de diversos modelos de turbulencia en escenarios complejos de la CFD como por ejemplo las aguas en zonas costeras considerando obviamente diversas variables propias de la zona como las hidrológicas, atmosféricas, oceanográficas, etc., aplicada a un caso de estudio donde se analice la dispersión térmica a fin de conocer el efecto de utilizar uno u otro modelo de turbulencia en la caracterización de las plumas térmicas.

Finalmente, derivado de esta revisión literaria científica especializada, tampoco se encontró que existieran análisis ambientales y termodinámicos de las plumas térmicas basados en números adimensionales, siendo ello otra oportunidad de investigación. Por tanto, en el presente trabajo de investigación se utilizará un modelo hidrodinámico y de transporte de temperatura para la caracterización numérica de plumas térmicas en zona costera y analizar el efecto de diversos modelos de turbulencia en ellas.

Dada la naturaleza de este trabajo de investigación y la importancia de conocer cómo funcionan los modelos hidrodinámicos y de dispersión térmica, el siguiente capítulo será dedicado a mostrar los fundamentos físicos-matemáticos de los modelos basados en CFD y en forma particular del modelo seleccionado para reproducir un caso de estudio donde hay presencia de plumas térmicas en la zona costera del Golfo de México.

Capítulo 3

3. LA CFD EN LOS PROBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MEZCLADO

3.1 INTRODUCCIÓN

En los albores de la mecánica de fluidos, el conocimiento detallado del comportamiento y propiedades de los fluidos era limitado para el entendimiento de la física de fluidos. Formulaciones teóricas acerca de los fluidos fueron generadas por hombres como Arquímedes (287 – 312 AC), Newton (1643-1727) y Bernoulli (1700 - 1782), entre muchos otros, para tener una mejor comprensión de los fluidos. Complementariamente, se usa el método experimental para contrastar los resultados obtenidos por el análisis teórico y de esa manera avanzar el conocimiento de la mecánica de fluidos. Lo anterior permitió mejorar el diseño de equipos donde el flujo de fluidos y la transferencia de calor sean variables que pudiesen considerarse. No obstante, como toda metodología, existen ventajas y desventajas al utilizar estos enfoques. En el primer método, se emplean fórmulas matemáticas teniendo como limitante que son aplicables a geometrías sencillas y presentan simplificaciones significativas de los fenómenos físicos involucrados; en el segundo si bien es cierto que se representa mejor la realidad del fenómeno, los equipos para hacer pruebas son costosos de adquirir y operar, no es sencillo realizar experimentos en escalas grandes y en ocasiones hacer mediciones es complicado bajo

3. LA CFD EN LOS PROBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MEZCLADO

este enfoque. Por lo tanto, para evitar este tipo de restricciones y limitantes, se recurre a un tercer enfoque denominado análisis numérico. Este último enfoque, en un ambiente virtual, permite escalar problemas de manera sencilla, modelar fenómenos físicos de manera realista, obtener información no disponible por otros enfoques y reducir tiempo y costos en fases de diseño. Más aún, en ese ambiente virtual, por ejemplo, es posible generar escenarios donde la experimentación pone en peligro la vida de seres vivos (flujos a altas temperaturas, condiciones meteorológicas adversas, incendios, etc.), o donde no es rentable para una empresa detener o alterar una línea de producción. Esta técnica presenta desventajas de su uso: se requiere de personal altamente cualificado capaz de interpretar resultados, en ocasiones la demanda de recursos computacionales (poder de procesamiento y capacidad de almacenamiento de datos) llega a ser exorbitante, se carece de información básica para simular escenarios, la limitación de los modelos de turbulencia existentes, etc. A este tercer enfoque se le conoce como dinámica de fluidos computacional o CFD, como ya se había mencionado previamente. Consiste en utilizar técnicas numéricas y emplear recursos computacionales para resolver problemas donde se involucre al flujo de fluidos y, frecuentemente, junto a fenómenos asociados como el transporte de contaminantes, transferencia de calor, partículas, reacciones químicas, entre muchos otros fenómenos.

Actualmente vivimos en la era de la información (digital) y gracias al reciente desarrollo exponencial de computadoras con poderosos atributos de procesamiento y capacidad de almacenamiento, la factibilidad de aplicar CFD a diversos problemas que hace medio siglo era impensable; actualmente ha mejorado considerablemente.

Es importante disponer de distintos enfoques cuando se aborda y resuelve un problema de dinámica de fluidos. Hay que reconocer que existen problemas de flujos que involucran procesos físicos complejos y forzosamente necesitan de instalaciones experimentales para su solución. Sin embargo, las simulaciones computacionales reducen el rango de condiciones sobre las que se debe experimentar. Por tanto, es casi un hecho que CFD cada vez se utilizará más en el futuro y por ello resulta conveniente conocer la filosofía que la compone.

3.2 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN

Cuando se habla de CFD, de una forma o de otra, se hace referencia a las ecuaciones constitutivas de la dinámica de fluidos y que están basadas en las siguientes leyes universales de conservación:

- Conservación de la masa
- Conservación de la cantidad de movimiento
- Conservación de la energía

Dichas ecuaciones representan los principios físicos fundamentales sobre los cuales toda la dinámica de fluidos está constituida. Las ecuaciones presentadas en las siguientes subsecciones están expresadas y son válidas para el caso de fluidos del tipo newtoniano. Esto es, cumplen con la Ley de la viscosidad de Newton, la cual establece una relación lineal (proporcional) entre los esfuerzos cortantes y la tasa de deformación, siendo μ la constante de proporcionalidad:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.1)$$

donde:

τ son los esfuerzos cortantes, (Pa)

μ es la viscosidad dinámica, (Pa · s)

$\frac{\partial u}{\partial y}$ es la tasa de deformación del fluido, (1/s)

Las ecuaciones son aplicadas sobre un volumen de control como el mostrado en la Figura 3.1

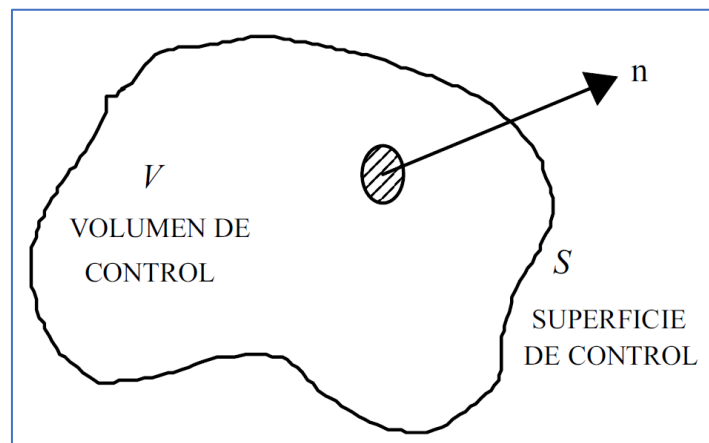


Figura 3.1: Volumen de control fijo.

3.2.1 Ecuación de conservación de masa

También conocida como ecuación de continuidad, la ecuación de conservación de masa postula en lo general que el incremento de masa dentro de un elemento fluido es consecuencia del flujo neto de masa hacia dicho elemento. En otras palabras, el flujo masico fuera de un volumen de control equivale a la tasa temporal del cambio masico dentro de un volumen de control, matemáticamente esto es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.2)$$

donde:

- ρ es la densidad del fluido, (kg/m³)
- t es el tiempo, (s)
- \vec{v} es el vector de velocidad, $\vec{v} = (u, v, w)$, (m/s)

En el caso de flujo incompresible, es decir, al no haber variación de la densidad temporal ni espacialmente, la ecuación (3.2) se reduce a la ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3.3)$$

3.2.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

La segunda ley de Newton aplicada a un fluido que pasa por un volumen de control, considerando incompresibilidad y μ constante (supone un medio homogéneo e isotrópico) lleva a la siguiente ecuación:

$$\rho \frac{\partial (\vec{v})}{\partial t} + \rho \nabla (\vec{v} \vec{v}) = \mu \nabla^2 \vec{v} - \nabla p + \rho \vec{g} \quad (3.4)$$

donde:

- P es la presión, (kg/m²)
- g es el vector de la gravedad, (m/s²)

En el lado izquierdo de la ecuación el primer término es la tasa de incremento de cantidad de movimiento por unidad de volumen en el volumen de control, el segundo representa la tasa cambio de cantidad de movimiento por advección a través de la superficie de control. En el lado derecho de la ecuación, el primer término se refiere al incremento de cantidad de movimiento por transporte viscoso, el segundo termino es el de fuerzas de presión y el último se refiere a las fuerzas de gravedad. A la ecuación (3.4) vectorial se le conoce como las ecuaciones de Navier-Stokes, en honor al francés Claude Navier (1785-1836) y

3.2 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN

al británico George Stokes (1819-1903) ya que ellos introdujeron los términos de transporte viscoso a las ecuaciones para flujo invíscido de Euler (1703-1783).

3.2.3 Ecuación de conservación de la energía

Basada en la primera ley de la termodinámica, al aplicarse sus principios a un fluido que pasa a través de un elemento de volumen fijo, conduce a la ecuación de la energía:

$$\frac{\partial(\rho E_t)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E_t \vec{v}) = -\nabla \cdot \vec{q} + \nabla \cdot (\sigma \cdot \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \mathbb{Q} \quad (3.5)$$

donde:

- E_t es la energía total por unidad de masa, (J/kg)
- σ es el tensor total de esfuerzos, (Pa)
- \vec{f} son las fuerzas de cuerpo por unidad de masa, (N/kg)
- q es el vector de flujo conductivo de calor, (W/m²)
- \mathbb{Q} es una fuente de calor adicional, (J/(m²s))

En el lado izquierdo de la ecuación el primer término representa la tasa de incremento de E_t en el volumen de control, mientras que el segundo término representa la tasa de cambio de energía total por convección a través de la superficie de control. En el lado derecho, el primer término es la tasa de cambio de calor por conducción a través de la superficie de control. El segundo término representa el trabajo realizado en el volumen de control por las fuerzas superficiales. El tercer término representa el trabajo realizado en el volumen de control por las fuerzas másicas y el cuarto término es la tasa de calor producida por fuerzas externas.

Si el fluido es newtoniano e incompresible; si se desprecia la disipación viscosa y, además, se asume q por medio de la Ley de Fourier para la transferencia de calor, se obtiene la ecuación de la energía térmica:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T + \frac{1}{\rho C_p} \nabla \cdot \mathbb{Q} \quad (3.6)$$

donde:

- T es la temperatura, (°K)
- C_p es la constante de capacidad de calor a presión constante, (J/(kg °K))
- α es la difusividad térmica, $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$, (m²/s)
- k es el coeficiente de conductividad térmica, (W/ (m °K))

3.3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN NUMÉRICA

Las ecuaciones fundamentales de conservación, y sus derivaciones para hacerlas aplicables a flujos incompresibles, aplicadas a problemas de fluidos, actualmente carecen de una solución analítica. Consecuentemente, se debe recurrir a alguna alternativa para dar respuesta a tales problemáticas. Una opción factible y de precisión aceptable para resolver problemas matemáticos que incluyan ecuaciones diferenciales es la denominada solución por métodos numéricos. Dichos métodos resultan ser la base fundamental de legitimar la existencia y uso de CFD. Con esto en mente y gracias al avance tecnológico de los últimos años, se han presentado auges en desarrollos e implementación de metodologías numéricas capaces de representar apropiadamente la fenomenología física relacionada con los fluidos y la transferencia de calor. Estos fenómenos, descritos por las ecuaciones previamente establecidas, de optarse abordarlos por la vía numérica requieren ser definidos en un medio discreto y optar por alguna estrategia de solución. En la literatura científica es posible identificar métodos para discretizar las ecuaciones de conservación de la mecánica de fluidos, destacando los métodos de: diferencias finitas, elemento finito y por último volumen finito. Se debe mencionar que el último es el más general y utilizado por su naturaleza intrínseca de garantizar una discretización conservativa.

3.3.1 Diferencias finitas

Esta aproximación es uno de los más simples y antiguos métodos para resolver Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP). Consiste en aproximar el operador diferencial al reemplazar las derivadas en una ecuación con cocientes incrementales, de naturaleza algebraica. El dominio es particionado en el espacio y tiempo permitiendo que las aproximaciones de la solución sean solucionadas en puntos espaciales o temporales. Consecuentemente, un error es esperado entre la solución exacta y la numérica; dicho error se determina por la manera de aproximar al operador diferencial. A este error se le denomina como de discretización o de truncamiento, el cual deriva de que solo una parte del desarrollo de Taylor es utilizada para satisfacer un orden de aproximación. Este método, aunque sencillo de implementar sobre un dominio, no es apropiado cuando éste es irregular, pues existirá un mayor error adicionado por la forma de discretizar al dominio (Figura 3.2). Por tanto, es mejor recurrir a otro tipo de técnicas para reducir este tipo de error.

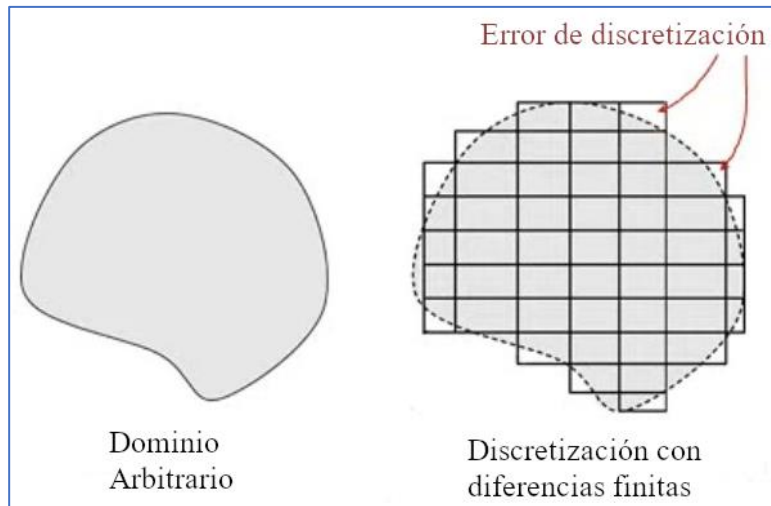


Figura 3.2: Discretización con el método de diferencias finitas.

3.3.2 Elemento Finito

Es una técnica típicamente empleada en problemas de índole de ingeniería civil y aeroespacial, extendiendo su uso a la dinámica de fluidos. Este método consiste en particionar un dominio delimitado por fronteras en un número finito de elementos pequeños y que no se traslapen entre sí. A todos ellos se les define como subdominios (los cuales pueden adoptar distintas geometrías) y sobre ellos las ecuaciones diferenciales son aproximadas por medio de una función local, generalmente del tipo polinomial. En el caso de problemas que incluyan condiciones iniciales y de frontera, ellas se formulan en la llamada forma débil o integral, para que las contribuciones de cada subdominio a las integrales globales sumen en totalidad y produzcan una integral que caracterice el problema en todo el dominio. Esta técnica deriva del método Galerkin, el cual se basa que, en vez de utilizar un número excesivo de ecuaciones complicadas para solucionar un problema como un todo, se prefiere descomponerlo en pequeñas partes y resolver ecuaciones más simples para cada parte y finalmente acoplar todas las partes para obtener una solución final. La Figura 3.3 muestra un ejemplo de discretización por este método. En ella se puede observar que la discretización se adopta mejor a la forma del dominio y, por tanto, el error de discretización es menor comparado con el método de diferencias finitas.

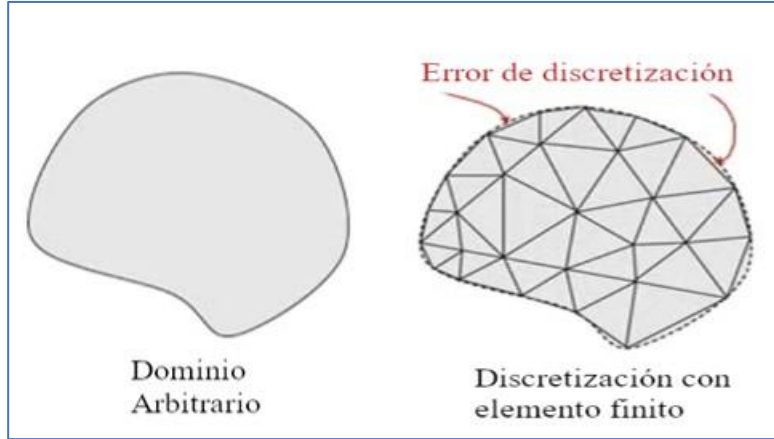


Figura 3.3: Discretización con el método de elemento finito.

3.3.3 Volumen Finito

Este método permite representar y evaluar las EDP en la forma de ecuaciones algebraicas. Requiere discretizar el dominio con una malla (estructurada o no) y cada punto discreto quedara descrito por un conjunto de ecuaciones algebraicas que relacionen el valor de una variable con los valores de puntos aledaños a ella. Este intercambio de información en este método se realiza por medio de esquemas conservativos que evalúan los flujos a través de superficies de control. Es precisamente gracias a estos esquemas que este método sea uno de los más empleados, ya que los principios básicos de conservación (masa, cantidad de movimiento y energía) son rigurosamente respetados. La Figura 3.4 muestra un ejemplo de discretización por este método.

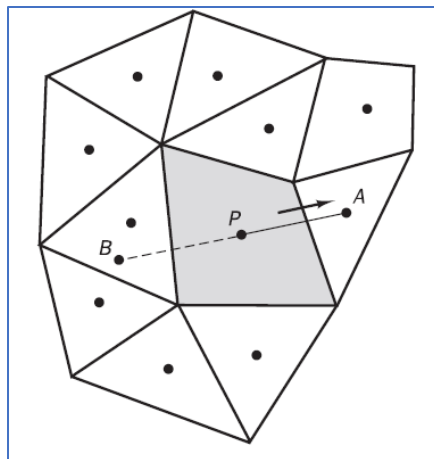


Figura 3.4: Discretización con el método de volumen finito. Tomada de [69].

3.4 MODELACIÓN DE LA TURBULENCIA

En el vasto campo de la dinámica de fluidos, sin importar que los flujos sean geofísicos o artificiales, casi todos los flujos son turbulentos. Los flujos turbulentos presentan fluctuaciones que tienen un efecto significativo en el transporte de calor, de cantidad de movimiento y de masa; por lo que la turbulencia influye determinantemente en la velocidad, temperatura y consecuentemente, en el desarrollo del flujo, en la transferencia de calor, en el mezclado de sustancias, etc. Por su influencia, es necesario poder identificarla. Las características de estos tipos de flujos son: aleatorios, fluctuantes, disipativos, irrotacionales, con alta tendencia al mezclado y presentan un movimiento tipo remolino tridimensional. Generalmente, son distinguidos por sus elevados números de Reynolds y por las inestabilidades introducidas por medio de fronteras irregulares al flujo.

La turbulencia es un atributo exclusivo del flujo, no del fluido, es un fenómeno complejo de definir. Está constituida de escalas dispares comprendidas desde alguna longitud características del flujo hasta escalas disipativas pequeñas. A manera de ejemplos respecto a las escalas de movimiento, por un lado, se tienen las macroscópicas como la velocidad, la variación de la superficie libre, la densidad, la temperatura, entre otras y, por otro lado, las microscópicas como la viscosidad molecular (ν_t), la energía cinética (k) y su tasa de disipación (ε). Todo este espectro de escalas, hacen manifiesto la inexistencia de una teoría de la turbulencia general, motivando el uso de distintos enfoques para lidiar con problemas donde la turbulencia sea fundamental considerarla. Por lo tanto, se requieren de distintos niveles de aproximación para poder describirla. Las ecuaciones de Navier-Stokes son aplicables a diversos tipos de flujos, incluidos los turbulentos; no obstante, dichas ecuaciones hoy en día carecen de una solución analítica cuando son aplicadas a casos complicados. Para resolverlas, comúnmente se recurre a alguna estrategia numérica que permita su solución.

A pesar del avance tecnológico en la industria de la computación, utilizar estas técnicas directamente sobre las ecuaciones resulta inviable debido a que la complejidad numérica en muchas ocasiones rebasa a los adelantos tecnológicos modernos. La razón de esto es que las variables en las ecuaciones son cantidades instantáneas cuyas escalas espaciotemporales son demasiado pequeñas para ser resueltas en las computadoras. A la hora de afrontar algún problema de CFD, se debe determinar el número de escalas a resolver, es decir, la cantidad de energía cinética turbulenta que se vaya a transportar a las ecuaciones de conservación.

Existen tres criterios numéricos para ello: la simulación numérica directa (DNS, por sus siglas en inglés), donde se resuelven todas las escalas de turbulencia, las simulaciones de grandes remolinos (LES, por sus siglas en inglés) donde se resuelven las escalas más grandes que transportan al menos el 50% de toda la energía cinética turbulenta y, finalmente, por medio de una descomposición estadística de las variables en analogía con el comportamiento espectral de ella en el espacio y tiempo. Al último criterio, propuesto originalmente por Osborne Reynolds (1842 - 1921) y que cuando se aplica a las ecuaciones de Navier-Stokes, recibe el nombre de ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés); siendo el más empleado al resolver problemas de CFD por su demanda factible de recursos computacionales.

3.4.1 Simulaciones numéricas directas (DNS)

Estas simulaciones resuelven todas las escalas temporales y espaciales turbulentas (esto incluye las escalas disipativas de Kolmogorov) dentro de un flujo. En general los flujos meteorológicos, oceánicos, y aquellos de interés industrial están atribuidos a números de Reynolds (Re) altos. Cuanto mayor Re , más pequeña es el tamaño de las escalas de Kolmogorov. Considerando esto, el método DNS requiere de mallados finos y pasos de tiempo extremadamente pequeños para obtener soluciones precisas. Por tanto, dado el estado tecnológico actual, esta técnica está restringida a números de Reynolds pequeños con geometrías no complicadas. Para darse una idea de la inmensa cantidad de recursos computacionales requeridos, las siguientes tres expresiones pueden utilizarse [70].

Una estimación del número de nodos necesarios (N_C) en el dominio computacional para una discretización espacial tridimensional está dada por:

$$N_C = \left(\frac{L}{\Delta x}\right)^3 Re^{\frac{9}{4}} \quad (3.7)$$

Donde L es la dimensión característica del dominio computacional. Se puede notar que tan solo para un $Re = 8,000$ se necesitan al menos 6×10^8 nodos.

El número de pasos temporales N_T necesarios se pueden aproximar con:

$$N_T = \frac{T}{\Delta t} Re^{\frac{3}{4}} \quad (3.8)$$

donde T es el periodo de la simulación.

3.4 MODELACIÓN DE LA TURBULENCIA

Y el tiempo total de la simulación computacional T_{sim} es obtenido con la siguiente relación, cuya constante de proporcionalidad depende de la computadora utilizada:

$$T_{sim} \propto \left(\frac{L}{\Delta x}\right)^3 \frac{T}{\Delta t} Re^3 \quad (3.9)$$

A pesar del uso restrictivo actual de esta técnica, vale la pena mencionar algunas ventajas de utilizarla:

- Se genera información instantánea, la cual no es posible ser capturada por medio de la instrumentación. Así, las estructuras turbulentas instantáneas pueden ser visualizadas y probadas.
- Se obtienen detalles con precisión superior de los parámetros turbulentos. Esto puede ser utilizado para desarrollar y validar modelos de turbulencia de reciente creación.
- En aquellos casos donde se requiera investigación fundamental de la turbulencia, DNS permite que técnicas avanzadas de experimentación puedan ser evaluadas y validadas.

A medida que siga avanzando el desarrollo tecnológico en los próximos años, cada vez será más factible el uso de esta técnica. Una gráfica de la evolución del avance en desarrollo del poder de procesamiento computacional se puede consultar en [26].

3.4.2 Large Eddy Simulation (LES)

Esta simulación es una forma intermedia de calcular la turbulencia, basándose principalmente en rastrear el comportamiento de los remolinos más grandes. Consiste en realizar un filtrado espacial a las ecuaciones de Navier-Stokes con el objetivo de resolver los remolinos de mayor tamaño y de despreciar los más pequeños. La interacción entre los remolinos grandes resueltos y los más pequeños no resueltos dan lugar a la formación de esfuerzos del tipo sub-grid-scale (SGS, por sus siglas en inglés). Dichos esfuerzos son considerados por medio de algún modelo de submalla, conocido como SGS model. En el caso particular del método de volumen finito, las ecuaciones de Navier-Stokes filtradas espacialmente son resueltas junto a un modelo SGS en los volúmenes de control sobre una malla y, en este caso, los remolinos resueltos serán aquellos de tamaño mayor a la malla utilizada (tamaño del filtro).

Lo anterior es motivado por la dificultad de modelizar los remolinos grandes debido a su anisotropía, es decir, pudiesen sujetarse a los efectos mnésicos del flujo y, además, ellos

dependen de la geometría y del flujo principal [71]. Por otro lado, como es sabido, las escalas pequeñas requieren de mallas finas, inviables para números de Reynolds altos. Dada la isotropía de las últimas escalas, ellas han olvidado su procedencia, por lo que es posible modelarlas con un modelo de turbulencia para disminuir la dependencia a altos recursos computacionales.

Habiendo seleccionado y aplicado un filtro apropiado a las ecuaciones de Navier-Stokes, se incorpora el termino adicional conocido como de esfuerzos turbulentos de la subescala, o esfuerzos SGS

$$\tau_{ij} = \rho[\overline{v_i v_j} - \bar{v}_i \bar{v}_j] \quad (3.10)$$

Este tensor se compone de tres contribuciones [69]:

$$\tau_{ij} = L_{ij} + C_{ij} + R_{ij} \quad (3.11)$$

En la ecuación (3.11) en su lado derecho, el primer término es el tensor de *esfuerzos de Leonard*, que representa la interacción entre las escalas resueltas y la transferencia de energía a las escalas más pequeñas; el segundo término es el tensor de *esfuerzos cruzados* y representa la interacción entre las escalas resueltas y las modeladas; finalmente el ultimo termino es el tensor de *esfuerzos de Reynolds* de la subescala y representa la interacción entre las escalas más pequeñas.

Algunos métodos para modelar los esfuerzos de Reynolds por técnica LES son: Smangorinsky-Lilly, modelo WALE (Wall Adapting Local Eddy-Viscosity), modelo dinámico de subescala (modelo avanzado) y modelo de transporte de energía cinética (orden superior).

La cantidad de recursos computacionales necesarios para utilizar LES suelen ser mayores que cuando se utiliza la técnica RANS, pero menores a los requeridos por DNS. Se estima [72] que en tiempo de cómputo es del doble comparado con una modelación basada en RANS con el modelo de esfuerzos de Reynolds, esto da pauta a que en ciertos escenarios pudiese considerarse como alternativa de modelación. Finalmente, la inclusión de la técnica LES a paquetes de CFD comerciales es reciente, por lo que presenta un área de oportunidad para investigación al no haber disponibles suficientes trabajos que lo validen.

3.4.3 Técnica RANS

Esta técnica se enfoca al flujo medio y los efectos de la turbulencia en las propiedades del flujo medio. Se basa en promediar temporalmente las ecuaciones de Navier-Stokes, consecuentemente términos adicionales se incorporan a estas ecuaciones ya promediadas por las interacciones entre varias fluctuaciones turbulentas. Estos últimos términos se modelan por medio de diversos modelos de turbulencia. En décadas recientes, el uso de esta técnica ha sido ampliamente empleada debido a que la demanda de recursos computacionales es razonablemente modesta para obtener valores del flujo medio con precisión aceptable. Las siguientes subsecciones describen esta técnica.

3.4.3.1 La aproximación de Reynolds

Mencionada previamente, una característica de la turbulencia es la presencia evidente de fluctuaciones aleatorias, las cuales se superponen al valor promedio (estadístico). La aproximación RANS tiene como su fundamento de aplicación la introducción de un promedio temporal a las variables $F(\vec{x}, t)$ con el propósito de separar al valor promedio $\bar{F}(\vec{x}, t)$ de la parte fluctuante f' (Figura 3.5). Esto es:

$$F(\vec{x}, t) = \bar{F}(\vec{x}, t) + f' \quad (3.12)$$

donde el promedio de una variable continua, en el periodo $t + T$, esta dado por:

$$\bar{F}(\vec{x}, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} F(\vec{x}, t) dt \quad (3.13)$$

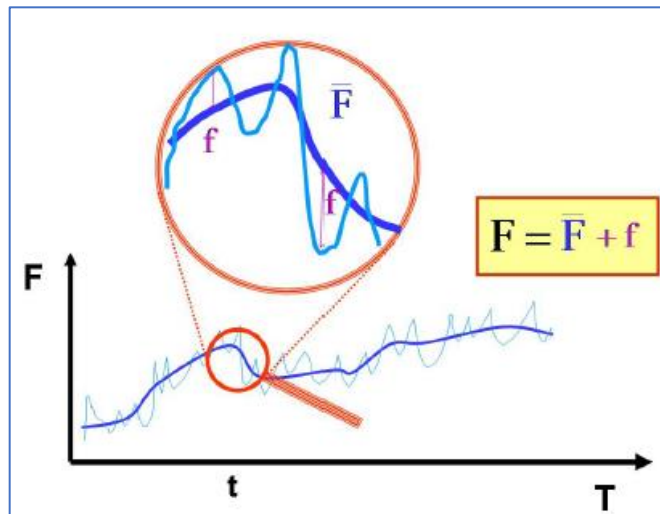


Figura 3.5: Fluctuaciones de una cantidad turbulenta.

Es importante mencionar que este promedio (estadístico) tiene atribuido un sentido de la física al cumplirse dos condiciones:

- El tiempo de promedio debe ser considerablemente mayor que el periodo característico de las fluctuaciones turbulentas y,
- El tiempo de promedio tiene que ser pequeño en relación con el tiempo de variación de las propiedades del flujo en cuestiones ajenas a la turbulencia.

La fluctuación f' está definida como sigue:

$$f' = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f dt = 0 \quad (3.14)$$

Esto es, el promedio temporal de las fluctuaciones es cero.

3.4.3.2 Propiedades del promedio temporal

El promedio temporal ofrece una serie de propiedades interesantes. A estas propiedades se les conoce como postulados de Reynolds y son presentadas a continuación. Sean dos variables promediadas según $U = \bar{U} + u'$ y $V = \bar{V} + v'$, al ser el promedio temporal un operador lineal, se establecen las siguientes relaciones:

a) Linealidad

$$\begin{aligned} \overline{U + V} &= \bar{U} + \bar{V} \\ \overline{UV} &= \bar{U}\bar{V} + \overline{u'v'} \\ \overline{cU} &= c\bar{U} \\ \bar{c} &= c \end{aligned} \quad (3.15)$$

con c una constante cualquiera y la sobreraya ($\bar{\quad}$) en las variables indica un promedio estadístico de acuerdo con ecuación (3.13).

b) Conmutatividad con operadores diferenciales e integrales

$$\begin{aligned} \overline{\frac{\partial U}{\partial s}} &= \frac{\partial \bar{U}}{\partial s} \\ \overline{\int U ds} &= \int \bar{U} ds \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\overline{\nabla \cdot (\nabla U)} = \nabla \cdot (\nabla \bar{U})$$

donde s representa indistintamente a un diferencial espacial o temporal.

c) Invarianza

$$\overline{\bar{U} \cdot \bar{V}} = \bar{U} \cdot \bar{V} \quad (3.17)$$

El axioma presentado en ecuación (3.17) implica las siguientes propiedades importantes:

$$\overline{\bar{U}} = \bar{U}$$

$$\overline{\bar{U} \bar{V}'} = 0 \quad (3.18)$$

$$\overline{\bar{U}'} = \overline{(U - \bar{U})} = 0$$

Como corolario de lo anterior, el promedio de un producto no lineal entre fluctuaciones turbulentas $(\overline{u'v'}, \overline{f^2})$ no siempre es cero.

3.4.3.3 Los esfuerzos de Reynolds

Al aplicar la descomposición estadística según la ecuación (3.12) y posteriormente al hacer efectivos los postulados de Reynolds en las ecuaciones de Navier-Stokes, se obtienen las ecuaciones medias para la cantidad de movimiento. A manera de ejemplo, se presenta la ecuación para la componente de velocidad media en la dirección de x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial (u'v')}{\partial x} + g_x \quad (3.19)$$

Como puede observarse en el lado derecho de la ecuación (3.19), el antepenúltimo término es introducido por los términos advectivos ya que la naturaleza no lineal de ellos deriva en retener al producto de las fluctuaciones, generando que incógnitas adicionales sean añadidas a las ecuaciones. Este nuevo término recibe el nombre de Esfuerzos de Reynolds y representa las fluctuaciones de la velocidad.

3.4.3.4 Modelos de turbulencia tipo RANS

Los Esfuerzos de Reynolds introducen incógnitas estadísticas adicionales a las ecuaciones de Navier-Stokes. Al no haber ecuaciones adicionales para que el sistema de ecuaciones sea consistente y determinado, se debe recurrir a alguna técnica que permita resolver dichas relaciones. La aproximación RANS se fundamenta en obtener el valor esperado de una variable y no su valor instantáneo. Cuando se aplica un operador estadístico, es posible resolver para una variable con la desafortunada expensa de aparecer una nueva variable desconocida. Bajo esta lógica, si se quisiera obtener una

3. LA CFD EN LOS PRBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MEZCLADO

expresión para la correlación doble de la ecuación (3.19) a partir de su ecuación para las fluctuaciones, se obtendría ahora una correlación triple la cual implica nuevas incógnitas estadísticas desconocidas; este procedimiento se puede seguir indefinidamente. A este artificio estadístico se le conoce como el problema de cerradura de las ecuaciones para la turbulencia. Si bien es cierto que este proceso incorpora principios físicos adicionales (algunos de los cuales siguen sin ser comprendidos), resulta evidente que proceder así imposibilita cerrar el problema de la turbulencia [73].

Por lo tanto, para lidiar con el problema del cierre de la turbulencia, la estrategia empleada es modelar las correlaciones dobles. Lo que se hace es relacionarlas mediante alguna técnica simple o compleja, con las incógnitas ya existentes; es decir, con la parte promediada de las variables. La literatura en turbulencia clásica muestra la existencia de diversos modelos de turbulencia bajo la técnica RANS, los cuales se clasifican como se muestra en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Clasificación de modelos de turbulencia bajo la técnica RANS

Modelo de turbulencia	Ecuaciones de transporte adicionales
<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de mezclado de Prandtl • Baldwin – Lomax • Algebraic Eddy Viscosity Model (AEM) • Cecebi – Smith • Coeficientes constantes 	0 ecuaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Baldwin - Barth • Spalart - Allmaras • $k - L$ 	1 ecuación
<ul style="list-style-type: none"> • $k - \varepsilon$: estándar, RNG, Realizable • $k - \omega$: estándar, SST • $v^2 - f$ 	2 ecuaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de transporte para los esfuerzos de Reynolds (RSM, por sus siglas en inglés) 	6 ecuaciones

3.4 MODELACIÓN DE LA TURBULENCIA

Describirlos todos ellos salen de los alcances de este trabajo, por tanto, solo uno se describe por ser el preferido en el campo ingenieril y debido a que será utilizado en este trabajo de investigación.

Modelos de viscosidad artificial (Eddy Viscosity Models, EVM)

Una estrategia utilizada en la modelación de la turbulencia fue propuesta por [76]. Ella se basa en la suposición de que tales esfuerzos son directamente proporcionales al tensor local promedio de deformaciones (local mean rate of strain), comúnmente conocida como la hipótesis de viscosidad artificial μ_t o turbulenta. El tensor promedio de deformaciones se denomina como:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.20)$$

Considerando que cuando se trate de fluidos del tipo newtonianos, es posible generalizar la ley de Newton (ecuación (3.1)) que relaciona los esfuerzos cortantes con los gradientes de velocidad (deformación) mediante la viscosidad molecular del fluido:

$$\tau_{ij}^{visc} = \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.21)$$

La hipótesis de Boussinesq establece que existe alguna analogía entre la interacción de los esfuerzos viscosos y de los esfuerzos promedio de Reynolds. De esta manera, los esfuerzos promedio de Reynolds están relacionadas con el tensor promedio de deformaciones (ecuación 3.20) por medio de μ_t

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{U_i' U_j'} \approx \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) = 2 \mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3.22)$$

Un término adicional debe incorporarse para considerar una inconsistencia energética en la ecuación (3.22). Esto es debido a que la traza del tensor promedio de deformaciones es regida por la ecuación de continuidad que, al ser igual a cero, la energía cinética k se hace nula. Además, la traza del tensor de los esfuerzos de Reynolds especifica que la energía cinética es doble [77]. Por tanto, la ecuación (3.22) es corregida como sigue:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{U_i' U_j'} \approx \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.23)$$

donde δ es el delta de Kronecker y k se expresa como la semisuma de la traza del tensor de Reynolds:

$$k = \frac{1}{2} \rho \overline{U'_i U'_i} = \frac{1}{2} (\rho \overline{U'^2} + \rho \overline{V'^2} + \rho \overline{W'^2}) \quad (3.24)$$

Utilizando la hipótesis de μ_t (Eddy Viscosity Hypothesis), basada en que las fluctuaciones son isotrópicas, permite sustituir los esfuerzos de Reynolds por gradientes de velocidad, los cuales son incógnitas previamente establecidas. De esta manera, el sistema de ecuaciones esta casi cerrado; la incógnita final por obtener es μ_t , la cual es determinada por algún modelo de turbulencia (ver Tabla 3.1).

Modelo k-epsilon estándar (k - ε)

Este modelo obtiene la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación de la energía (ε) con ecuaciones de transporte, de esta manera se considera su evolución temporal en el flujo. Surge de la base de representar a ν_t con la siguiente expresión:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.25)$$

El coeficiente C_μ se puede estimar por medio de relaciones empíricas que permitan adaptar su valor para cada problema en particular. La versión denominada estándar fija su valor $C_\mu = 0.09$, sin embargo, este valor no es universal.

La ecuación para la energía cinética turbulenta k es:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_D \frac{k^{3/2}}{L} \quad (3.26)$$

Y la ecuación para la tasa de disipación de la energía ε es:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.27)$$

Con los siguientes valores para las constantes que conforman la versión estándar de este modelo: $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$ y $C_{2\varepsilon} = 1.92$. El valor de P_k se obtiene al evaluar el segundo termino en el lado derecho de la ecuación (3.27).

3.5 ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL MOVIMIENTO DE LAS AGUAS SOMERAS

Las RANS son ecuaciones generales que pueden usarse para describir el movimiento de fluidos. En el caso particular del agua, muchas de sus aplicaciones de interés recaen en zonas continentales o en áreas costeras, donde los cuerpos de agua son someros, es decir, las escalas en la horizontal son mayores que en la vertical ($\Delta x \approx \Delta y \gg \Delta z$). Si en dichos cuerpos de agua, las velocidades en el plano horizontal son mayores con respecto al plano vertical, se puede afirmar que es un flujo en aguas someras. La diferencia de magnitud entre escalas horizontales y verticales justifican la distinción entre viscosidades horizontales ν_H y verticales ν_V . Dichas escalas dan pauta a utilizar la aproximación de Boussinesq, la cual considera a la densidad con variaciones despreciables y, consecuentemente, la presión P en la vertical se asume como hidrostática. Con estas consideraciones, se reduce la componente vertical en la ecuación (3.4) a lo siguiente:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3.28)$$

Al integrar la ecuación (3.28) desde el fondo del cuerpo de agua $z = -d$ hasta su superficie $z = \eta$ y aplicando la regla de integración de Leibnitz en dirección x , se obtiene:

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (3.29)$$

Y análogamente para la dirección y

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (3.30)$$

Al sustituir las ecuaciones (3.29) y (3.30) en las ecuaciones de Navier-Stokes se obtienen las denominadas ecuaciones para aguas someras, que en su forma cartesiana se escriben como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \nu_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f_x \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \nu_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f_y \quad (3.32)$$

Y por su parte la ecuación de continuidad se escribe como:

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (3.33)$$

donde:

- u es la componente del vector velocidad en dirección x , (m/s)
- v es la componente del vector velocidad en dirección y , (m/s)
- w es la componente del vector velocidad en dirección z , (m/s)
- t es el tiempo, (s)
- η es la variación de la superficie libre, (m)
- f es la componente de la fuerza de Coriolis por unidad de masa, se define como $f = 2\Omega \sin(\text{latitud})$
- Ω Es el vector de rotación de la tierra, (rad/s)

Estas ecuaciones forman un sistema de tres ecuaciones con cuatro funciones desconocidas, las tres componentes de velocidad (u, v, w) y la variación de la superficie libre del agua (η). Por lo tanto, es necesario una ecuación adicional para hacer consistente al sistema de ecuaciones. Dicha ecuación es deducida al integrar la ecuación (3.33) a lo largo del eje vertical, obteniendo:

$$w(x, y, \eta, t) - w(x, y, d, t) = -\int_{-d}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz - \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial y} dz \quad (3.34)$$

Con d como la profundidad por debajo del plano de referencia $z = 0$. En la ecuación (3.34) los cambios morfológicos del fondo marino son despreciables debido a que el flujo de agua es ínfimo en dicha zona. Tomando esto en consideración, d se puede considerar como una función espacial y no temporal, por lo cual w se puede definir como sigue:

- En la superficie

$$w = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (3.35)$$

- En el fondo

$$w = -\left(u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y}\right) \quad (3.36)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.35) y (3.36) en ecuación (3.34) y utilizando la regla de integración de Leibnitz, se obtiene la ecuación para la variación de la superficie libre:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-d}^{\eta} u dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-d}^{\eta} v dz \right) = 0 \quad (3.37)$$

Por último, al sistema de EDP (3.31), (3.32) y (3.37) se le conoce como Shallow Water Equations (SWE).

3.6 MODELOS HIDRODINÁMICOS CON CAPACIDAD DE SIMULAR LA DISPERSIÓN TÉRMICA

Mundialmente, están disponibles una gama amplia de opciones para seleccionar modelos numéricos para flujos a superficie libre. Existen los modelos de acceso libre (Open Source) y los comerciales. Diversos factores deben tomarse en cuenta a la hora de optar por un modelo numérico gratuito o comercial: consideración de diversos parámetros físicos, interfaz de interacción amigable con el usuario, aproximación numérica, tiempo de procesamiento computacional, costo del producto, simplicidad de uso, etc. Algunos ejemplos de modelos hidrodinámicos capaces de reproducir la dispersión térmica se presentan y se describen en las siguientes subsecciones. La Tabla 3.2 presenta la página web de los modelos hidrodinámicos y de dispersión térmica descritos en la siguiente subsección.

Tabla 3.2: Sitios web de los modelos hidrodinámicos descritos.

Modelo Hidrodinámico	Página web
Mike 3	https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-3
FLOW-3D HYDRO	https://www.flow3d.com/products/flow-3d-hydro/
TELEMAC-MASCARET	http://www.opentelemac.org/
EFDC Explorer	https://www.eemodelingsystem.com/
MOHID-STUDIO	https://www.bentley.com/en/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/openflows-flood
Delft3D	https://oss.deltares.nl/web/delft3d

3.6.1 Mike 3

Mike 3 es la versión 3D del modelo Mike 21. Es un programa desarrollado por el Danish Hydraulic Institute (DHI). El modelo Mike 3 es un sistema de modelación basado en el enfoque de mallado flexible, aplicable a problemas de índole oceanográficas, costeras y en estuarios. Permite realizar simulaciones hidrodinámicas, de calidad del agua y de transporte de sedimentos en cuerpos de agua donde los efectos de la columna vertical de agua no son despreciables. Su módulo hidrodinámico utiliza un método de volumen finito denominado "método implícito de dirección alternada" (ADI, por sus siglas en inglés) de segundo orden, con el fin de integrar las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, dentro de un dominio computacional en un periodo establecido, es decir, las ecuaciones son resueltas para cada dirección y celda, mediante un algoritmo de doble barrido.

El módulo de advección-dispersión resuelve la denominada ecuación de sustancias disueltas. Simulan también la concentración de algún componente (temperatura) en locaciones donde se consideren fuentes o sumideros asociados a una tasa de decaimiento.

Su mallado horizontal puede ser del tipo estructurado o no estructurado, en coordenadas cartesianas o esféricas. La malla vertical utiliza coordenadas tipo sigma σ , una combinación entre coordenadas Z y σ además de la denominada σ - general. Para la modelación de la turbulencia, cuenta con los siguientes modelos: coeficientes constantes, algebraico y $k - \varepsilon$.

Los datos necesarios para correr el programa son: condiciones ambientales (radiación solar, temperatura ambiente) condiciones de frontera, condiciones iniciales, datos sobre fuentes y sumideros, cambios en concentraciones.

Este modelo es del tipo comercial, incluida su interfaz de uso. Se ejecuta en sistema operativo Windows y su código fuente fue escrito en Fortran. Cuenta con documentación de uso amplia.

3.6.2 FLOW-3D HYDRO

FLOW-3D HYDRO es un modelo numérico de reciente creación para la familia de productos denominada FLOW-3D desarrollada por Flow Science en los Estados Unidos de América. FLOW-3D es un programa comercial para CFD, de alta precisión, especializado en resolver problemas del tipo transitorios y de superficie libre. FLOW-3D HYDRO se enfoca en resolver problemas de ingeniería ambiental y civil; en particular los de residuos minerales, flujos multifase y modelación de aguas someras. Sus cinco áreas principales de aplicación son: presas y vertedores hidráulicos, infraestructura para transporte de fluidos, ambientales y ríos, tratamiento de agua y, por último, puertos y costas.

FLOW-3D HYDRO resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en su versión adaptada a la dinámica de superficies libres. Emplea el método de alta precisión TruVOF Volume-of-Fluid (VOF) para lamina libre en la solución numérica. Se utiliza el método de mallado denominado Fractional Area-Volume Obstacle Representation (FAVOR) para incorporar directamente en la malla la geometría del problema, permitiendo hacer ajustes rápidos sin depender de un programa auxiliar externo. Para la modelación de la turbulencia, están disponibles los siguientes modelos: modelo $k - \varepsilon$ de grupo de renormalización (RNG), modelo $k - \varepsilon$ estandar, modelo $k - \omega$ y también del tipo Large Eddy simulation.

Vale la pena mencionar sus tipos de licencia: la licencia Shared Memory Processing (SMP) para hacer simulaciones vía una red local (VPN) sobre una Workstation, con uno o más procesadores montados en una tarjeta madre; la licencia High Performance Computing (HPC) donde el dominio de cómputo se descompone en unos cuantos y se lanza en un cluster de cálculo, ideal para dominios gigantes o tiempos de simulación prolongados. También es posible albergar las licencias a un servicio computacional en la nube, denominado FLOW-3D CLOUD, para ampliar los recursos de hardware y software a miles de núcleos computacionales.

El modelo y los manuales de usuario se encuentran disponibles en su página web.

3.6.3 TELEMAC-MASCARET

TELEMAC-MASCARET es una suite integrada de solucionadores aplicados al campo del flujo en superficie libre y es administrado por el siguiente consorcio: Artelia (Francia)-BAW (Alemania)-CEREMA(Francia)-Daresbury Laboratory (Reino Unido)-EDF (Francia)-HR Wallingford (Reino Unido).

La suite reúne solucionadores basados en elemento finito para simular la hidrodinámica de aguas someras. Los distintos módulos encontrados en la suite pueden simular propagación del viento, transporte de sedimentos, flujo subterráneo, transporte de trazadores y morfodinámica. Las ecuaciones 3D de Navier-Stokes son resueltas con el módulo TELEMAC-3D con la opción de seleccionar la hipótesis de presión no-hidrostática. En este módulo se pueden crear mallas no estructuradas, que permite un refinamiento local en ubicaciones claves dentro del dominio computacional y una implementación sencilla de condiciones de frontera para la discretización vertical, la cual puede utilizarse en coordenadas tipo σ y un híbrido denominada $Z - \sigma$. Además, permite habilitar el uso de ecuaciones de transporte diversas para cantidades intrínsecas como temperatura, salinidad y concentración; ello permite incluir su influencia en la hidrodinámica. Más aún, también es posible la selección de los siguientes modelos de turbulencia para realizar simulaciones: coeficientes constantes, longitud de mezclado, Prandtl, Smagorinsky y el $k - \varepsilon$ estándar.

TELEMAC-MASCARET incluye un módulo para considerar la propagación de oleaje conocido como TOMAWAC, el cual resuelve una ecuación simplificada para la densidad espectro-angular por acción de onda a través de metodología basada en elemento finito y así poder describir la propagación del oleaje y su dinámica en zonas costeras.

Esta suite es pública, por lo que es posible acceder y probar todas sus características. Puede ejecutarse en los sistemas operativos Windows y Linux. Documentación para su implementación está disponible en su sitio web.

3.6.4 EFDC Explorer

El modelo hidrodinámico Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC), en sus inicios fue desarrollado por el Virginia Institute of Marine Science para simular ecosistemas acuáticos (ríos, lagos, estuarios, reservorios, humedales y zonas costeras) en una, dos y tres dimensiones. Su versión con interfaz gráfica, conocida como EFDC Explorer para el sistema operativo Windows y escrito en lenguaje Fortran, actualmente es administrada por la firma de ingeniería, desarrollo e investigación Dynamic Solutions International (DSI) en los Estados Unidos de América.

El modelo EFDC Explorer tiene la capacidad de analizar la hidrodinámica en 2 y 3 dimensiones y la calidad del agua. Resuelve de forma simultánea las ecuaciones de continuidad, de superficie libre, de cantidad de movimiento y, junto a ecuaciones de transporte, es posible acoplar la salinidad, temperatura, sedimentos y contaminantes a la hidrodinámica. Las ecuaciones son resueltas numéricamente con un esquema basado en diferencias finitas de segundo orden. Se emplea una metodología robusta y eficiente para solucionar la hidrodinámica denominada mode-splitting, la cual es típica de los modelos oceanográficos. Mode-splitting consiste en dos etapas: externa e interna. La primera soluciona las ecuaciones de cantidad de movimiento integradas en la vertical para obtener un promedio de las velocidades horizontales y la variación superficial del agua. En la segunda, las mismas ecuaciones vuelven a ser resueltas con los promedios obtenidos, pero ahora sin considerar la integración en la vertical, pudiendo así registrar las variaciones en la estructura vertical de la velocidad y otras propiedades en la columna de agua. Esta solución se lleva a cabo sobre mallas estructuradas.

Dos tipos de malla horizontales están disponibles en el modelo: malla curvilínea-ortogonal y malla cartesiana. La discretización vertical se puede hacer en coordenadas σ . Para estimar la turbulencia, utiliza el modelo de Mellor y Yamada.

El modelo EFDC es de acceso gratuito al público con el inconveniente de que primero hay que compilar el código fuente, mientras que su versión con interfaz gráfica es comercial. La documentación para utilizar el modelo y poder descargar el código es por medio de su sitio web.

3.6.5 MOHID STUDIO

El modelo MOHID STUDIO se desarrolló en el Marine and Environmental Research Center (MARETEC) que pertenece al Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad Técnica de Lisboa en Portugal. MOHID se puede utilizar para simular una amplia variedad de procesos que ocurren en cuencas hidrológicas, acuíferos, ríos, lagos, estuarios, zonas costeras y en el océano y las simulaciones pueden ser ejecutadas en 1, 2 y 3 dimensiones. Estudiar el ciclo del agua desde una perspectiva holística es posible en MOHID STUDIO por medio de diversos módulos fácilmente acoplables: MOHID Water, MOHID Land y MOHID Soil.

MOHID Water es la herramienta numérica para simular diversos procesos asociados a los cuerpos de agua. Está integrado con diversos módulos que permiten predecir los procesos físicos y biogeoquímicos del agua. Su módulo motor es el hidrodinámico, pues está constituido por un modelo de flujo a superficie libre baroclínico en 3D basado en las ecuaciones de Navier-Stokes y que considera las hipótesis de presión hidrostática y de Boussinesq. En él, la solución numérica se obtiene al efectuar discretización espacial con el método de volumen finito y la temporal con el algoritmo ADI. Es posible considerar variables meteorológicas o solo propiedades atmosféricas. La malla horizontal puede ser generada en coordenadas cartesianas o curvilíneas, pudiendo incluso ser del tipo no estructurada. La malla vertical admite coordenadas σ y la híbrida denominada $Z - \sigma$. Tres modelos de turbulencia están disponibles para estimar los esfuerzos de Reynolds: $k - \varepsilon$, longitud de mezclado y de coeficientes constantes.

Otros módulos de MOHID Water son: calidad del agua (producción primaria y secundaria, ciclo de nutrientes), dinámica de sedimentos (procesos en el fondo que involucran al movimiento horizontal y vertical), rastreo de partículas (simula la trayectoria de fluidos a través de trazadores Lagrangianos en campo lejano), derrame de aceite y modelación de chorros (trayectoria y dilución de fluidos asociados a chorros descargados).

MOHID STUDIO puede considerarse como software público con ciertas restricciones. Recientemente, Bentley Systems unificó MOHID Water y MOHID Land en un solo software comercial llamado OpenFlows FLOOD. Este software es el sucesor de MOHID STUDIO.

3.6.6 Delft3D

Delft3D es un modelo totalmente integrado, enfocado multidisciplinariamente por medio de cálculos tridimensionales a ríos, lagos, estuarios y zonas costeras. Puede hacer modelación numérica de flujos, transporte de sedimentos, calidad del agua, oleaje, morfología y ecología. El modelo fue desarrollado por Deltares en los Países Bajos. El módulo que permite resolver problemas para flujo a superficie libre se conoce como Delft3D-FLOW. Este módulo permite ejecutar simulaciones numéricas en 2D integradas en la vertical y también de forma tridimensional. Se resuelven las ecuaciones RANS, bajo la hipótesis de presión hidrostática y los postulados de Boussinesq. Para obtener una mejor representación de la realidad física, es posible modificar los parámetros de modelaje como la batimetría, la malla computacional, tamaño de celda e incorporar procesos como la temperatura, salinidad y sólidos en suspensión. Además, también se pueden considerar las variaciones de parámetros atmosféricos y oceanográficos.

La malla numérica, estructurada y no estructurada, puede ser construida en coordenadas cartesianas-curvilíneas o esféricas en la horizontal. En la vertical están disponibles coordenadas σ o Z . El método de solución numérico utiliza diferencias finitas de segundo grado de precisión, tiene incluidos los siguientes esquemas para las ecuaciones advectivas: WAQUA, Cyclic y Flooding; las ecuaciones de transporte disponen de dos esquemas para su solución: Cyclic y Van Leer-2. La discretización temporal se realiza con esquemas tipo ADI. La turbulencia es modelada con los siguientes modelos para problemas en 3D: coeficientes constantes, un modelo algebraico, $k - L$ y $k - \varepsilon$ estándar. Delft3D incluye un modelo adicional conocido como Horizontal Large Eddy Simulation (HLES) para considerar los movimientos horizontales turbulentos que no son resueltos por la malla horizontal.

Delft3D es posible descargarlo en su presentación Open Source software con el inconveniente de que es necesario compilar alguna revisión de su código fuente. También es posible adquirir una versión comercial con una revisión totalmente probada. En ambos casos el modelo hidrodinámico está incluido junto con su documentación en su sitio web.

3.7 MODELO DELFT3D-FLOW

Después de revisar diversos modelos hidrodinámicos capaces de reproducir la dispersión térmica de CGE en el mar, se optó por utilizar el modelo Delft3D-FLOW para la elaboración del presente trabajo de investigación. La selección del modelo se debió principalmente por lo siguiente:

- Es un modelo ampliamente probado y validado en la literatura científica en diversos estudios hidrodinámicos y ha sido utilizado para caracterizar la dispersión térmica emitida por CGE al mar.
- Permite considerar variables hidrológicas, atmosféricas, ambientales y oceanográficas.
- Existe una versión de libre acceso (Open Source) para poder utilizarlo la cual cuenta con una interfaz amigable para el usuario, facilitando así su implementación a diversos casos de estudios.
- Cuenta con esquemas numéricos de solución robustos, lo que permite realizar simulaciones en tiempos razonables. Además, el modelo es noble en la fase del procesamiento de información; rara vez las simulaciones no terminan su ejecución.
- Tiene disponible la selección de 4 modelos de turbulencia tipo RANS (3D) y un modelo tipo LES en simulaciones 2D.
- Dispone de un post procesador para visualizar y analizar los resultados obtenidos. Además, cuenta con opciones que facilitan la extracción y exportación de ellos.

Habiendo expresado lo anterior, las siguientes subsecciones presentaran de forma breve los aspectos técnicos del modelo Delft3D-FLOW. Más aún, dada la naturaleza del presente trabajo, se describirán los modelos de turbulencia que se utilizarán por medio del modelo Delft3D-FLOW. Toda esta información en particular se puede acceder de forma detallada en el manual del usuario [33].

3.7.1 Sistemas de coordenadas en la horizontal

Los dominios geométricos complejos como los ríos y las áreas costeras son difíciles de mallar. Debido a que esos dominios son irregulares de forma natural, ciertos errores de discretización pueden ocurrir si se realiza un mallado regular sobre ellos. Para evitar estos errores, Delft3D-Flow permite la generación de mallas curvilíneas (Figura 3.6). En Delft3D-FLOW, dos tipos de mallas están disponibles para la horizontal: cartesiana (ξ, η) y esférica (λ, ϕ). La primera es utilizada en áreas locales pequeñas y la segunda es común

utilizarla en áreas extensas. En este trabajo, la malla a utilizarse esta generada en coordenadas cartesianas.

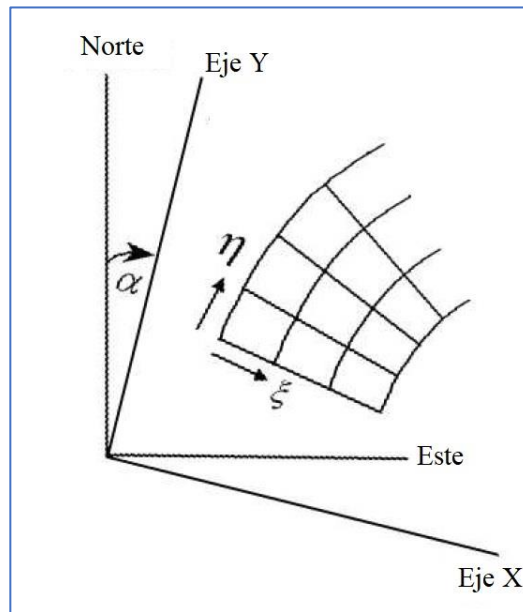


Figura 3.6: Sistema de coordenadas curvilíneo (ξ, η) . Adaptado de [33].

Los coeficientes $\Delta x = \sqrt{G_{\xi\xi}}$ y $\Delta y = \sqrt{G_{\eta\eta}}$ cada uno representa el ancho de celda (m) y se utilizan para transformar de coordenadas curvilíneas a rectangulares, en la dirección x e y, respectivamente (Figura 3.7).

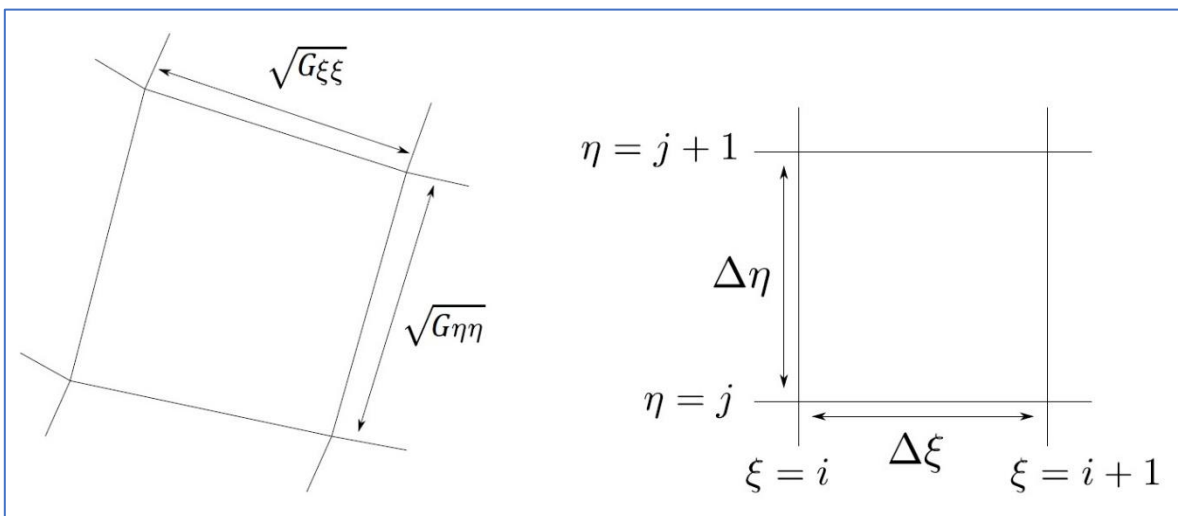


Figura 3.7: Mapeo del espacio físico al espacio computacional. Adaptado de [33].

3.7.1.1 Staggered grid

Los métodos numéricos que utiliza Delft3D-FLOW se basan en las diferencias finitas. Para discretizar las SWE tridimensionales en el espacio físico, el dominio numérico es cubierto por una malla curvilínea. Dicho dominio está conformado por celdas, donde en ellas las variables vectoriales y escalares son colocadas de una manera particular. A este arreglo particular se le conoce como Arakawa C-grid (Figura 3.8). En este mallado, conocido como escalonado (staggered), los escalares se definen al centro de celda y los vectores se posicionan de forma perpendicular a la cara en la celda de la malla donde ellos se sitúan.

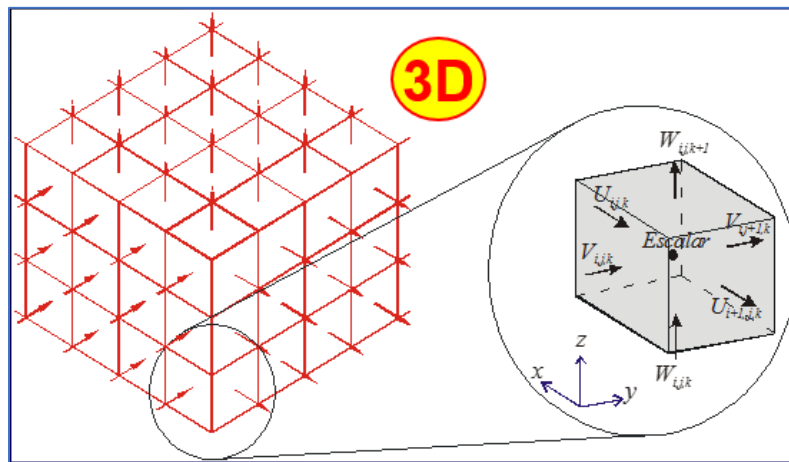


Figura 3.8: Malla 3D tipo Arakawa-C

3.7.2 Malla vertical

Delft3D-FLOW incluye dos tipos de mallas en la dirección vertical: malla tipo σ y la malla tipo Z (Figura 3.9). Al utilizar la malla en coordenadas tipo σ , se fija sobre la malla horizontal un numero constante de capas en la vertical, las cuales pueden variar su espesor. El presente trabajo de investigación utiliza coordenadas tipo σ .

El Sistema de coordenadas tipo σ se define como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (3.38)$$

donde:

- z es la coordenada vertical en el espacio físico, (m)
- ζ es la elevación de la superficie libre sobre un plano de referencia ($z = 0$), (m)
- d es la profundidad debajo de un plano de referencia, (m)
- H es la profundidad total del agua, (m)

En este sistema, en la superficie $\sigma = 0$ y en el fondo $\sigma = -1$. Es importante mencionar que este tipo de coordenada no es apropiado utilizarlo cuando hay flujo estratificado en combinación de una topografía accidentada. Para este tipo de escenarios, es preferible utilizar malla tipo Z debido a que alcanza suficiente resolución alrededor de la picnoclina la cual es estrictamente horizontal en el espacio físico. Una desventaja de este último mallado es que carece de la capacidad de adaptarse al entorno del fondo, mientras que la malla tipo σ sí se puede adaptar.

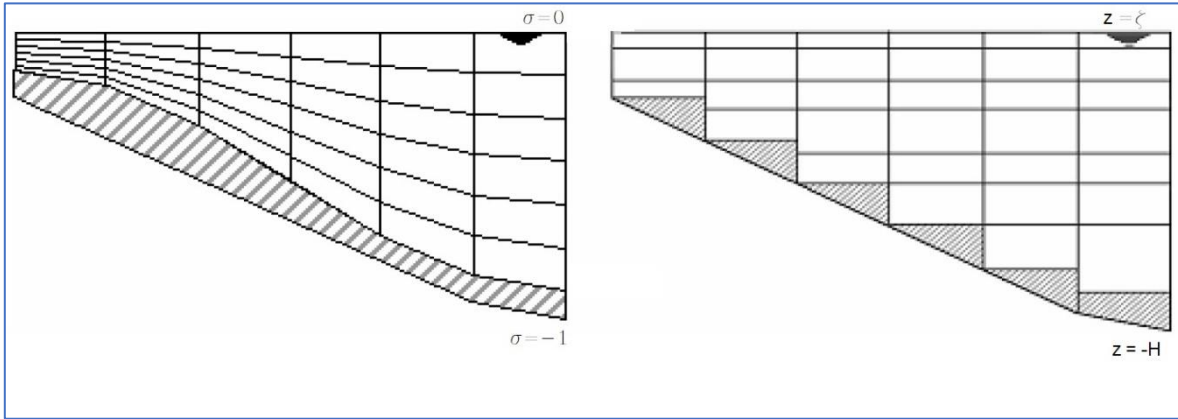


Figura 3.9: Ejemplo de malla tipo σ (izquierda) y malla tipo Z (derecha). Adaptado de [33].

3.7.3 Ecuaciones que describen el flujo de las aguas someras expresadas en coordenadas curvilíneas ortogonales

En el modelo Delft3D-FLOW, las ecuaciones para las aguas someras en 2D (promediadas en la vertical) o 3D son resueltas. Como ya se había mencionado, estas ecuaciones derivan de las RANS y son aplicables para el flujo incompresible en superficie libre bajo los supuestos de las aguas someras y de Boussinesq. Adicional, para la temperatura, se incluye la ecuación de transporte de temperatura.

3.7.3.1 Ecuación de Continuidad

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q(d + \zeta), \quad (3.39)$$

donde:

- ζ es el nivel de agua por encima de un plano horizontal de referencia, (m)
- U es la variación de la velocidad promediada en la vertical en dirección ξ , (m/s)
- V es la variación de la velocidad promediada en la vertical en dirección η , (m/s)
- Q es un término global ya sea fuente o sumidero por unidad de área, (m/s)

- $G_{\xi\xi}$ es el coeficiente usado para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares en dirección x, (m)
 $G_{\eta\eta}$ es el coeficiente usado para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares en dirección y, (m)

3.7.3.2 Ecuaciones de cantidad de movimiento en la dirección horizontal

Estas ecuaciones en la dirección ξ y η están dadas por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{(d+\zeta)} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uw}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi, \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{(d+\zeta)} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \frac{uw}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + fu = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta. \quad (3.41)$$

donde:

- u es la velocidad del flujo en la dirección x ó ξ , (m/s)
 v es la velocidad del flujo en la dirección y ó η , (m/s)
 ω es la velocidad del fluido en la dirección z, (m/s)
 P_ξ es el gradiente hidrostático de presión en la dirección ξ , (kg/(m²s²))
 P_η es el gradiente hidrostático de presión en la dirección η , (kg/(m²s²))
 F_ξ es el flujo de cantidad de movimiento turbulento en la dirección ξ , (m/s²)
 F_η es el flujo de cantidad de movimiento turbulento en la dirección η , (m/s²)
 M_ξ es una fuente o sumidero de cantidad de movimiento en la dirección ξ , (m/s²)
 M_η es una fuente o sumidero de cantidad de movimiento en la dirección η , (m/s²)

Además, en estas ecuaciones se incluyen los llamados esfuerzos de Reynolds, utilizando el concepto de viscosidad turbulenta (Eddy viscosity) y se expresan como el producto entre el flujo, una viscosidad turbulenta dependiente del tamaño de malla y los componentes correspondientes de la tasa media del tensor deformación. El significado y el orden de magnitud de la viscosidad turbulenta difiere entre distintas escalas horizontales y verticales de turbulencia además de mallas finas o gruesas. Para flujo somero tridimensional, la viscosidad horizontal turbulenta ν_H (m²/s) es mayor que la viscosidad vertical turbulenta ν_V (m²/s).

La viscosidad ν_H se asocia a los movimientos turbulentos horizontales y además por las fuerzas que no son resueltas por la malla horizontal o por las ecuaciones de aguas someras bajo el promedio de Reynolds. En el caso del primero, una metodología llamada Horizontal Large Eddy Simulation (HLES) se utiliza para computar la viscosidad turbulenta horizontal en la escala de sub-malla ν_{SGS} (m²/s) y para el segundo se utiliza una viscosidad horizontal de fondo ν_H^{back} (m²/s) cuya magnitud depende del criterio del usuario. Consecuentemente, en Delft3D-FLOW ν_H se define como:

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_V + \nu_H^{back} \quad (3.42)$$

La componente ν_V es obtenida por medio de un modelo de turbulencia. Para considerar todas aquellas formas de mezclado no resueltas, una viscosidad turbulenta vertical de fondo ν_V^{back} (m²/s), definida por el usuario, es utilizada.

Por tanto, ν_V se define como:

$$\nu_V = \nu_{mol} + \max(\nu_{3D}, \nu_V^{back}) \quad (3.43)$$

con ν_{mol} (m²/s) la viscosidad cinemática molecular del agua. La componente ν_{3D} (m²/s) se obtiene por medio de un modelo de turbulencia.

3.7.3.3 Ecuación de cantidad de movimiento en la dirección vertical

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial[(d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{\partial[(d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = (d + \zeta)(q_{in} - q_{out}). \quad (3.44)$$

con q_{in} and q_{out} como términos fuentes o sumidero de agua locales por unidad de volumen (1/s), respectivamente.

3.7.3.4 Ecuación para la temperatura

En Delft3D-FLOW, el transporte de materia y calor se modela por una ecuación de advección-difusión tridimensional. Para el caso de la temperatura T , se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(d + \zeta)T}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d + \zeta)uT]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d + \zeta)vT]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega T}{\partial \sigma} \\ & = \frac{(d + \zeta)}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{1}{(d + \zeta)} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$-\lambda_d(d + \zeta)T + S$$

donde

D_H es el coeficiente de difusión horizontal, (m²/s)

D_V es el coeficiente de difusión vertical, (m²/s)

λ_d representa el proceso de decaimiento de primer orden, (1/s)

S representa a los términos fuentes o sumideros por unidad de área, (J/(m²/s))

En el caso particular de una CGE, el termino S es la descarga a la salida y es igual al flujo de entrada en la obra de toma, se define como:

$$S = (d + \zeta)(q_{in}T_{in} - q_{out}T_{out}) + Q_{tot} \quad (3.46)$$

donde:

T_{in} es la temperatura del agua definida como una serie de tiempo en la obra de toma, (°C)

T_{out} es la temperatura del agua definida como una serie de tiempo en el canal de descarga, (°C)

q_{in} es el gasto de entrada de agua en la obra de toma, (1/s)

q_{out} es el gasto de salida de agua en el canal de descarga, (1/s)

Q_{tot} es el flujo de calor total a través de la interfaz aire-agua, (J/(m²/s))

El coeficiente de difusión horizontal D_H (m²/s) es definido como:

$$D_H = D_{SGS} + D_V + D_H^{back} \quad (3.47)$$

donde:

D_{SGS} es la difusión debida al modelo de turbulencia en la escala de submalla, (m²/s)

D_H^{back} es el coeficiente turbulento de viscosidad horizontal definido por el usuario, (m²/s)

El coeficiente de difusión vertical D_V es definido por:

$$D_V = \frac{\nu_{mol}}{\sigma_{mol}} + \max(D_{3D}, D_V^{back}) \quad (3.48)$$

donde:

D_{3D} es el coeficiente de difusión vertical obtenido por un modelo de turbulencia, (m²/s)

D_V^{back} es un coeficiente de mezclado vertical de fondo definido por el usuario, (m²/s)

σ_{mol} es el numero molecular de Prandtl para la difusión de calor

Es importante recalcar que las variables ν_H^{back} , ν_V^{back} , D_H^{back} y D_V^{back} son utilizadas para calibrar el modelo Delft3D-FLOW.

3.7.4 Modelación de la turbulencia en Delft3D-FLOW

El modelo Delft3D-FLOW dispone de 4 modelos de turbulencia tipo RANS para determinar ν_V y D_V

- Coeficientes constantes
- Algebraic Eddy viscosity closure Model (AEM)
- Modelo de turbulencia $k - L$
- Modelo de turbulencia $k - \varepsilon$

En esta disertación, solo los últimos tres son utilizados. Estos tres modelos se fundamentan en el llamado concepto "Eddy Viscosity" de Prandtl-Kolmogorov, el cual tiene la siguiente forma:

$$\nu_{3D} = c'_\mu L \sqrt{k} \quad (3.49)$$

donde:

- c'_μ es una constante empírica derivada del modelo $k - \varepsilon$; $c'_\mu = c_\mu^{1/4}$, $c_\mu = 0.09$
 L es la longitud de mezclado, (m)
 k es la energía cinética turbulenta, (m^2/s^2)

Para calcular la longitud de mezclado, la siguiente función dependiente de la profundidad es utilizada:

$$L = \kappa(z + d) \sqrt{1 - \frac{z + d}{H}} F_L(R_i) \quad (3.50)$$

donde:

- κ es la constante de Von Kármán, $\kappa \approx 0.41$
 $F_L(R_i)$ es una función de amortiguación que determina estabilidad de estratificación y depende del número de Richardson R_i

El número de Richardson está definido como:

$$R_i = \frac{-g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]} \quad (3.51)$$

donde:

- ρ es la densidad, (kg/m^3)

3.7.4.1 Modelo de turbulencia Algebraic Eddy viscosity (AEM)

El modelo algebraico de viscosidad turbulenta (AEM) en Delft3D-FLOW resulta ser una combinación de dos modelos de turbulencia de orden cero y no involucra ecuaciones de transporte para determinar las cantidades turbulentas. Estos modelos se denominan como ALG (Algebraic closure model) y el PML (Prandtl's Mixing Length model).

Algebraic closure model (ALG)

En el modelo ALG, un perfil logarítmico vertical es asumido. Esto establece una relación lineal entre la energía cinética turbulenta en el fondo y la energía cinética turbulenta en la superficie libre:

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} \left[(u_*^b)^2 \left(1 - \frac{z+d}{H} \right) + u_{*s}^2 \frac{z+d}{H} \right] \quad (3.52)$$

donde:

u_{*s} es la velocidad fricción en la superficie libre, (m/s)

u_*^b es una forma modificada de la velocidad fricción en el fondo, (m/s)

Una vez que k and L son calculadas, la viscosidad turbulenta por este modelo se obtiene con la ecuación (3.49).

Prandtl's Mixing Length model (PML)

En este modelo la viscosidad turbulenta, ν_{PML} , se obtiene al asumir un equilibrio local instantáneo entre la producción y la disipación del modelo $k - L$. La energía cinética turbulenta se calcula con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} L^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (3.53)$$

Después de obtener la longitud de mezclado L con la ecuación (3.50) y k por este modelo, la ν_{PML} se computa con la ecuación (3.49).

Finalmente, al ser Delft3D-FLOW un modelo robusto, los modelos de turbulencia ALG y PML son combinados en un único modelo de turbulencia algebraico (AEM). De esta manera, la viscosidad turbulenta se calcula con la siguiente expresión:

$$\nu_{3D} = \max(\nu_{ALG}, \nu_{PML}) \quad (3.54)$$

3.7.4.2 Modelo de turbulencia $k - L$

En este modelo de turbulencia, la energía cinética turbulenta k se obtiene con la siguiente ecuación de transporte:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial k}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial k}{\partial \sigma} = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_k \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + P_k + P_{kw} + B_k - \varepsilon \quad (3.55)$$

donde:

- P_k es un término de producción de la energía cinética turbulenta, (m^2/s^3)
- P_{kw} es la producción de energía turbulenta debida a la acción de onda, (m^2/s^3)
- B_k es el flujo de flotabilidad, (m^2/s^3)

La longitud de mezclado se calcula con la misma ecuación utilizada en el modelo AEM. En el modelo $k - L$, se asume que la tasa de disipación ε depende de la longitud de mezclado L y de la energía cinética turbulenta k de acuerdo con:

$$\varepsilon = c_\mu^{3/4} \frac{k\sqrt{k}}{L} \quad (3.56)$$

3.7.4.3 Modelo de turbulencia $k - \varepsilon$

Este modelo de turbulencia utiliza la misma ecuación de transporte del modelo $k - L$ para obtener la energía cinética turbulenta k (ecuación 3.55). Sin embargo, a diferencia de dicho modelo, la tasa de energía de disipación ε se obtiene al resolver la siguiente ecuación de transporte:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) + P_\varepsilon + P_{\varepsilon w} + B_\varepsilon - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.57)$$

donde:

- P_ε un término de producción, (m^2/s^4)
- $P_{\varepsilon w}$ un término de energía de disipación debido a ondas, (m^2/s^4)
- B_ε un término de flujo de flotabilidad, (m^2/s^4)

Finalmente, el modelo $k - \varepsilon$ calcula la viscosidad turbulenta con la siguiente expresión:

$$\nu_{3D} = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.58)$$

Un comentario final es que la versión del modelo $k - \varepsilon$ implementada en Delft3D-FLOW es la estándar. Para más detalles, referirse al manual del usuario del Delft3D-FLOW [33] y también en [75].

3.7.5. Modelo Horizontal Large Eddy Simulation (HLES)

Delft3D-FLOW adicionalmente tiene un modelo de sub-malla conocido como Horizontal Large Eddy Simulation (HLES) para turbulencia en 2D. El modelo se basa en las consideraciones teóricas presentadas por [78]. La viscosidad turbulenta en este modelo está dada por:

$$v_{SGS} = \frac{1}{k_s^2} \left(\sqrt{(\gamma_{HLES} \sigma_T S^*)^2 + B^2} - B \right) \quad (3.59)$$

con:

$$B = \frac{3g|\vec{U}|}{4HC^2} \quad (3.60)$$

donde

H es la profundidad del agua, (m)
 C es el coeficiente de Chezy, (m^{1/2}/s)

El termino $(S^*)^2$ representa la suma de la tasa de deformación al cuadrado

$$(S^*)^2 = 2 \left(\frac{\partial u^*}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v^*}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u^*}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v^*}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial u^*}{\partial y} \frac{\partial v^*}{\partial x} \quad (3.61)$$

En la ec (3.77) el superíndice (*) denota las variables fluctuantes del flujo y están definidas por el siguiente operador recursivo:

$$\psi^* = \psi_{n+1} - \bar{\psi}_{n+1}^t \quad (3.62)$$

con

$$\bar{\psi}_{n+1}^t = (1 - a)\psi_{n+1} + a\bar{\psi}_n^t \text{ y } a = e^{\left(\frac{-\Delta t}{\tau}\right)} \quad (3.63)$$

donde:

ψ representa cualquier componente de velocidad (u, v) , (m/s)
 τ es el tiempo de relajación, (s)

La variable k_s es la magnitud del numero de onda y se designa para representar los efectos netos de la turbulencia a nivel sub-malla y su relación con un tamaño de malla horizontal que sea isotrópica. Para mallas anisotrópicas se recomienda considerar el área de celda:

$$\frac{1}{k_s^2} = \frac{\Delta x \Delta y}{(\pi f_{lp})^2}; f_{lp} \leq 1 \quad (3.64)$$

donde:

f_{lp} es el coeficiente de filtro espacial de bajo paso que depende de las propiedades de filtrado espacial en el esquema advectivo.

Finalmente, γ_{HLES} esta dado por:

$$\gamma_{HLES} = I_{\infty} \sqrt{\frac{1-\alpha^{-2}}{2n_D}}, \quad I_{\infty} = 0.844 \quad (3.65)$$

donde:

α es la pendiente en el espectro log-log de la energía de densidad, típicamente se usan valores de $\alpha=3$ o $\alpha=5/3$

n_D es un numero dimensional.

Por último, la difusividad turbulenta de sub-malla D_{SGS} para mezclado horizontal de calor esta definida como:

$$D_{SGS} = \frac{\nu_{SGS}}{\sigma_T} \quad (3.66)$$

donde:

σ_T el número de Prandtl-Schmidt.

3.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En el presente capítulo se mostraron los fundamentos de la CFD y las consideraciones necesarias para obtener las ecuaciones de Navier-Stokes. Además, se mostraron los supuestos e hipótesis necesarios para derivar de estas últimas ecuaciones las conocidas SWE, ecuaciones base de diversos modelos hidrodinámicos y que, aplicadas en la forma de simulaciones numéricas, se puede analizar por ejemplo el estado ambiental y termodinámico de plumas térmicas.

Respecto a la modelación de la turbulencia y en particular por medio de la técnica RANS, resalta la relación directa de las SWE con la viscosidad turbulenta, existiendo para estimar dicha viscosidad múltiples modelos de turbulencia.

Derivado de revisar las características técnicas de diversos modelos hidrodinámicos y de dispersión térmica, se pudo observar que cada modelo hidrodinámico dispone de uno o más modelos de turbulencia que el usuario puede seleccionar para ejecutar simulaciones numéricas; de esta manera es posible representar apropiadamente y de forma más

3. LA CFD EN LOS PROBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MEZCLADO

realista la complejidad de la física de las aguas costeras. Entonces, conociendo las bases teóricas detrás de un modelo hidrodinámico y también sabiendo sus alcances y limitaciones, se eligió el modelo Delft3D-FLOW para caracterizar plumas térmicas emitidas por la descarga de una CGE.

Más aún, conociendo que cada modelo de turbulencia tiene su manera particular de determinar la viscosidad turbulenta y que ella tiene influencia en las variables de mayor escala (velocidad, nivel de agua, etc.) y aunado a que estos modelos no han sido del todo explorados en la simulación de plumas térmicas (como quedo evidenciado en el Capítulo 2), resalta una oportunidad de investigación en la que se pueden probar diversos modelos de turbulencia a fin de poder conocer su pertinencia en la caracterización de las plumas térmicas.

En el siguiente Capitulo, se mostrará el caso de estudio elegido para caracterizar una pluma térmica en una zona costera: la descarga de la CNLV. Se describirá su entorno físico y las variables involucradas en este fenómeno complejo como las hidrológicas, atmosféricas, oceanográficas, ambientales y de operación. Todo esto es necesario pues es información que alimentará al modelo Delft3D-FLOW y con ello se espera representar adecuadamente la descarga emitida por la CNLV y de la pluma térmica generada.

Capítulo 4

4. DESCARGA TÉRMICA DE LA CNLV

4.1 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO FÍSICO DE LA CNLV

En este capítulo se describen las características relacionadas a la CNLV, la única CGE del tipo nuclear con la que cuenta México cuya su propiedad pertenece al Gobierno Federal de México y es administrada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Está ubicada a 6 km de la localidad de Palma Sola, sobre la costa del Golfo de México en el km 42.5 de la carretera federal #180 tramo José Cardel-Nautla, en el municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios del estado de Veracruz. La CNLV se localiza alrededor de las coordenadas geográficas 19°43'30" Norte y 96°43'09" Oeste sobre la costa del Golfo de México (Figura 4.1).

El clima del área es mayoritariamente cálido subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 24 – 26 °C y presenta una precipitación promedio anual de 1,200 a 1,500 mm. Topográficamente el sitio es plano, delimitado por el Golfo de México al Este y por montañas de somera elevación al Oeste.

Respecto a generación de energía, la CNLV cuenta con dos unidades generadoras, cada una con capacidad eléctrica de 810 MW/h, aportando el 5% de la energía eléctrica al Sistema Eléctrico Nacional.

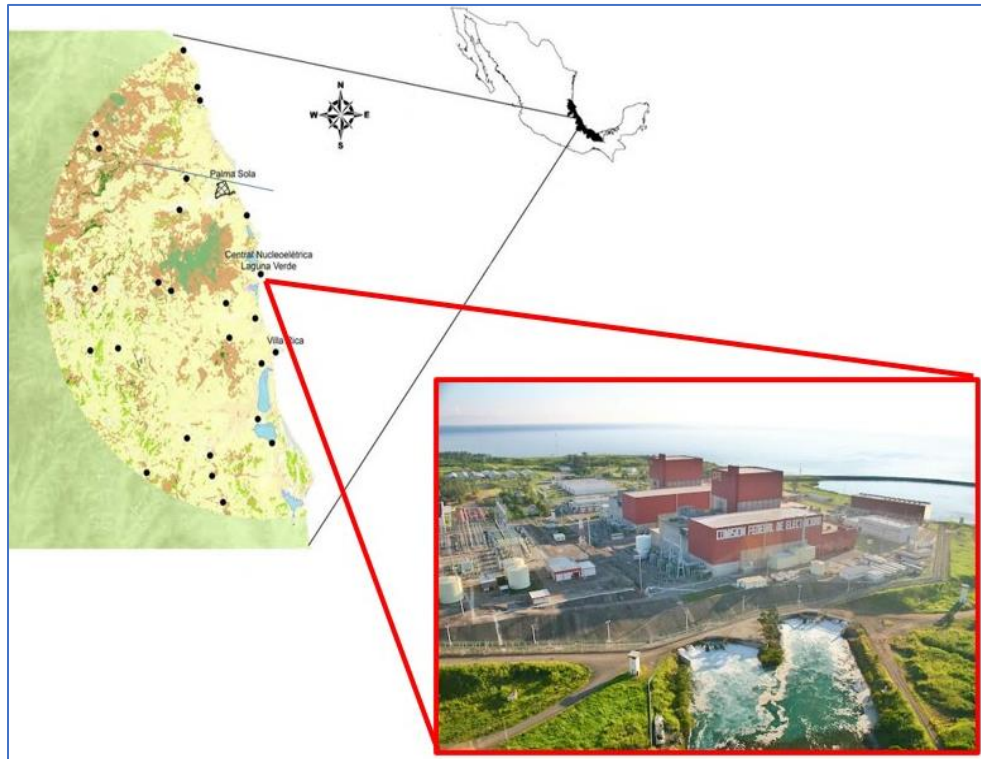


Figura 4.1: Ubicación de la CNLV.

4.1.1 Parámetros de succión y de descarga de la CNLV

La CNLV cuenta con una obra de toma y un canal de descarga. Dichos elementos forman parte de su sistema de enfriamiento. La Tabla 4.1 muestra el gasto de entrada en la obra de toma y el gasto de salida del canal de descarga. Estos datos son parámetros medios anuales para el año 2005 [29].

Tabla 4.1: Gasto y temperatura promedio de la CNLV

Localización	Gasto (m ³ /s)	Temperatura (°C)
Obra de toma (succión)	63	26.5
Canal de descarga	63	41

La obra de toma se localiza alrededor de las coordenadas 19°43'10" Norte y 96°24'01" Oeste. Por otro lado, la salida del canal de descarga está ubicado alrededor de 19°42'07" Norte y 96°24'23" Oeste. Dado que el sistema de enfriamiento de la CNLV es del tipo abierto, su obra de toma superficial cuenta con dos escolleras (Figura 4.2) para controlar el oleaje y el transporte de sedimentos. Es importante notar que el agua regresa a la zona costera con un incremento estimado de temperatura de 14 °C.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO FÍSICO



Figura 4.2: Escolleras de la CNLV.

4.1.2 Batimetría

La batimetría en el área de estudio presenta pendientes suaves, parte desde la profundidad 0 m en la costa hasta los 30 m de profundidad encontrados aproximadamente a los 3,500 m medidos desde la costa en dirección a mar adentro. En la Figura 4.3 se puede apreciar la batimetría de la zona de estudio, la cual incluye las inmediaciones a la CNLV, la descarga de la Laguna Salada (canal de descarga) y el aporte de un Río conocido como “El Viejón”. Se seleccionó hasta la batimétrica -28 para garantizar el pleno desarrollo de la pluma térmica y poder observar su interacción dentro del medio receptor.

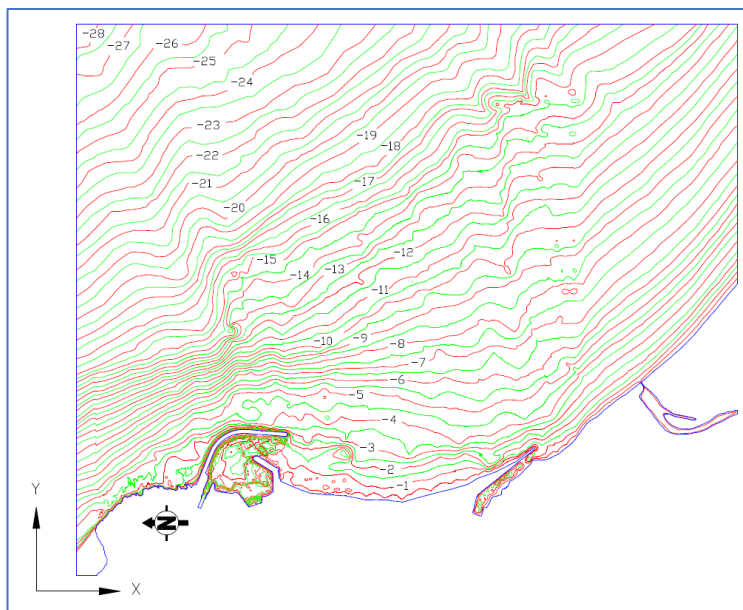


Figura 4.3: Batimetría de la zona de estudio. Tomada de [47].

4.2 CONDICIONES HIDROLÓGICAS, OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS DE LA ZONA

4.2.1 Análisis hidrológico

Cerca de la CNLV existe una cuenca hidrográfica conocida como “El Viejón”. Su cauce principal descarga en la costa alterando las corrientes del campo cercano. Por lo tanto, una estimación básica del proceso precipitación-escorrentía es realizada para considerar esta descarga natural.

4.2.1.1 Características de la cuenca

El área de la cuenca “El Viejón” es de 9.367 km² y tiene un perímetro de 13.416 km. El parteaguas de la cuenca “El Viejón” se aprecia en la Figura 4.4.



Figura 4.4: Cuenca “El Viejón”.
Elaborado con el simulador de cuencas SIATL del INEGI.

Un perfil del cauce principal se obtiene al trazar su longitud en el eje de las abscisas y su gradiente de elevación en el eje de las ordenadas. La Figura 4.5 muestra el perfil topográfico del cauce principal. La longitud de dicho cauce L_T es de 6.017 km.

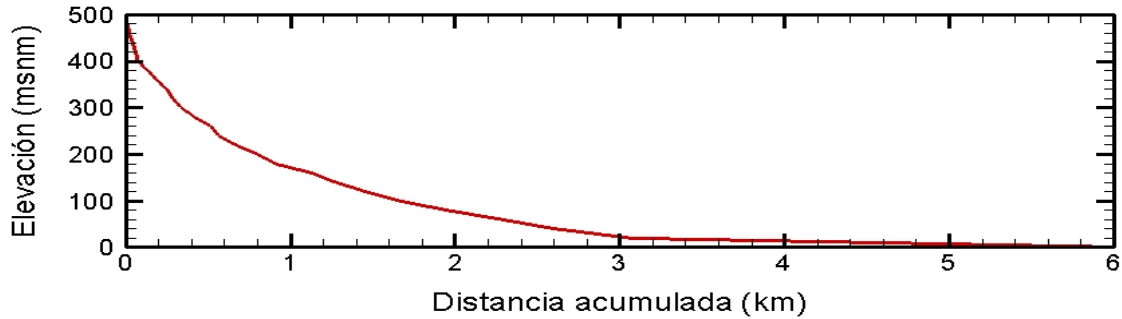


Figura 4.5: Perfil topográfico del cauce principal

4.2.1.2 Pendiente del cauce principal

Uno de los indicadores más importantes de la respuesta de la cuenca a una tormenta es la pendiente del cauce principal. Ella relaciona la escorrentía, la velocidad de propagación de ondas y la capacidad de transporte de sedimentos. Debido a que la pendiente es variable a lo largo del cauce principal, se opta por obtener una pendiente promedio. Dos métodos se presentan a continuación.

Método de igualación de áreas

Este método consiste en trazar una línea recta desde el punto con la menor elevación del cauce principal hacia el punto de mayor elevación [79]. La línea recta debe ser trazada de tal forma que las áreas formadas arriba y abajo del perfil del cauce principal sean iguales (Figura 4.6). La pendiente del cauce principal por este método S_{EA} esta dada por:

$$S_{EA} = \frac{H}{L_T} \quad (4.1)$$

donde

H es la altura máxima de la línea recta definida por el criterio de áreas iguales, (m)

L_T es la longitud del cauce principal, (m)

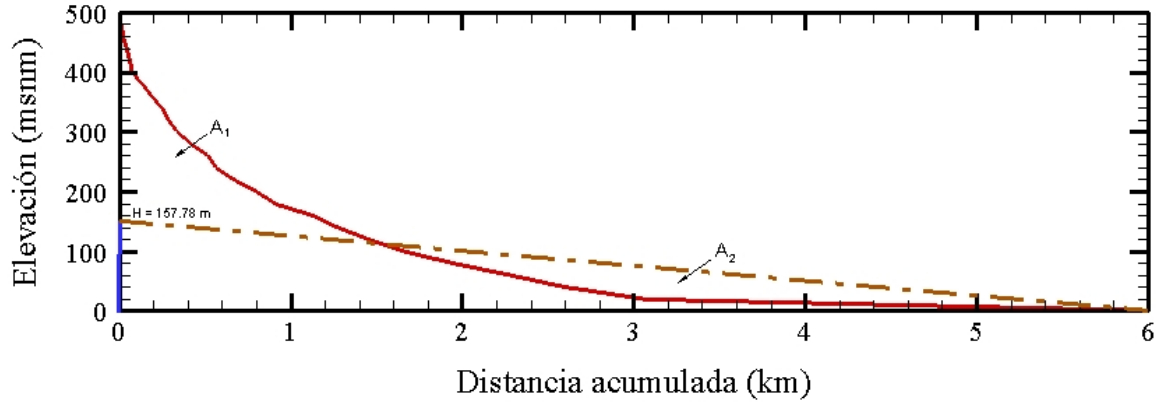


Figura 4.6: Pendiente del cauce principal obtenida por el método de áreas iguales

Método de la fórmula de Taylor-Schwarz

Este método propuesto por Taylor y Schwarz consiste en dividir el perfil del cauce principal en n secciones iguales [79]:

$$l = \frac{L_T}{n} \quad (4.2)$$

En cada sección, la diferencia de altura H_i debe ser determinada. La pendiente de cada sección es entonces calculada con:

$$S_i = \frac{H_i}{l} \quad (4.3)$$

Este método requiere de al menos 6 secciones iguales (Figura 4.7). Finalmente, la pendiente del cauce principal S_{TS} es obtenida con la fórmula de Taylor-Schwarz:

$$S_{TS} = \left[\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \frac{1}{\sqrt{S_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (4.4)$$

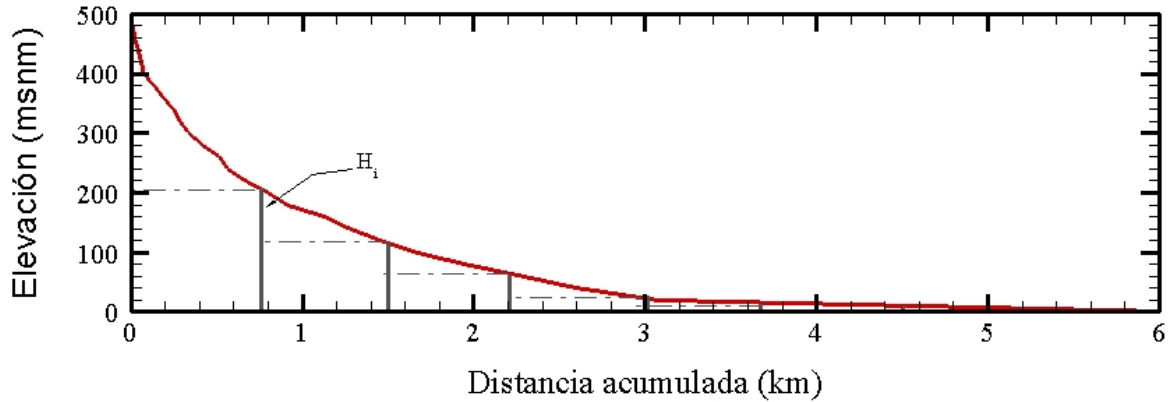


Figura 4.7: Pendiente del cauce principal calculada con la fórmula de Taylor-Schwarz.

Comparativo de pendientes del cauce principal

En la Tabla 4.2 se puede encontrar un comparativo de los resultados obtenidos por los métodos descritos en las dos subsecciones previas.

Tabla 4.2: Pendiente del cauce principal

Método de área iguales	Formula de Taylor-Schwarz
2.6221%	1.8215%

4.2.1.3 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración t_c es el tiempo en el que una onda de agua se propaga desde el punto más distante en la cuenca hasta su descarga.

Dos fórmulas clásicas en hidrología son utilizadas para estimar el tiempo de concentración [79]: la fórmula de Kirpich y la formula del California Highways and Public Works

La fórmula de Kirpich está definida como:

$$t_c = 0.0663 \left[\frac{L_T}{\sqrt{H/L_T}} \right]^{0.77} \tag{4.5}$$

La fórmula del California Highways and Public Works es:

$$t_c = \left[\frac{0.8708 L_T^3}{H} \right]^{0.385} \tag{4.6}$$

Los tiempos de concentración por ambas formulas se reportan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Comparativo del tiempo de concentración

Fórmula	t_c (hrs)
Kirpich	1.0726
California Highways and Public Works	1.0735

4.2.1.4 Análisis climatológico

Se requieren de datos hidrológicos para examinar la relación entre la precipitación y la escorrentía. Debido que el área de estudio no tiene una estación hidrométrica, se obtuvieron datos de precipitación de la estación climatológica más cercana propiedad de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México y se utilizaron para estimar el gasto de descarga de la cuenca. Los datos de precipitación fueron extraídos de la estación número 30353 LA MANCHA, la cual contiene información desde 1981 hasta 2017.

Distribuciones de probabilidad utilizadas en hidrología

Los datos históricos de precipitación pueden predecir eventos futuros de lluvia. Esto se logra por medio de un análisis probabilístico. Por lo tanto, se emplean distribuciones de probabilidad para establecer modelos que resulten en la predicción de eventos de lluvias máximas [79]. Las distribuciones de probabilidad utilizadas para ajustar la información se describen brevemente en las siguientes subsecciones.

a) Distribución Gumbel

Esta distribución converge a una función exponencial a medida que los valores de X incrementan. La distribución Gumbel toma la forma:

$$X = \bar{x} + \left(\frac{y - \bar{y}_n}{\sigma_n} \right) S \quad (4.7)$$

con

$$y = -\ln\{-\ln[P(X \leq x)]\} \quad (4.8)$$

donde

X es el valor buscado para una probabilidad deseada o periodo de retorno
 \bar{x} es el promedio de la muestra
 S es la desviación estándar de la muestra
 \bar{y}_n, σ_n son constantes teóricas
 y es la función de probabilidad

4.2 CONDICIONES HIDROLÓGICAS, OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS

b) Distribución Log-Pearson Tipo III

Esta distribución es asimétrica y, en la mayoría de los casos, con forma de campana (normal). Únicamente se necesitan tres parámetros estadísticos en esta distribución. Se computa con la siguiente ecuación:

$$\log X = \overline{\log x} + K(I_v) \quad (4.9)$$

con

\bar{x}	promedio de la muestra
$\overline{\log x}$	promedio logarítmico de la muestra
I_v	índice de variabilidad
K	factor de frecuencia

Los factores de frecuencia K son función de la oblicuidad y del periodo de retorno.

c) Distribución Gamma Incompleta

A esta distribución también se le llama como distribución gamma de dos parámetros. El parámetro de forma α y el parámetro de escala β se evalúan con:

$$\alpha = \frac{(\bar{x})^2}{S^2} \quad (4.10)$$

$$\beta = \frac{S^2}{\bar{x}} \quad (4.11)$$

$$X = u S \quad (4.12)$$

donde

\bar{x}	es el promedio de la muestra
S^2	es la varianza de la muestra
X	es el valor buscado para una probabilidad deseada o periodo de retorno
u	es la función de probabilidad

Los valores de u son función del factor de forma α y del periodo de retorno.

d) Distribución de valores extremos

Las distribuciones de valores extremos ejemplifican los intentos de deducir, en una base teórica, la distribución de máximos anuales de precipitaciones y escorrentías. Esta distribución puede ser determinada como sigue:

$$X = u + \frac{\alpha}{k} [1 - e^{-ky}] \quad (4.13)$$

con

$$y = -\ln[-\ln F(x)] = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T_r}\right)\right] \quad (4.14)$$

donde

- k es el parámetro de forma
- α es el parámetro de escala
- X es el valor buscado para una probabilidad deseada o periodo de retorno
- y es la función de probabilidad
- T_r es el periodo de retorno
- u es el parámetro de ubicación

e) Comparativo de las distribuciones de probabilidad

El mejor ajuste viene dado por la distribución de Gumbel. Esto se aprecia fácilmente al visualizar la Figura 4.8.

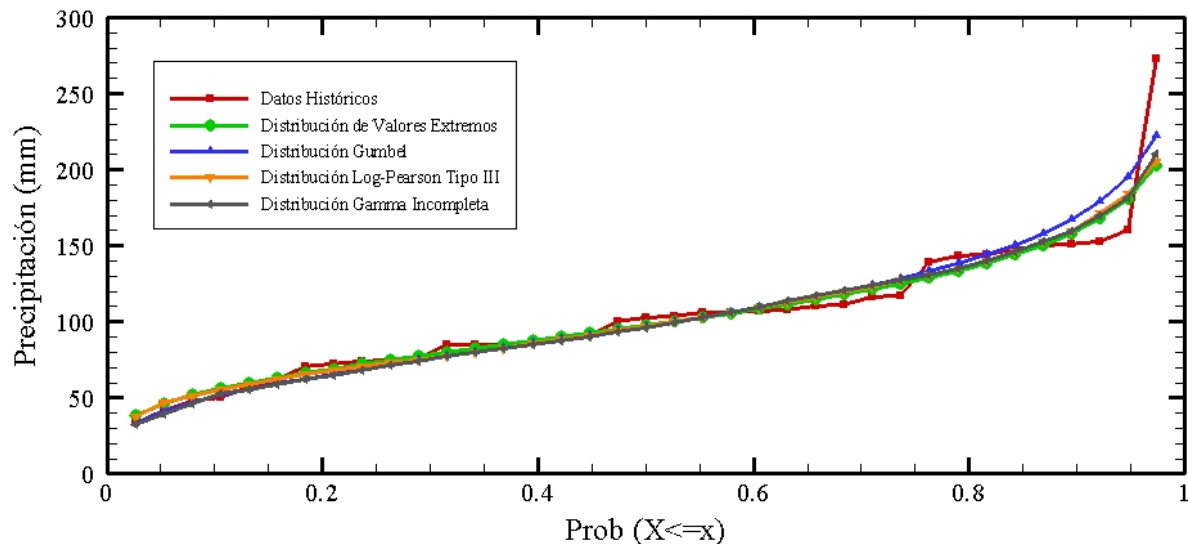


Figura 4.8: Comparativo gráfico de las cuatro distribuciones de probabilidad.

Curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno

Las curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno (I-D-Tr) representan la intensidad de las precipitaciones utilizadas para estimar el gasto pico necesario para diseñar estructuras hidráulicas, para evaluar peligros por inundación y para evaluar la descarga de una cuenca.

En la República Mexicana, se recomienda emplear el método de Chen-Lung Chen para trazar las curvas I-D-Tr [80]. Dada la carencia de datos pluviométricos en la zona de estudio, este método se puede utilizar como una opción apropiada para evaluar la

4.2 CONDICIONES HIDROLÓGICAS, OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS

variación geográfica de la lluvia [81]. Las tres profundidades requeridas son aquellas para una lluvia P_1^{10} (10-yr 1-hr), P_{24}^{10} (10-yr 24-hr) y P_1^{100} (100-yr 1-hr) del mapa de isoyetas del estado de Veracruz.

Los mapas de isoyetas para la república mexicana se pueden descargar de [82].

El método de Chen-Lung Chen utiliza la siguiente formula [81]:

$$i_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} T_r^{F-1})}{(t + b)^c} \quad (4.15)$$

con

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4 \quad (4.16)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4 \quad (4.17)$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4 \quad (4.18)$$

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}} \quad (4.19)$$

$$F = \frac{P_1^{100}}{P_{24}^{10}} \quad (4.20)$$

donde

i_t^{Tr} es la intensidad de la lluvia como función de su duración y del periodo de retorno
 R es la relación profundidad-duración
 F es la relación profundidad-frecuencia

Las ecuaciones (4.16), (4.17) y (4.18) son válidas en el rango $0.10 \leq R \leq 0.60$. Las curvas I-D-Tr relacionadas al área de estudio, obtenidas con el presente método, son presentadas en la Figura 4.9.

Método Racional

Para cuencas pequeñas ($A \leq 25 \text{ km}^2$), el método racional permite la predicción del gasto pico Q_p (m^3/s) por medio de la formula [83]:

$$Q_p = 0.278cIA \quad (4.21)$$

donde

c es el coeficiente de escorrentía, variable con el tipo de suelo
 I Es la intensidad de lluvia (mm/hr) para un periodo de retorno con una duración igual al tiempo de concentración t_c
 A es el área de la cuenca (km^2)

Finalmente, el gasto pico del río “El Viejón”, obtenido para diversos periodos de retorno, se presenta en la Figura 4.10.

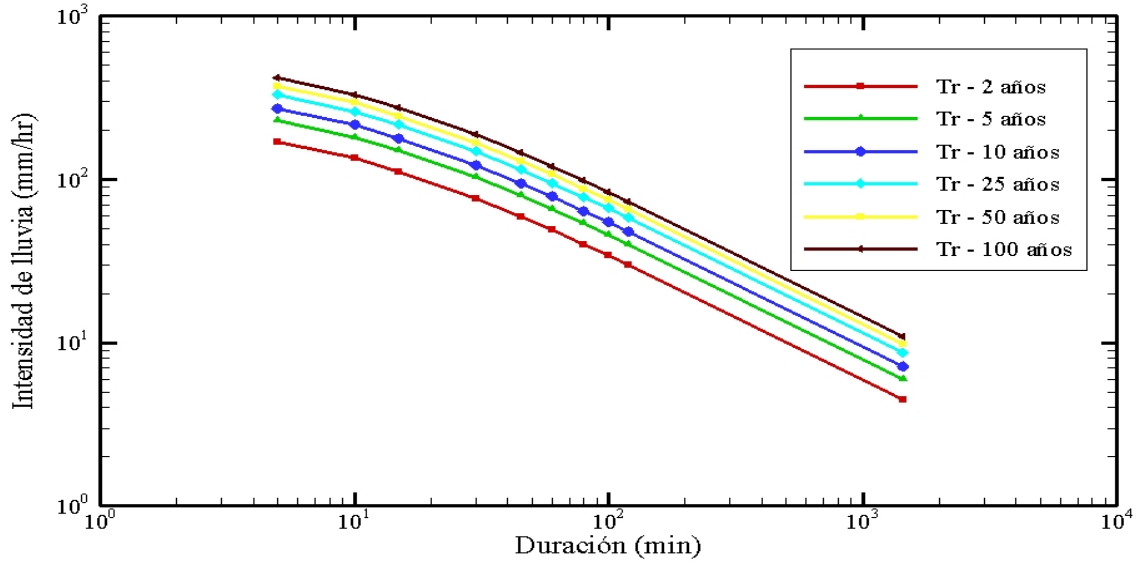


Figura 4.9: Curvas I-D-Tr para la zona de estudio

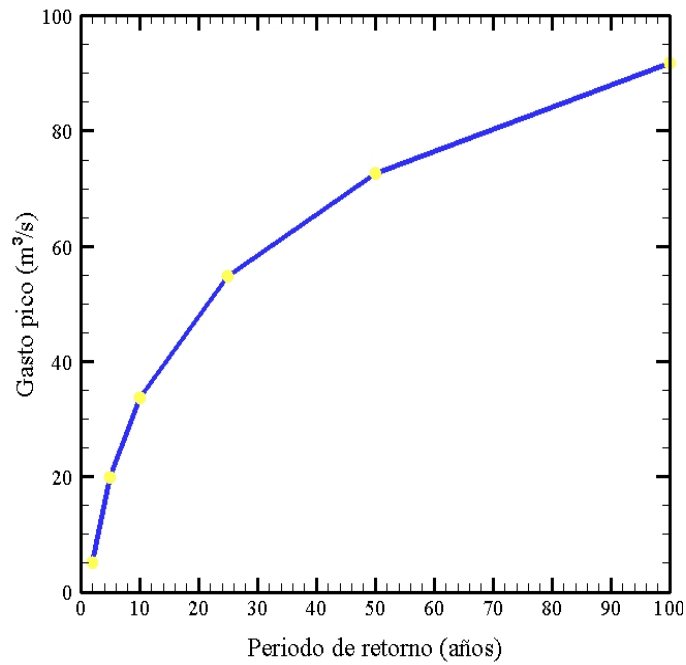


Figura 4.10: Gasto pico por el método racional

4.2.2 Datos oceanográficos

4.2.2.1 Mareas

Una estimación del tren de mareas para la CNLV se realizó al recopilar datos mareográficos de las dos estaciones disponibles en el predictor de marea MAR V1.0 del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) más cercanas a la CNLV: Veracruz y Tuxpan. Lo anterior debido a que en la zona de estudio se carece de estación propia. Con la información obtenida, se procedió a llevar a cabo una interpolación pesada entre ambas estaciones para obtener el tren de mareas de la CNLV (Figura 4.11). A partir de estos registros, puede verificarse que la marea es mixta: diurna y semidiurna.

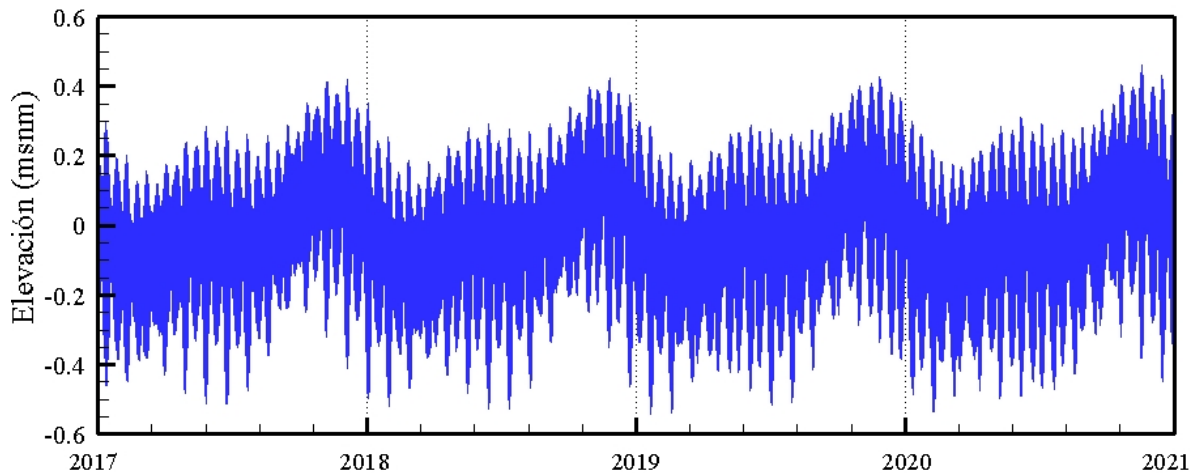


Figura 4.11: Pronóstico de mareas anuales en la CNLV.

4.2.2.2 Corrientes superficiales

Debido a que el estado de Veracruz presenta características casi iguales en toda la extensión de su costa, los patrones de temperatura, salinidad y velocidad de corrientes en general son similares en la franja litoral del estado. La Figura 4.12 muestra corrientes típicas cercanas a la zona costera. Dependiendo de la estación del año, tres tipos de corrientes son distinguibles en la costa veracruzana. En el invierno, se observa la presencia del frente meteorológico denominado Norte, por lo que los vientos provenientes del Norte del Golfo de México ocasionan que la dirección de las corrientes sea de Norte a Sur. Por el contrario, durante el verano la dirección de los vientos y, en consecuencia, las corrientes son invertidas en dirección por la presencia del denominado frente meteorológico de Suradas. El último tipo de corrientes corresponde a la transición

estacional, ya sea Norte-Surada o Surada-Norte en donde los vientos están alineados de forma casi perpendicular a la costa (Oriente-Poniente) generando surgencias o hundimientos, producto del efecto de Coriolis [84].

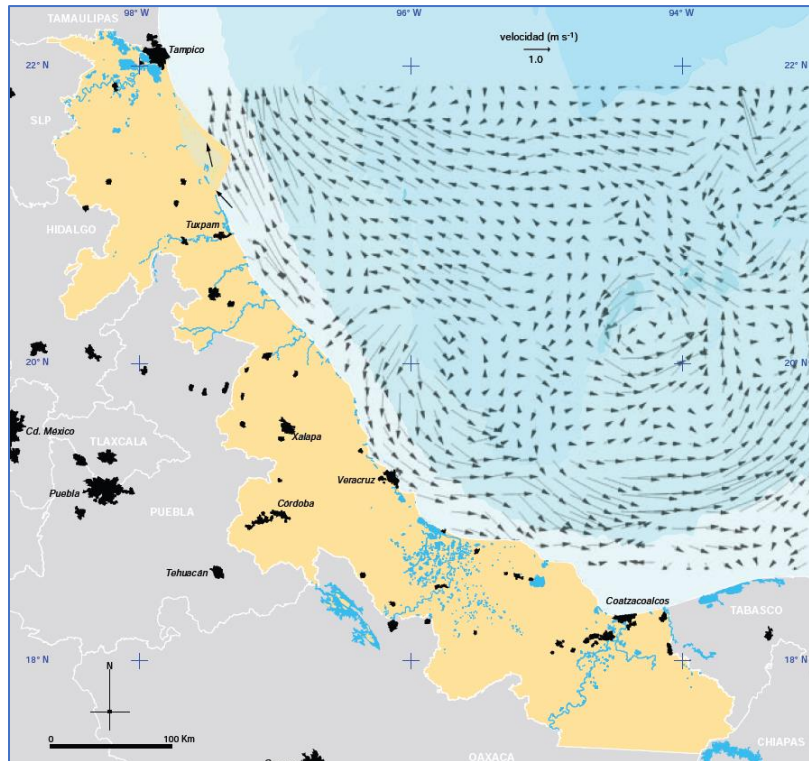


Figura 4.12: Corrientes superficiales cercanas a la costa Veracruzana. Tomada de [84].

4.2.3 Datos meteorológicos

4.2.3.1 Humedad relativa

De los registros históricos consultados, el más cercano a la CNLV disponible corresponde al del aeropuerto de Veracruz. Los datos se descargaron de [85]. La Figura 4.13 presenta la variación de la humedad relativa para el año 2017. Se observan valores mínimos para los meses de mayo y diciembre mientras que los máximos corresponden al mes de julio.

4.2.3.2 Radiación solar

Al carecer de mediciones de radiación solar para la zona de estudio, fue necesario consultar diversas fuentes que las contengan. Una es la que presenta mapas de irradiación solar de la república mexicana, generados por el Instituto de Geofísica de la Universidad Autónoma Nacional de México (UNAM) y se pueden consultar en [86].

4.2 CONDICIONES HIDROLÓGICAS, OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS

Otra alternativa son los generados por una institución gubernamental conocida como la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). Los mapas de la CONABIO, para cada estación del año, muestran la radiación solar media en el país y se presentan en la Figura 4.14. Para el caso de la CNLV, la Figura 4.14(a) registra valores de 19 a 20 (M J/m²) en primavera, en la Figura 4.14(b) se aprecia el valor de 19 (M J/m²) para el verano; en el caso de otoño, presentado por la Figura 4.14(c), se observa un valor de 17 (M J/m²) y, por último, para el invierno la Figura 4.14(d) muestra valores que van de 12 a los 13 (M J/m²).

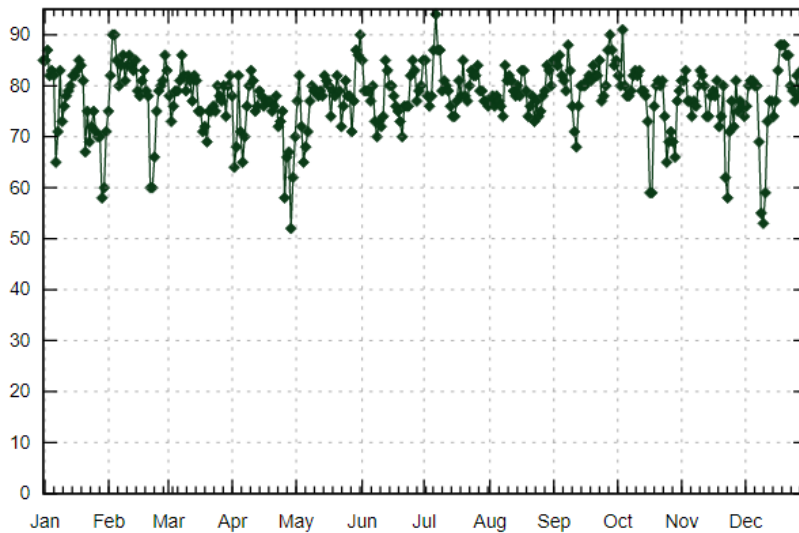


Figura 4.13: Humedad relativa en el puerto de Veracruz. Tomada de [85].

4.2.3.3 Vientos

Es importante conocer los vientos dominantes y su rapidez, pues ello permitirá comprender la dirección de las corrientes además de predecir la altura del oleaje. Para el caso del comportamiento general del viento en la CNLV, se cuenta con los datos del periodo 1980-2009. Esta información es presentada en la Figura 4.15 en forma de rosa de vientos. Respecto a la frecuencia del viento, es notoria que su predominancia sea del Norte-Noroeste con 40,000 eventos en dicha dirección y se aprecia en la Figura 4.15(a). En la Figura 4.15(b) puede apreciarse la dominancia de la velocidad del viento en el rango de 6.1 a 8.0 m/s. Mencionado previamente, también existen las Suradas (vientos provenientes del Sur), presentándose ellas en menor frecuencia y con velocidades inferiores a los 4.0 m/s.

4. DESCARGA TÉRMICA DE LA CNLV

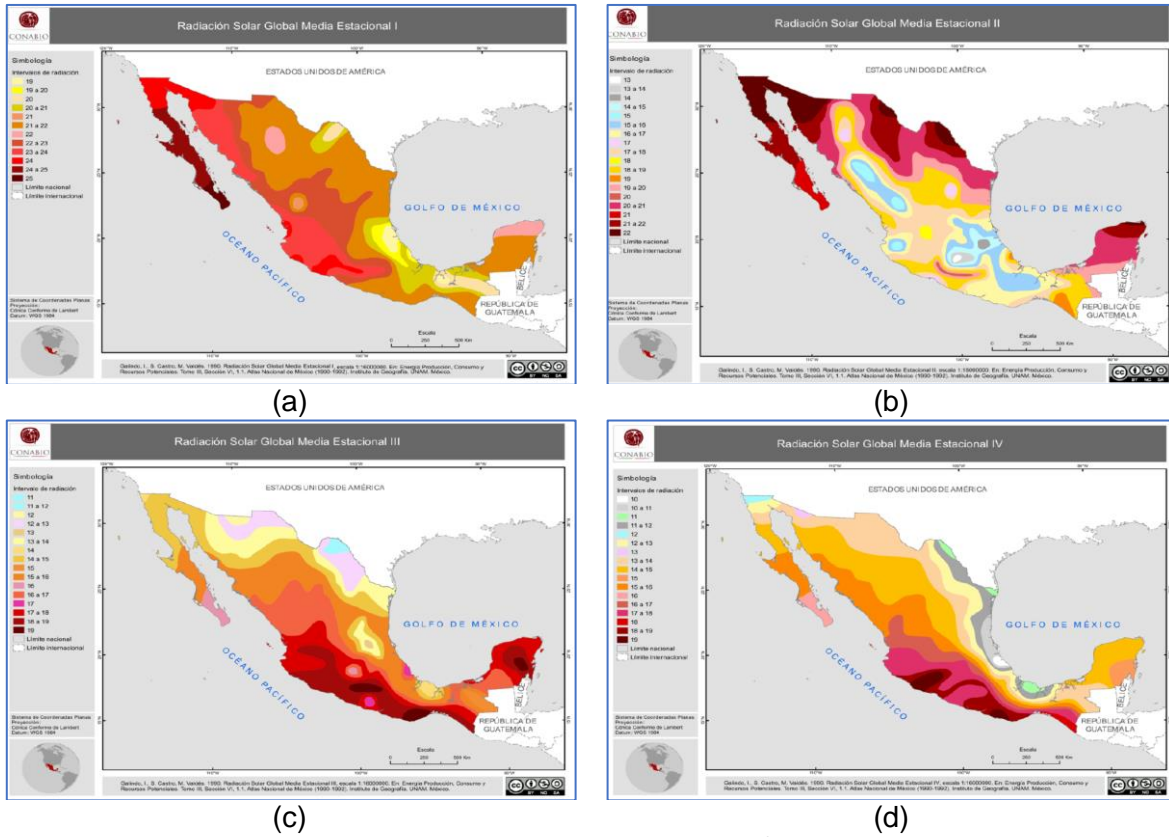


Figura 4.14: Radiación solar media de México, en (MJ/m²): (a) primavera, (b) verano (c) otoño y (d) invierno.

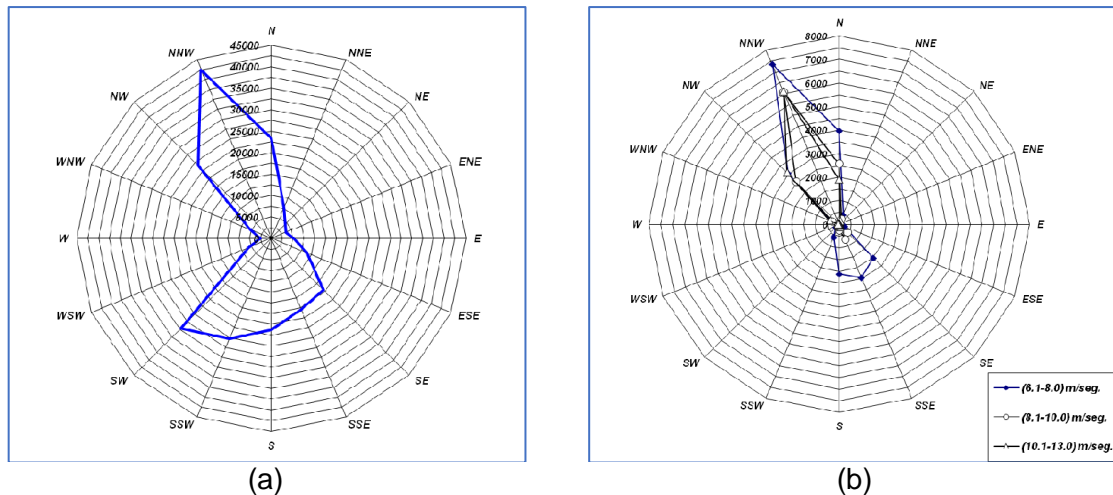
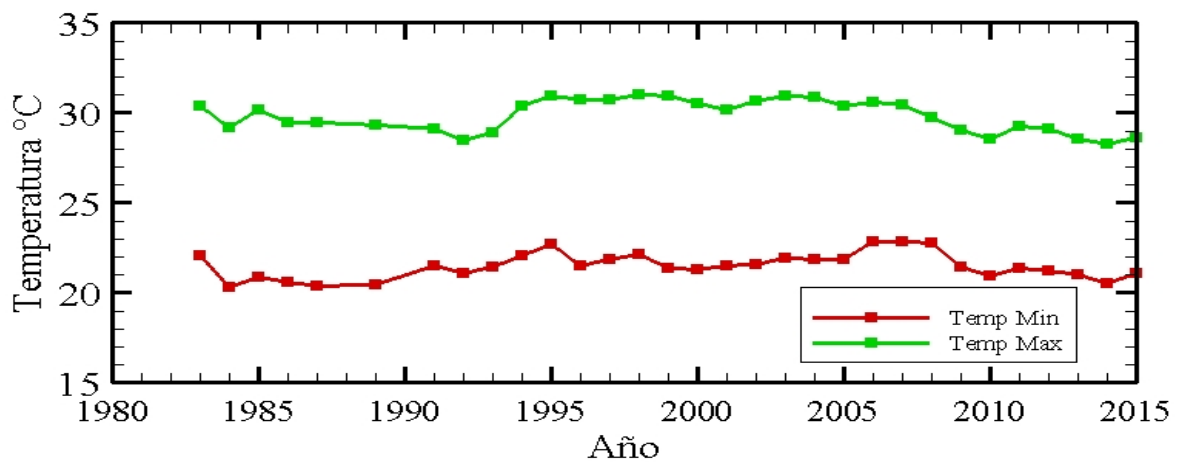


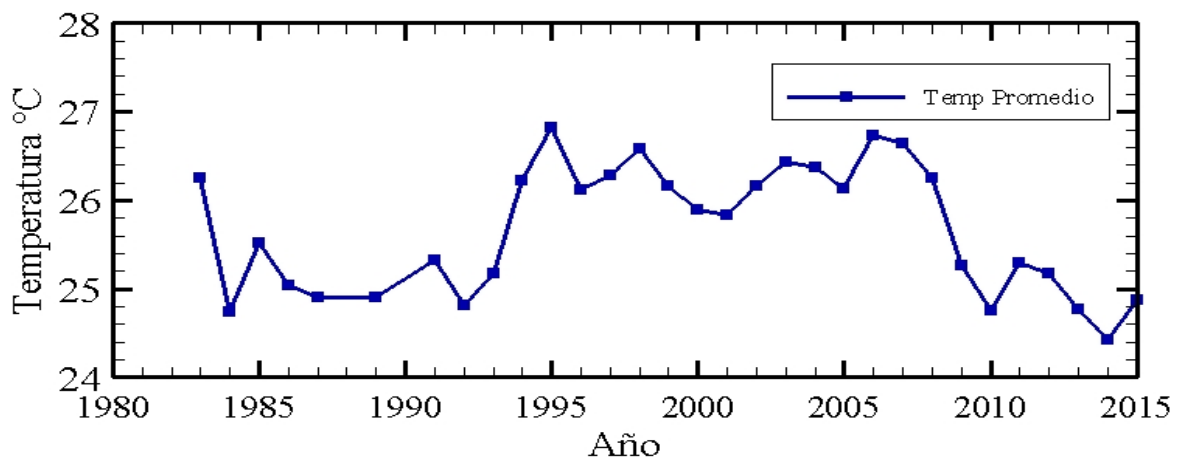
Figura 4.15: Rosa de los vientos de la CNLV para el periodo de 1980-2009: (a) Frecuencia y dirección. (b) Intervalo de rapidez. Tomada de [87].

4.2.3.4 Temperatura ambiente

Utilizando los datos históricos (1981-2015) de la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio ID 30353 LA MANCHA extraídos del CLICOM [88], se presenta el registro de temperaturas: máxima y mínima en la Figura 4.16(a) además de temperatura promedio en la Figura 4.16(b). Con excepción de algunos años que no registra información, se puede observar que las temperaturas máximas están alrededor de los 30 °C y las mínimas en los 20 °C. Respecto a temperaturas promedio ellas oscilan entre los 25 y 27 °C. Sin embargo, en los años 2010 - 2015 puede verificarse un ligero decremento en su magnitud en el rango de 24 – 25 °C.



(a)



(b)

Figura 4.16: Temperaturas anuales reportadas por la estación climatológica LA MANCHA: (a) Máximas y mínimas. (b) Promedio. Adaptada de [88].

4.3 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LA DESCARGA TÉRMICA DE LA CNLV

4.3.1 Estudios en campo

Son pocas las mediciones *in situ* de la pluma térmica emitida por la CNLV que se han realizado. Es necesario contar con ellas pues se puede analizar si diversos parámetros físicos, químicos y biológicos del agua de mar han sido alterados, pudiendo presentarse una afectación directa en el ecosistema marino. Una de ellas es la reportada por [28] en el año 2003. Dicha pluma es mostrada en la Figura 4.17 y en ella se puede apreciar que la isoterma 23.5 °C en línea punteada registra un área de 3.0 km².

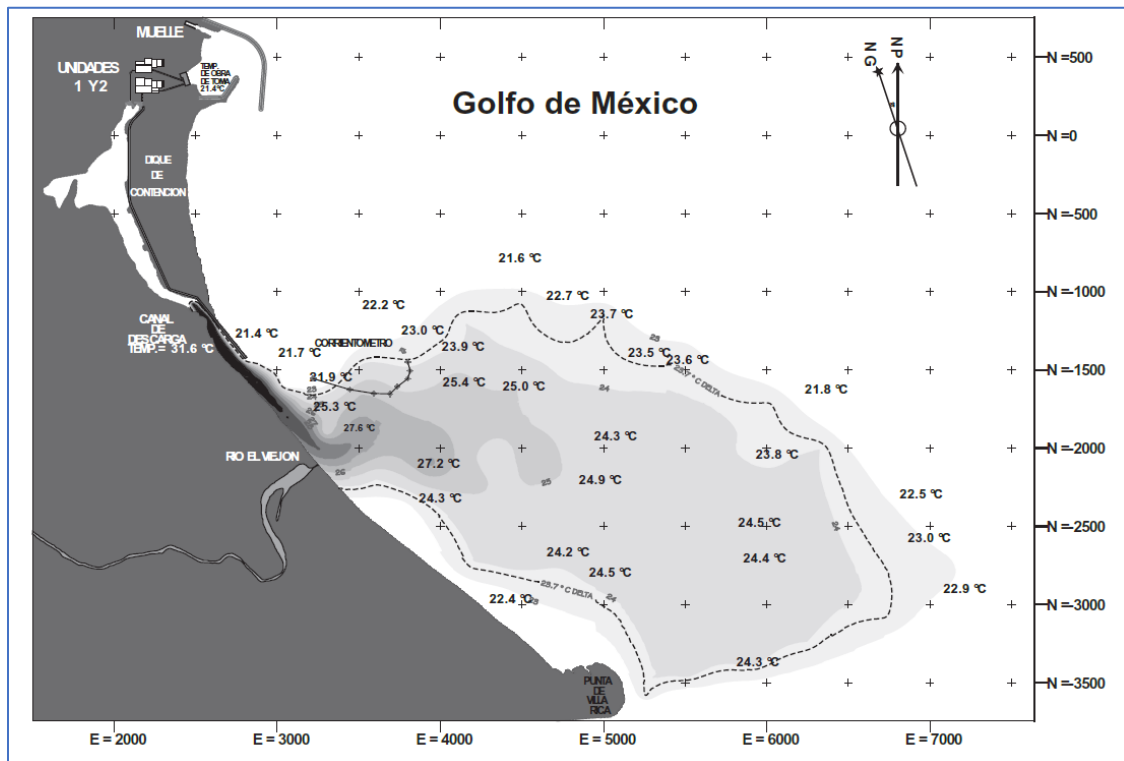


Figura 4.17: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV medida el 29 de enero de 2003. Tomada de [28].

Adicionalmente, la CFE realizó campañas de medición para los años 2011 al 2013. Se presentan una de cada uno de esos años, reportadas en [51], en las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20. En todas ellas se puede apreciar el área que abarca la pluma térmica, además de la variación de temperatura por medio de sus isotermas y las mediciones puntuales.

4.3 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LA DESCARGA TÉRMICA DE LA CNLV

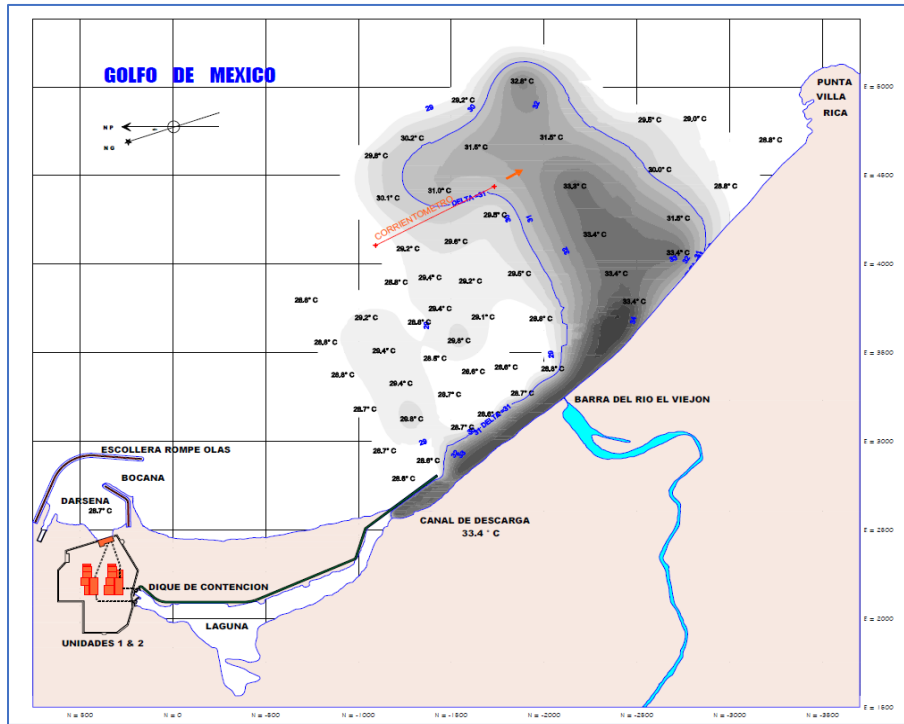


Figura 4.18: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV medida en mayo de 2011. Tomada de [51].

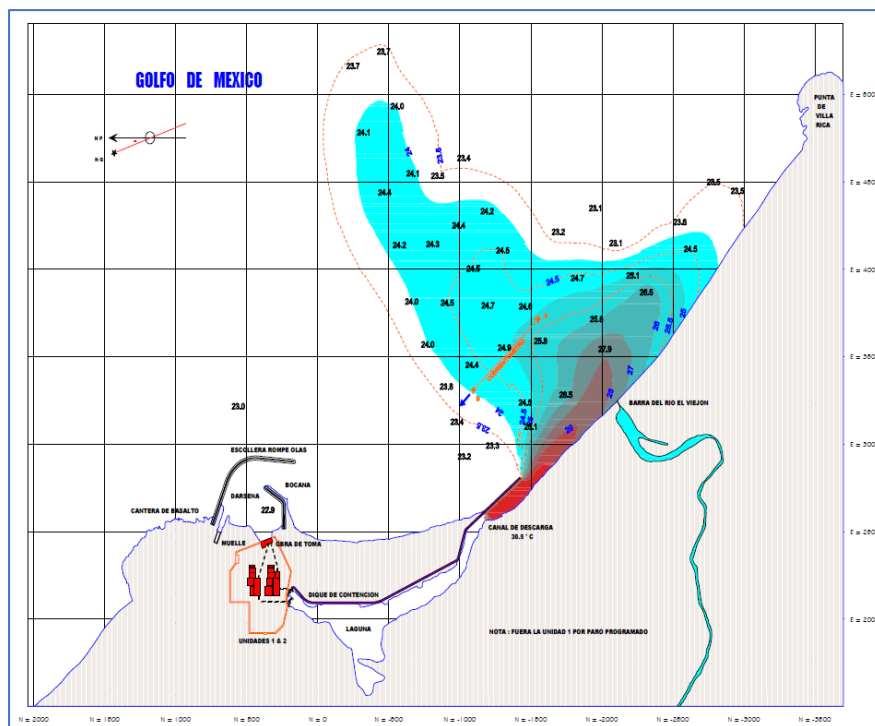


Figura 4.19: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV medida en enero de 2012. Tomada de [51].

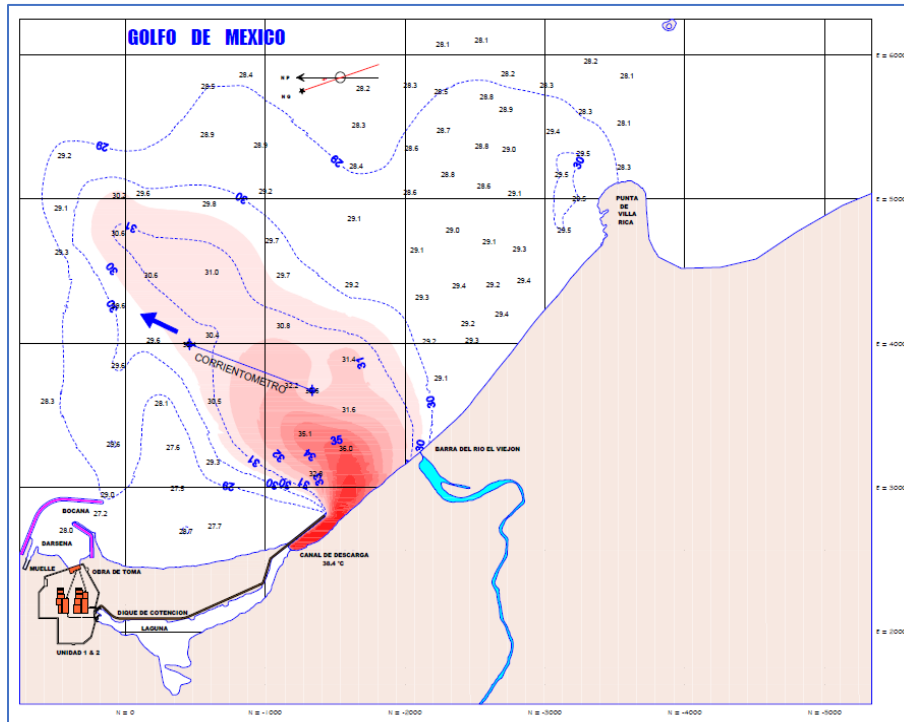


Figura 4.20: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV medida en julio de 2013. Tomada de [51].

4.3.2 Estudios con modelación numérica

Uno de los primeros estudios realizados con modelos numéricos fue el reportado por [27] en el año 1993. La dispersión térmica de la CNLV fue analizada con el modelo de Stolzembach-Harleman, aplicable exclusivamente en el campo cercano y para corrientes ambientales pequeñas. Detalles de este modelo se pueden consultar en [89]. Dicho estudio muestra una dispersión térmica en dirección contraria a la obra de toma mostrando isoterma en el rango 26 - 30 °C (Figura 4.21). Por otro lado, existen dos estudios previos efectuados con el modelo YAXUM/3D con los cuales se reprodujo la pluma térmica de la CNLV. El primero, la tesis de maestría elaborada por [47], analiza la dispersión térmica en tres escenarios: Secas, Lluvias y Nortes. Se llevaron a cabo simulaciones 2D obteniendo resultados similares a las mediciones en campos que se disponían. Además, se ejecutaron simulaciones 3D con 2 modelos de turbulencia a fin de determinar las posibles afectaciones en el fondo marino. En ambos tipos de simulaciones, se obtuvieron resultados aceptables. El segundo, publicado por [29], analiza la dispersión térmica para dos escenarios: secas y lluvias. La Figura 4.22 muestra la evolución en tiempo real de la pluma para el periodo de lluvias: de incisos (a) al (c) en los tiempos 40 hr, 80 hr y 240 hr de simulación, respectivamente. La hidrodinámica obtenida por medio

4.3 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LA DESCARGA TÉRMICA DE LA CNLV

de líneas de corrientes es mostrada en los incisos (d) al (f) en los mismos tiempos antes mencionados. Se concluye que hay afectaciones al sistema de enfriamiento de la CNLV al presentarse recirculación térmica en el periodo de lluvias con una temperatura de 2 °C más a los 28 °C registrados de temperatura media del mar en la zona.

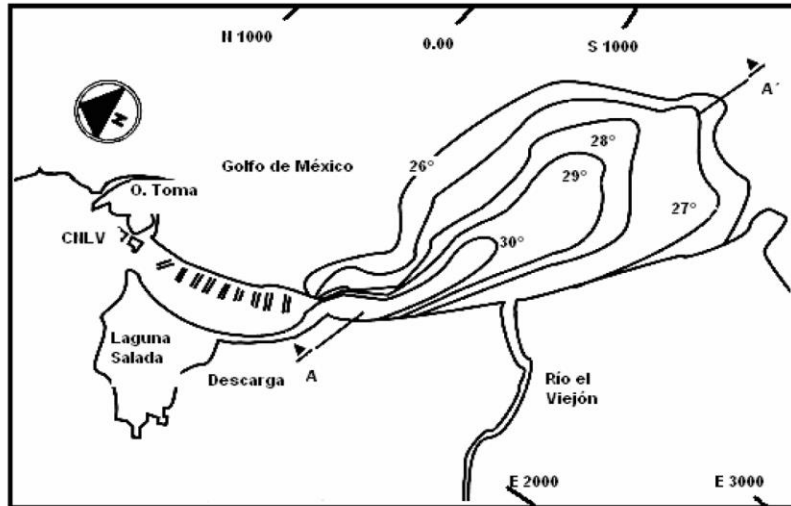


Figura 4.21: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV generada con el modelo Stolzenbach -Harleman en 1993. Tomada de [27].

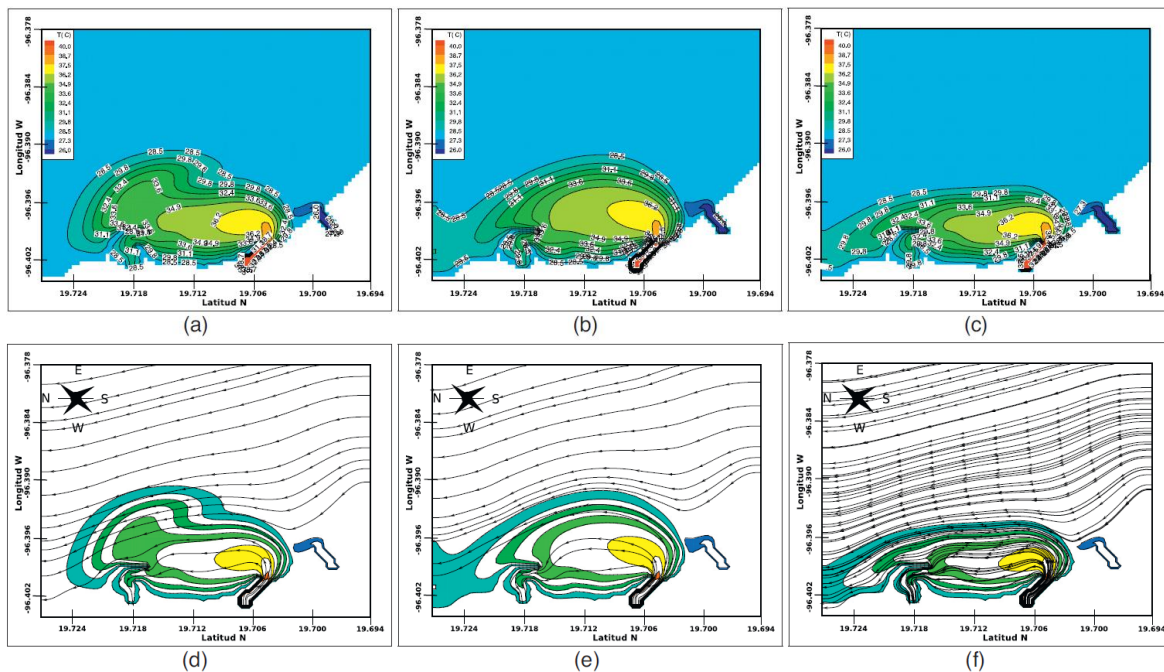


Figura 4.22: Dispersión de la pluma térmica de la CNLV generada con simulación numérica. Resultados de [47] publicados en [29].

4.3.3 Estudios con Teledetección

Derivado de la creciente preocupación mundial por la correcta administración de los recursos naturales, ha resultado imprescindible contar con herramientas capaces de proporcionar un mejor entendimiento de la situación de dichos recursos. Además, resulta fundamental contar con inventarios completos y actualizados respecto a los recursos soberanos nacionales, tales como los forestales, mineros, pesqueros, hidrológicos, hidráulicos, etc. Igualmente, es crucial su monitoreo ya que toda actividad que involucre a dichos recursos tendrá un impacto que puede disminuir su calidad o peor aún, que sean inaprovechables. Por tanto, manejarlos con una regulación apropiada permitirá disminuir dicho impacto. En el caso particular de los ecosistemas marinos, una técnica útil para lograr lo anterior es la Teledetección ya que resulta ser una opción eficiente con la cual se puede monitorear la distribución espacial de zonas acuáticas. Un ejemplo de su aplicación es la clasificación conocida como Global Aquatic Land Cover (GALC) utilizada para clasificar coberturas de cuerpos de agua [90]. Por otra parte, la Teledetección no se limita a ubicar y mapear un cuerpo de agua dentro de un territorio, con ella también es posible obtener información inherente a dicho cuerpo. Para ciertas investigaciones o proyectos de ingeniería, información detallada de los cuerpos de agua es necesaria. Por ejemplo, la SST en la zona costera alterada por la emisión de descargas térmicas por CT, es fundamental monitorearla para evitar producir contaminación térmica que disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua [2, 3]; el cual es un elemento necesario para los procesos metabólicos eficientes de la flora y fauna endémica. Sin embargo, información a ese nivel de detalle rara vez existe en bases de datos. Más aún, es difícil obtener información que algún usuario requiera de bases de datos para aplicaciones específicas. Dentro del contexto mexicano, respecto a mapas disponibles para monitorear las plumas térmicas que emiten las CGE a los mares nacionales, esta dificultad de acceso a la información es todavía mayor. A fin de disminuirla, como caso particular recientemente se hizo un esfuerzo en la generación de mapas de isotermas para la CNLV, los cuales proporcionan información técnica útil para la gestión adecuada de los recursos hídricos de la zona por parte de las autoridades. Estos mapas de isotermas son base para poder realizar investigación que permita, por medio de otras metodologías como la modelación numérica, la visualización sinóptica de una variedad de condiciones oceánicas.

Las siguientes secciones presentan una breve recopilación de las bases teóricas y de los productos generados al aplicarlas: mapas de isotermas para la CNLV. La información fue

extraída de una tesis de maestría elaborada en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) donde se utilizó Teledetección [10].

4.3.3.1 Satélites Landsat

El legado Landsat (Land = tierra y Sat = satellite), empezado en 1972, son satélites creados por los Estados Unidos de América para el monitoreo de los recursos terrestres. Su mantenimiento y operación están a cargo de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) mientras que la producción y comercialización de las imágenes del United States Geological Survey (USGS). Este legado está comprendido por 8 satélites, de los cuales actualmente están activos los satélites Landsat 7 y Landsat 8.

La evolución de los satélites Landsat ha permitido aumentar su cobertura de captura de información en la superficie terrestre con mejor precisión y detalles además de ciertas correcciones a sus algoritmos, gracias a la incorporación de cinco instrumentos básicos de diseño: los sensores Return Beam Vidicon (RBV), el Multiespectral Scanner Sensor (MSS), el Thematic Mapper (TM) y sus derivados, Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS). Con todos ellos, la obtención de características radiométricas, espaciales y espectrales mejoró. Más aún, también fue incorporado el Enhanced Thematic Mapper (ETM) que añade una banda pancromática (PAN) con mayor resolución y este último, con ciertas calibraciones, permite desde Landsat 7 obtener mejor resolución de datos térmicos. Las imágenes Landsat están organizadas conforme al mallado World Reference System (WRS), el cual está conformado por “paths” y “rows” [91] para definir una extensión geográfica de cada escena del Landsat.

En el caso de la Teledetección, Landsat provee a sus usuarios una única propuesta de valor con sus imágenes al ofrecer lo siguiente [92]:

1. Resolución espacial lo suficientemente fina para monitorear la actividad humana y para cubiertas más amplias dispone de resolución gruesa.
2. Cubertura espectral a lo largo y dentro de la parte infrarroja del espectro electromagnético, incluyendo cobertura en las regiones del infrarrojo de onda corta (1.55-1.75 μm , 2.08-2.35 μm) e infrarrojo térmico (10.4-12.5 μm).
3. Datos con calidad científica calibrada en el sensor de radiancia y reflectancia.
4. Una estrategia que garantiza adquisición de información global para todas las zonas continentales.
5. La distribución de datos es gratuita y publica.

Particularmente el Landsat 8, puesto en operación en febrero de 2013, es la columna vertebral del programa Landsat. Compuesto de dos sensores: OLI que cubre las bandas Visible and Near-Infrared (VNIR) junto con las Shortwave Infrared (SWIR) y del TIRS (bandas 10 y 11) que cubre la onda larga infrarroja con una resolución espacial de 30 m, Landsat 8 es capaz de adquirir al menos 700 escenas diarias cubriendo prácticamente todas las zonas terrestres del planeta; L8 puede cubrir la misma área en la tierra cada 16 días. La Tabla 4.4 presenta características técnicas del Landsat 8 [93].

Tabla 4.4: Características técnicas del Landsat 8.

No.	Característica	Descripción			
		#	Nombre	Long. Onda (μm)	Resolución (m)
1	Banda espectral	1	Coastal	0.435 – 0.451	30
		2	Blue	0.452 – 0.512	30
		3	Green	0.533 – 0.590	30
		4	Red	0.636 – 0.673	30
		5	NIR	0.851 – 0.879	30
		6	SWIR 1	1.566 – 1.651	30
		7	SWIR 2	2.107 – 2.294	30
		8	PAN	0.503 – 0.676	15
		9	Cirrus	1.363 – 1.384	30
		10	TIRS 1	10.60 – 11.19	100
		11	TIRS 2	11.50 – 12.51	100
2	Escenografía	180 km x 190 km			
3	Precisión cartográfica	12 m			
4	Orbita sincrónica con el sol	705 km			
5	Vel. transmisión de datos	384 Mbps en frecuencia de la banda X;			

4.3.3.2 Procesamiento de las imágenes satelitales

Del USGS se obtuvo la información satelital con la corrección estándar de terreno nivel 1 (L1TP). El área de interés en la cual el satélite Landsat 8 pasa alrededor de las 11:00 h (hora local) con ajuste al WRS corresponde a la escena de trayectoria 24, filas 46-47. A fin de evitar errores de interpretación, las imágenes seleccionadas fueron con cielo limpio de nubes, tolerando un máximo de 10% de nubosidad. La banda TIRS 10 (10.60 μm -11.19 μm) fue utilizada debido a que ella reporta menores alteraciones debidas al contenido de vapor de agua además de errores de sensibilidad en perfiles atmosféricos [94, 95]. Los datos fueron convertidos de números digitales a radiancia espectral ($L_{t,10}$) utilizando factores para escalar la radiancia provistos por los archivos de metadatos [93]. La SST fue calculada por la siguiente ecuación modificada de Plank [96]:

$$SST = \frac{K_2}{\ln \left[\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{R_c} + 1 \right]} \quad (4.22)$$

donde:

- ε_{NB} Es la emisividad de banda estrecha, la cual corresponde a la emisividad dentro del rango de banda del sensor térmico del satélite.
- R_c Es la radiancia térmica, corregida desde la superficie utilizando la radiancia espectral de la banda térmica 10 del L8, ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$);
- K_1 Es una constante con valor 774.8853 $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$
- K_2 Es una constante con valor 1,321.0789 $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$

La radiancia R_c es obtenida por la siguiente expresión [97]:

$$R_c = \frac{L_{t,10} - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \varepsilon_{NB})R_{sky} \quad (4.23)$$

donde:

- $L_{t,10}$ Es la radiancia espectral de la banda 10 del L8, ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)
- R_p Es la trayectoria de la radiancia en las bandas 10.6 a 11.19 μm
- R_{sky} Es la banda de transmisividad estrecha - radiación térmica hacia abajo para un cielo limpio, ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$);
- τ_{NB} Es la banda de transmisividad estrecha del aire (10.64-11.19 μm).

En ausencia de un modelo de corrección atmosférica, los parámetros $R_p = 0.91$, $\tau_{NB} = 0.86$ y $R_{sky} = 1.32$ pueden ser considerados [96]. De acuerdo con [98] la emisividad de la superficie del mar depende de la temperatura del agua y de la salinidad en la región

espectral infrarroja. Para las características de la zona de estudio, se utilizó un valor de $\varepsilon_{NB} = 0.969$.

4.3.3.3 Resultados y discusión

Validación de resultados obtenidos por Teledetección

Los patrones de temperatura obtenidos por Teledetección fueron comparados con datos *in situ* medidos por la Secretaría de Marina de México (SEMAR). Dichas mediciones fueron efectuadas del 9 al 12 de mayo de 2018. La Figura 4.23 muestra la ubicación de los puntos de medición. La comparativa fue llevada a cabo con cuatro imágenes L8 TIRS, las primeras dos del 4 de mayo y las últimas dos para el día 20 del mismo mes, ambas fechas para el año 2018. Vale la pena mencionar que se hizo una búsqueda exhaustiva de las fechas de imágenes obtenidas con satélite más próximas respecto a las campañas de medición, resultando las previamente mencionadas en mayor cercanía. También debe resaltarse que no fue posible hacer coincidir la hora de las mediciones en campo con la hora del paso del satélite. Sin embargo, dada la autocorrelación espacial [99], la proximidad entre esas fechas es considerada como aceptable, debido a que se observa un patrón típico de la temperatura del agua de mar en la zona.

En la Figura 4.24 se muestra la correlación entre los datos medidos en campo y las temperaturas obtenidas con Teledetección, donde la línea recta representa un ajuste perfecto. Para cuantificar el error obtenido, las métricas Root Mean Square Error (RMSE) y el sesgo B correspondiente fueron calculadas para una cantidad NT de datos y son presentados en la Tabla 4.5. Las métricas antes mencionadas se obtienen con las siguientes expresiones:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [T_{RS} - T_{obs}]^2}{NT}} \quad (4.24)$$

$$B = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^n (T_{RS} - T_{obs}) \quad (4.25)$$

4.3 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LA DESCARGA TÉRMICA DE LA CNLV

donde:

T_{RS} es la temperatura obtenida con Teledetección, (°C)

T_{obs} es la temperatura medida *in situ*, (°C)

NT es el total de datos.

Los resultados muestran que el esquema propuesto reproduce un patrón de distribución espacial regional de temperaturas apropiado, a pesar de las diferencias de fechas entre los datos medidos en campo y las imágenes del L8 TIRS.

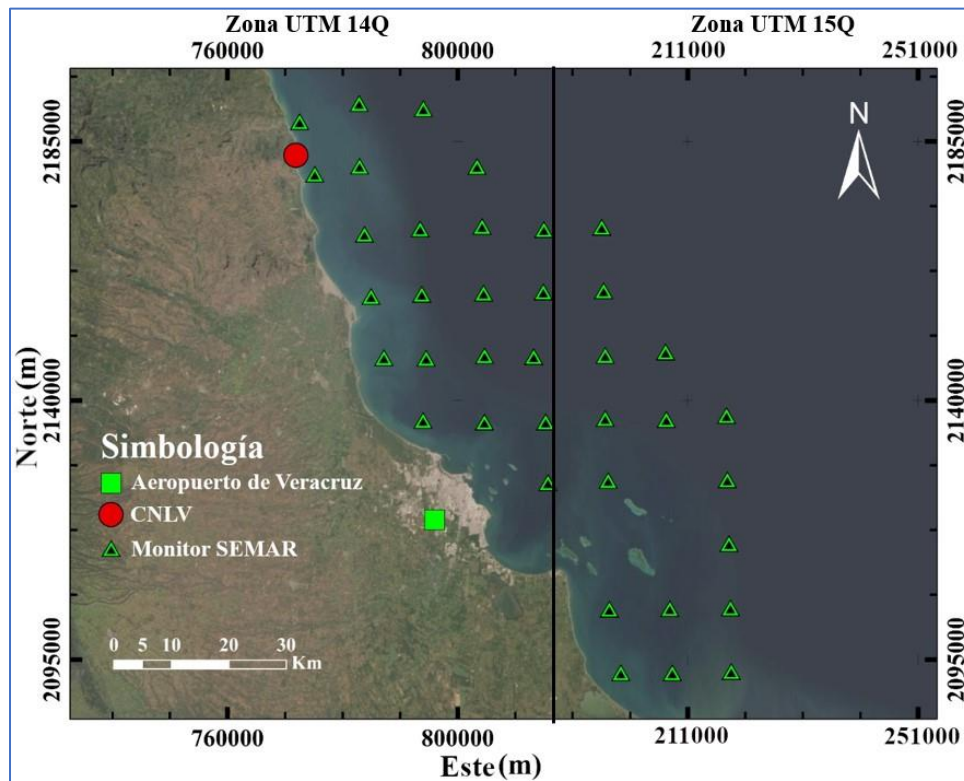


Figura 4.23: Ubicación de los monitores de la SEMAR. Adaptada de [10].

Tabla 4.5: Errores de los campos de temperatura obtenidos con Teledetección.

Fuente: [10].

Fecha imagen	Path	Row	RMSE	B	NT
04/05/2018	24	46	1.41	-1.15	17
04/05/2018	24	47	1.32	-0.62	32
20/05/2018	24	46	0.95	0.85	16
20/05/2018	24	47	0.81	0.87	31
Global			1.81	0.01	96

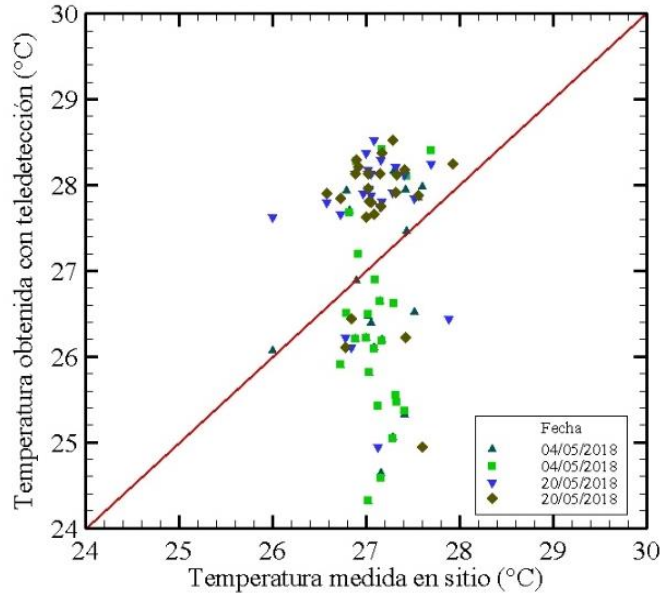


Figura 4.24: Regresión lineal de las cuatro imágenes utilizadas en el proceso de validación. Adaptada de [10].

Campos de temperatura

En esta subsección, se presentan solo 4 imágenes obtenidas con la técnica de Teledetección. Su autor obtuvo una mayor cantidad de imágenes que fueron analizadas a mayor detalle y pueden ser consultadas en [10]. La Figura 4.25 muestra los campos de temperatura obtenidos para diferentes estaciones del año: invierno, primavera, verano y otoño. Todas las imágenes muestran que existe recirculación hacia la obra de toma. Sin embargo, la Figura 4.25(b) muestra la mayor concentración de temperatura en forma de recirculación al no esparcirse hacia mar adentro. Respecto al esparcimiento de la pluma térmica, los escenarios de invierno y verano son los que muestran la mayor área. En ambos escenarios, así como en el otoño, se observa cierta afectación hacia la obra de toma debido a que la pluma se esparce mar adentro. La Figura 4.25(d) es un escenario más favorable al esparcir de forma contraria a la obra de toma. La Tabla 4.6 muestra las características de las plumas térmicas en relación con su área de influencia, dirección de esparcimiento y su temperatura máxima. La mayor área de esparcimiento es observada en verano, seguidas de las de invierno y otoño.

4.3 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LA DESCARGA TÉRMICA DE LA CNLV

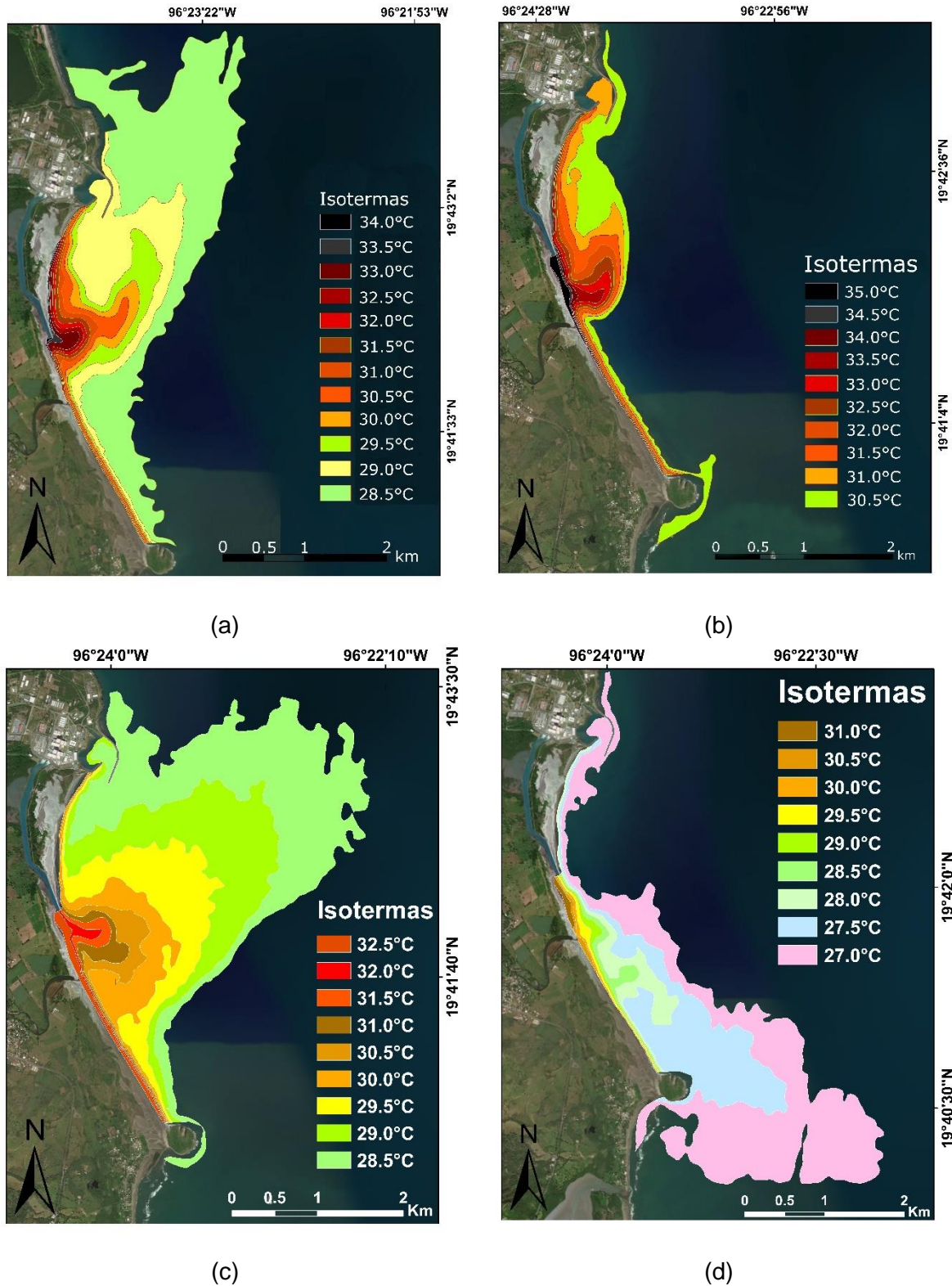


Figura 4.25: Isothermas obtenidas con Teledetección: (a) 25/01/2017; (b) 17/05/2017; (c) 19/09/2016; (d) 08/10/2017. Adaptada de [10].

El escenario que presenta el menor esparcimiento resulta ser el de primavera. Sin embargo, dicha pluma emite la mayor temperatura al mar con un pico de 35.0 °C. Por lo tanto, esta dispersión térmica no solo recircula en su mayoría hacia la obra de toma, sino que también es la que más afecta los sistemas de enfriamiento de la CNLV.

Tabla 4.6: Características de las plumas térmicas obtenidas con Teledetección. Adaptada de [10].

Fecha	Área de influencia (km ²)	Dirección	Temperatura Máxima (°C)
25/01/2017 (invierno)	7.43	Noreste	34.0
17/05/2017(primavera)	2.45	Norte	35.0
19/09/2016 (verano)	9.73	Noreste	32.5
08/10/2017 (otoño)	7.09	Sureste	31.0

4.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este Capítulo, se describió el entorno físico cercano a la CNLV, se mostraron los datos de operación de la CNLV y la batimetría aledaña, se realizó una búsqueda y recopilación de información para considerar las condiciones hidrológicas, oceanográficas, meteorológicas y ambientales en la zona de estudio; todo ello es información necesaria para alimentar al modelo Delft3D-FLOW que permitirá caracterizar la descarga térmica de la CNLV.

Más aún, se recopilaron los estudios previos realizados en la CNLV, utilizando diferentes métodos de monitoreo: mediciones *in situ*, simulaciones numéricas y un solo estudio generado con teledetección. Del último método, se revisaron varias imágenes compartidas por el IITCA que muestran la pluma térmica emitida por la CNLV. Se realizó un análisis de 4 plumas térmicas obtenidas con Teledetección y además se identificaron las imágenes que muestran las isotermas con las temperaturas mayores. Posteriormente, se seleccionaron 2 de las 4 imágenes donde se observa recirculación térmica hacia la obra de toma de la CNLV y son las que presentan las mayores temperaturas en el canal de descarga. Dichas imágenes serán la base de calibración del modelo Delft3D-FLOW.

Por último, las imágenes de las plumas térmicas de la CNLV generadas con Teledetección, calibradas y validadas con mediciones *in situ* en un área extensa, se pueden utilizar para calibrar modelos hidrodinámicos y de dispersión térmica. En el siguiente capítulo se presentará la implementación, calibración y validación del modelo

4.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

hidrodinámico Delft3D-FLOW para analizar la dispersión de la pluma térmica en los escenarios seleccionados.

Capítulo 5

5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DELFT3D-FLOW A LA ZONA DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presenta la implementación en el modelo Delft3D-FLOW para llevar a cabo simulaciones numéricas de la pluma térmica de la CNLV. Con esta finalidad, se lleva a cabo una búsqueda de información necesaria para alimentar dicho modelo, posteriormente se calibra y valida con el objetivo final de representar la dispersión térmica. Las búsquedas por información fueron hechas en la literatura científica, páginas web, mediciones en campo, instituciones federales y en repositorios de tesis. Se consideraron parámetros batimétricos, hidrológicos, oceanográficos y climáticos. Con la información obtenida, se implementa el modelo Delft3D-FLOW solo para dos escenarios: invierno y primavera. En ambos, se reproduce la pluma térmica obtenida con la técnica de Teledetección en un día y a una hora determinada donde se observó recirculación térmica hacia la obra de toma, situación no favorable para el correcto funcionamiento de los sistemas de enfriamiento de la CNLV. Se consideran 5 grados de mallado en las simulaciones. Las mallas varían en número y tamaño de celda, empezando con un mallado grueso y terminando con un mallado fino. Cercanos a la línea de costa, se ubicaron siete puntos monitores para realizar la calibración y validación, la extracción de datos de ellos y el análisis de resultados. El análisis de la dispersión de la pluma térmica,

obtenida con simulaciones numéricas, se hace con dos enfoques. El primero se enfoca en observar el efecto de utilizar diferentes modelos de turbulencia en las simulaciones numéricas. El segundo analiza las condiciones termodinámicas de la pluma térmica mediante la comparación de diversos números adimensionales. Finalmente, una discusión de los resultados obtenidos se lleva a cabo para una mejor comprensión de la dispersión de las plumas térmicas.

5.2 EJECUCIÓN DEL MODELO DELFT3D-FLOW

Es esta sección, las generalidades de implementación del Delft3D-FLOW para el caso de la CNLV son descritas. Se muestra el dominio computacional para las simulaciones, el periodo de simulación, los parámetros de operación de la CNLV, las condiciones iniciales y de frontera que interactúan con la hidrodinámica, las mallas utilizadas, el esquema numérico de solución seleccionado y los puntos de monitoreo para el análisis de la dispersión de la pluma térmica.

5.2.1 Delimitación del dominio computacional

El dominio computacional para realizar las simulaciones fue generando con dimensiones aproximadas de 3 km de ancho por 6 km de largo con el objetivo de garantizar que la pluma térmica alcance su dispersión máxima. Además, el tamaño extenso del dominio garantiza que la zona de estudio no se vea afectada por efecto de la imposición numérica de las condiciones de frontera. Dicho dominio se presenta en la Figura 5.1 con sus coordenadas UTM respectivas, geográficamente ubicado en la zona 14 Norte.

5.2.2 Mallas computacionales

Respecto a la discretización horizontal, se decidió implementar cinco mallas numéricas las cuales varían en su refinamiento. Así, se obtiene una mejor precisión en los resultados hasta alcanzar la independencia de malla. Las mallas son presentadas en la Figura 5.2. empezando con la más gruesa Figura 5.2(a) a la más fina Figura 5.2(e). A la malla más gruesa se le denominó malla 1 y a la más fina como malla 5. Las características de cada malla se muestran en la Tabla 5.1.

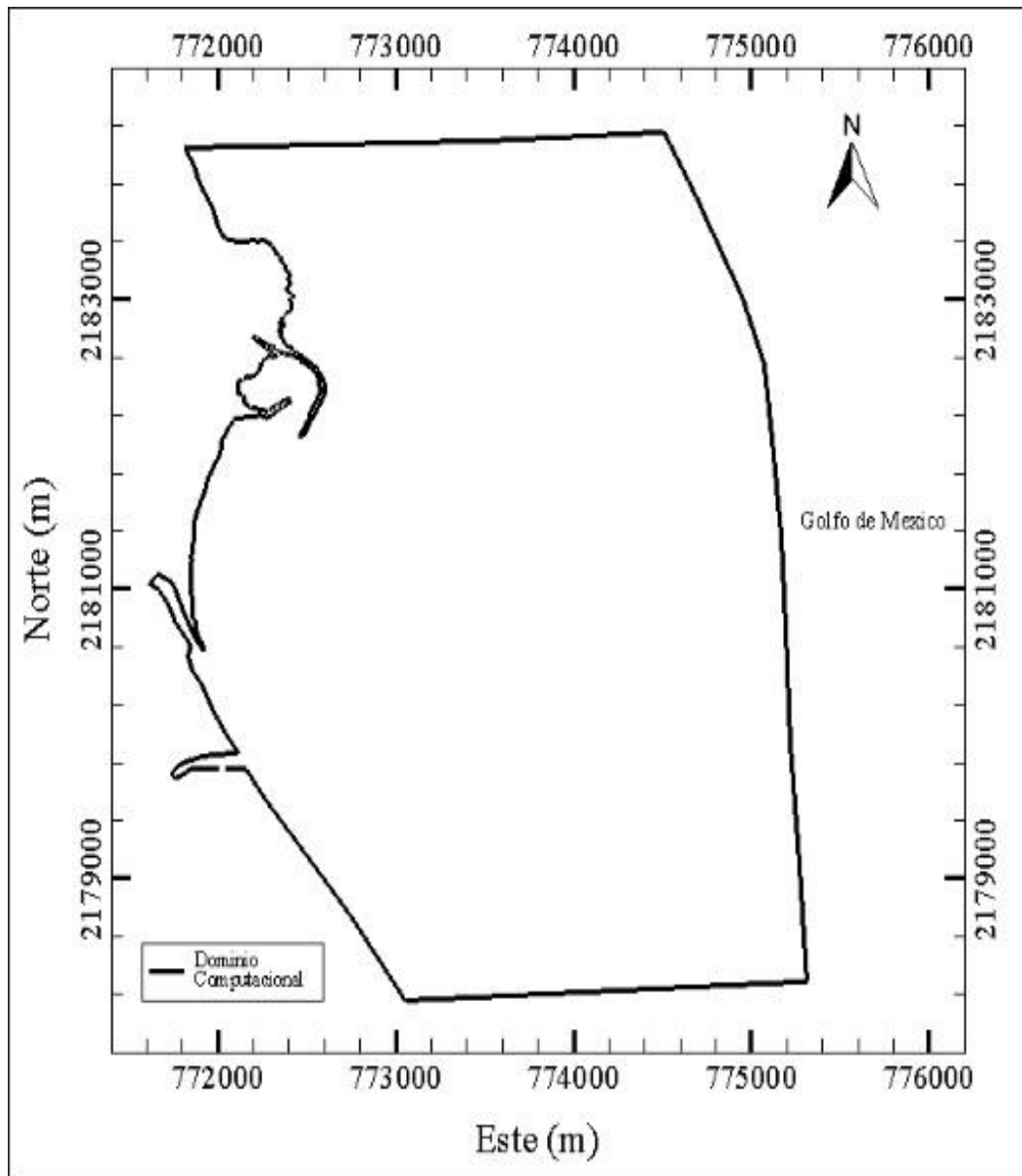


Figura 5.1: Dominio computacional seleccionado para realizar las simulaciones.

5. IMPLEM.DEL DELFT3D A LA ZONA DE ESTUDIO Y ANALISIS DE RESULTADOS

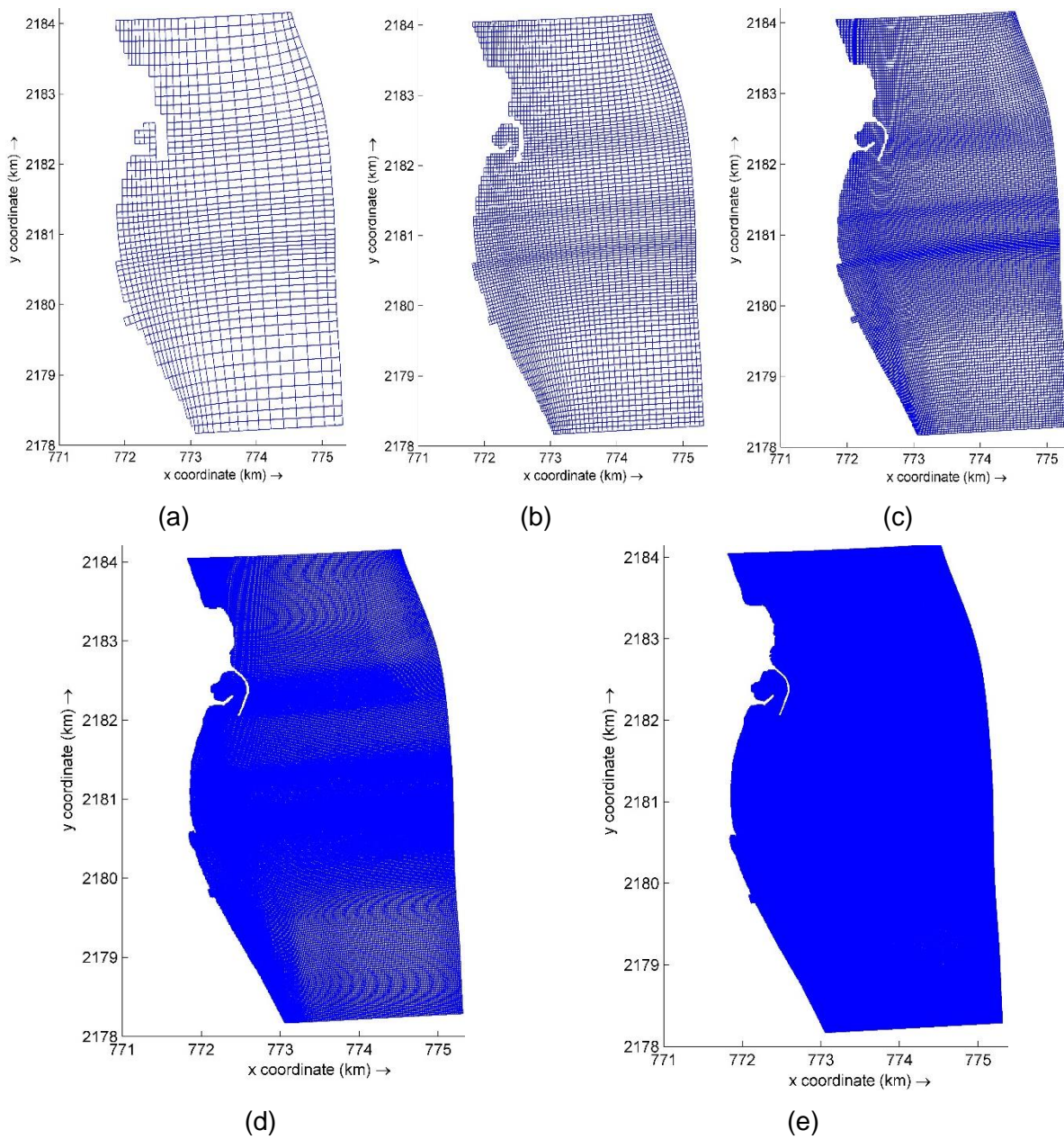


Figura 5.2: Mallas computacionales:

(a) Malla 1, (b) Malla 2, (c) Malla 3, (d) Malla 4, (e) Malla 5.

Tabla 5.1: Características de las mallas

Malla No.	1	2	3	4	5
# celdas	1,110	4,551	18,172	72,995	292,904
Δx (m)	90	45	22.5	11.4	5.7
# celdas (5 capas)	5,550	22,755	90,860	364,975	1,464,520

5.2 EJECUCIÓN DEL MODELO DELFT3D-FLOW

Para la discretización vertical, se utilizaron 5 capas de coordenada tipo σ , a fin de ajustar la batimetría al fondo. La Figura 5.3 muestra un corte transversal para la malla 3 donde se puede visualizar la discretización vertical, la cual fue espaciada uniformemente. Este criterio de discretización vertical fue utilizado para cada una de las 5 mallas.

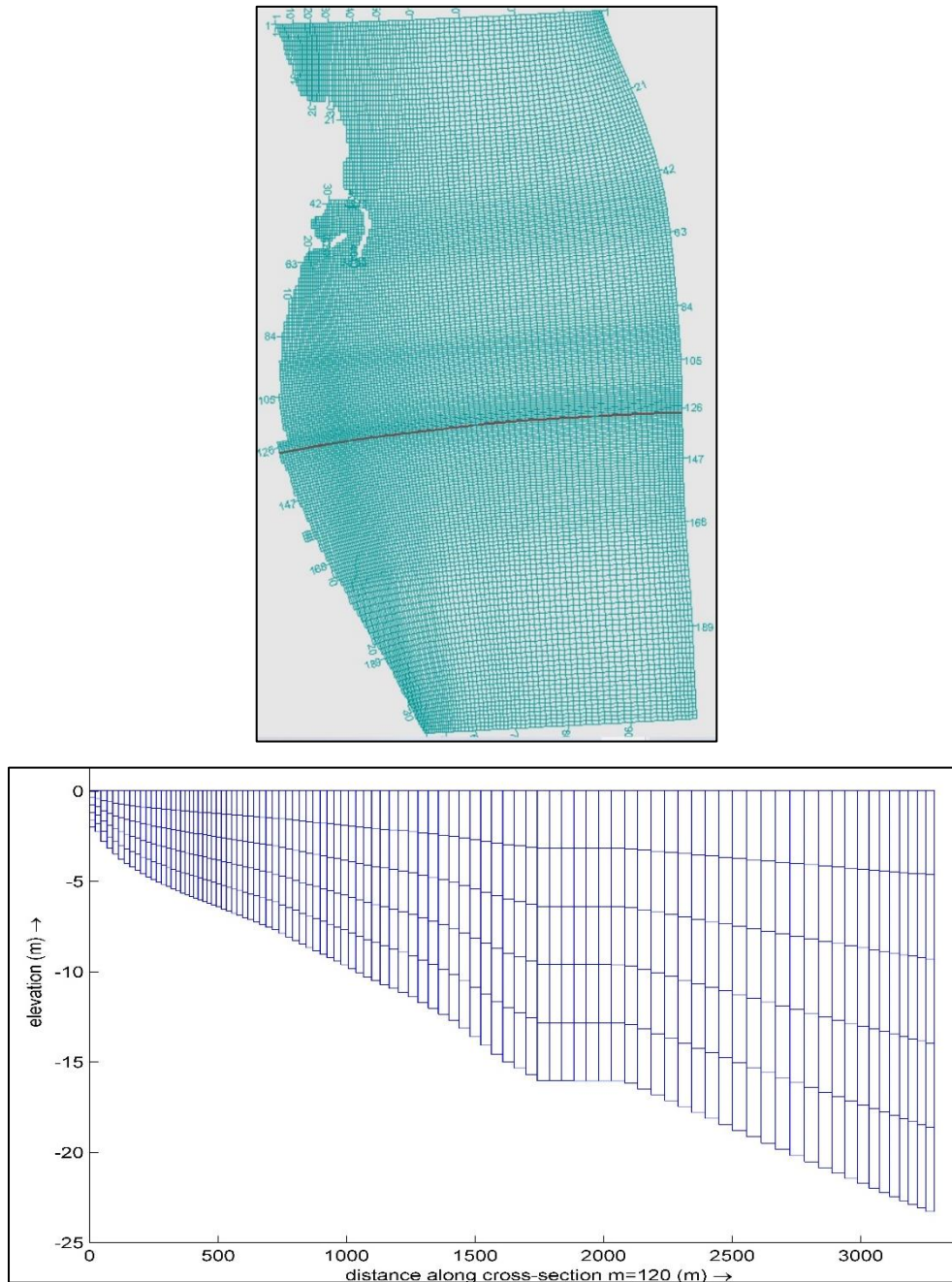


Figura 5.3: Corte transversal en la malla 3 y su discretización vertical.

5.2.3 Batimetría y puntos monitores

La batimetría utilizada es la mostrada en la Figura 5.4. En ella se puede observar su variación, desde los 0 m hasta los 28 m. Además, incluye la ubicación de los puntos monitores, cuyas coordenadas se presentan en la Tabla 5.2. Los puntos monitores son nombrados de P1 a P7, localizando a P1 y P2 en la zona de la obra de toma mientras que P6 y P7 se ubican próximos al canal de descarga.

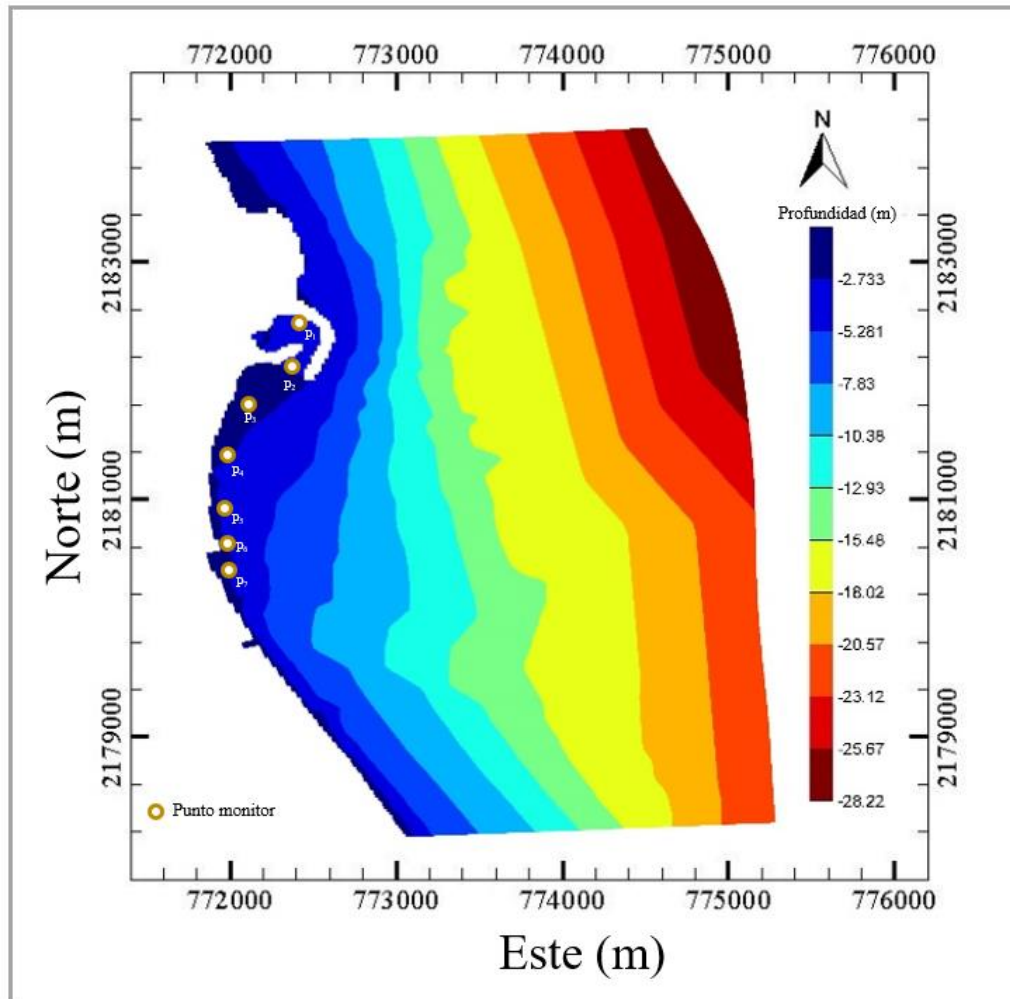


Figura 5.4: Batimetría y puntos monitores.

La profundidad donde están localizados los puntos monitores es considerada como somera. Es en esta zona que debido a su cercanía con la costa es difícil que se presente estratificación térmica, pues dominan los procesos de mezclado. Otra característica de la poca profundidad que va de acorde a utilizar la hipótesis de las aguas someras es que las variaciones en la vertical son despreciables.

Tabla 5.2: Coordenadas de los puntos monitores.

Punto monitor	Profundidad (m)	Este (m)	Norte (m)
P1	5.000	772,425.201	2,182,447.463
P2	3.085	772,400.956	2,182,157.199
P3	1.956	772,117.267	2,181,778.558
P4	2.967	771,987.358	2,181,333.401
P5	3.122	771,986.412	2,180,881.994
P6	2.438	771,986.412	2,180,590.917
P7	1.938	771,980.561	2,180,413.213

5.2.4 Selección de escenarios y periodos de simulación

Dos periodos de simulación fueron seleccionados: el primero corresponde para la temporada de invierno comenzando el 23 de enero de 2017 a las 00:00 hr y terminando el 25 de enero a las 12:00 hr, el segundo corresponde del 15 de mayo de 2017 a las 00:00 hr al 17 de mayo de 2017 a las 12:00 hr. La fecha y hora que interesa para las dos estaciones del año antes mencionadas son del 25 de enero de 2017 a las 11:45 hr y del 17 de mayo de 2017 a las 11:45 hr, respectivamente. Ambas fechas fueron seleccionadas debido a que presentan un escenario desfavorable de recirculación térmica hacia la obra de toma de la CNLV y corresponden con las imágenes mostradas en la Figura 4.25(a) y 4.25(b). Dichas imágenes servirán para el proceso de calibración del modelo Delft3D-FLOW que se describe en la subsección 5.2.7. El periodo de simulación para cada estación del año comprende las fechas antes mencionadas, pudiendo observarse que incluye dos días previos a la fecha y hora de captura de las imágenes. Esos dos días tienen la función de ser utilizados como calentamiento numérico a fin de evitar obtener resultados espurios producidos por oscilaciones numéricas. En todas las simulaciones se utilizó el periodo completo, incluyendo aquellas que sirvieron para calibrar al modelo Delft3D-FLOW y el paso de tiempo seleccionado Δt es de 0.01 min para cumplir con la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL).

5.2.5 Condiciones iniciales y de frontera

Las condiciones de inicialización en las simulaciones varían dependiendo de la temporada del año analizada, las cuales se presentan en la Tabla 5.3 y todas ellas son fijadas de forma constante durante todo el periodo de simulación. La temperatura media del mar fue asumida como uniforme sobre todo el dominio computacional. La rugosidad del fondo marino, considerando que en su mayoría está compuesto por arena, es seleccionada con base a la clasificación de Manning [100]. Además, es necesario especificar el tipo de Wall roughness para la fricción en paredes laterales y debido a que la zona de simulación es de gran escala, se seleccionó la condición Free Slip. La velocidad de las corrientes marinas es de 0 m/s y el nivel de agua es elegido de acuerdo con el primer dato de la marea considerada. El gasto del río “El Viejón” fue el obtenido con el análisis hidrológico para el periodo de retorno de 2 años (ver Figura 4.10) para el escenario de primavera y los parámetros de operación de la CNLV son los utilizados por [29].

Tabla 5.3: Inicializaciones consideradas para cada escenario.

Condición	Invierno	Primavera
Temperatura media del mar en la zona (°C)*	28.0	29.4
Densidad de referencia (kg/m ³)*	1024.0	1024.0
Densidad del aire (kg/m ³)*	1.0	1.0
Valor para la gravedad, <i>g</i> (m/s ²)*	9.81	9.81
Coefficiente de rugosidad de Manning (s/m ^{1/3})*	0.025	0.025
Salinidad de referencia (ups)*	33.0	33.0
Gasto del canal de descarga (m ³ /s)	63.0	63.0
Gasto de succión en la obra de toma (m ³ /s)	63.0	63.0
Gasto del Río “El Viejón” (m ³ /s)	0.0	5.18
Temperatura del agua en el canal de descarga (°C)	34.0	35.0
Temperatura del agua en la obra de toma (°C)	28.5	29.4
Temperatura del Río “El Viejón” (°C)	0.0	30.0

*Aplicado sobre todo el dominio computacional

Respecto a las condiciones de frontera, las cuales son del tipo abiertas, se contemplaron a las corrientes marinas asignándolas de forma perpendicular a las denominadas Frontera abierta Norte y Sur mientras que el tren de marea en la denominada Frontera abierta Este. Las asignaciones se muestran en la Figura 5.5. Las primeras (Figura 5.6) fueron generadas con el modelo HYCOM (<https://www.hycom.org/>) suponiendo que su variación

5.2 EJECUCIÓN DEL MODELO DELFT3D-FLOW

es lineal y, por otro lado, las segundas (Figura 5.7) fueron extraídas del software para la predicción de mareas de México Mar V1.0 creado por CICESE (<https://www.cicese.edu.mx>) Ambas condiciones se obtuvieron para todo el periodo de simulación.

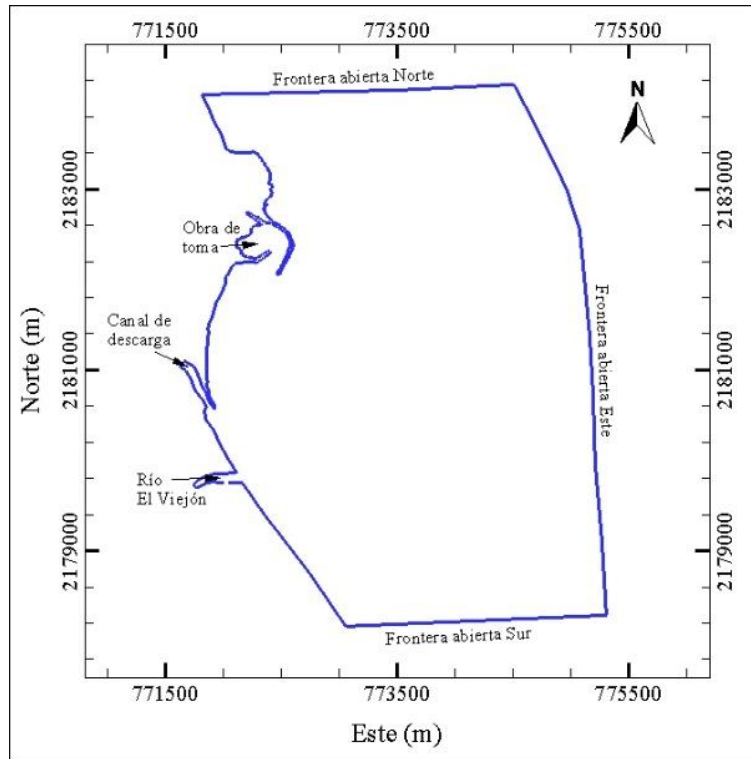


Figura 5.5: Asignación de las condiciones iniciales y de frontera.

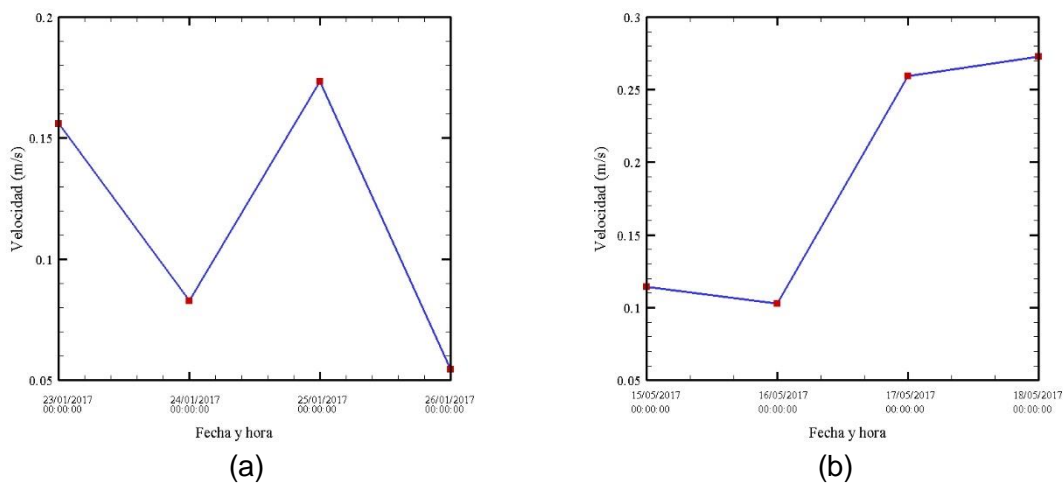


Figura 5.6: Magnitud de la velocidad de las corrientes marinas: (a) Invierno; (b) Primavera.

5. IMPLEM.DEL DELFT3D A LA ZONA DE ESTUDIO Y ANALISIS DE RESULTADOS

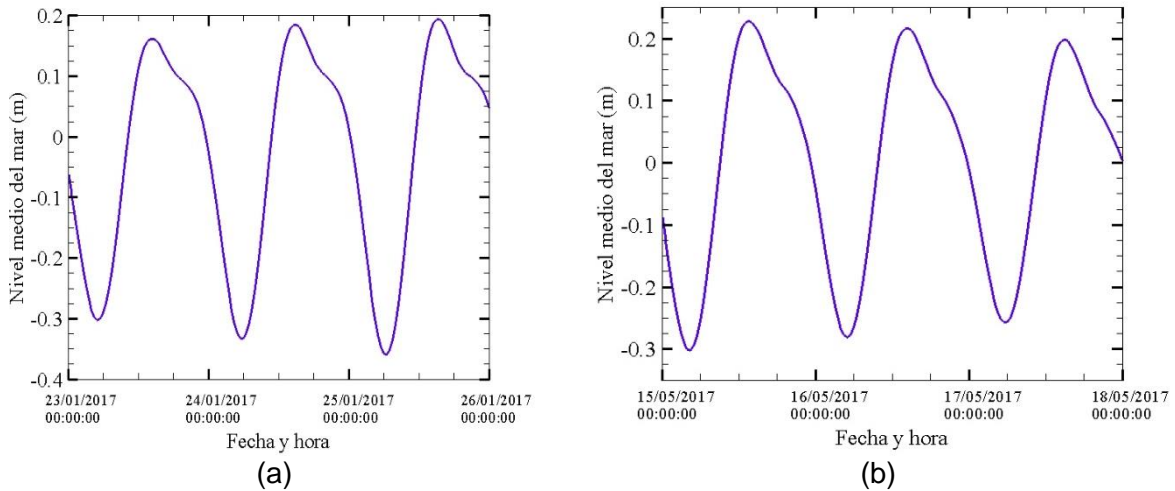


Figura 5.7: Tren de mareas: (a) Invierno; (b) Primavera

Adicionalmente, se consideraron en las simulaciones la radiación solar y el viento aplicadas en todo el dominio computacional. Del primero, se aplicó la radiación solar utilizada en [16] por estar su caso de estudio cercano a CNLV. Dada la disponibilidad de información, se seleccionó la opción de radiación solar total como modelo de flujo de calor en el Delft3D-FLOW. La radiación solar utilizada es presentada en la Figura 5.8. Del segundo, se presenta la rosa de vientos en la Figura 5.9. La información meteorológica para alimentar el módulo de calor y de viento fue descargada de un registro del aeropuerto de Veracruz en [101].

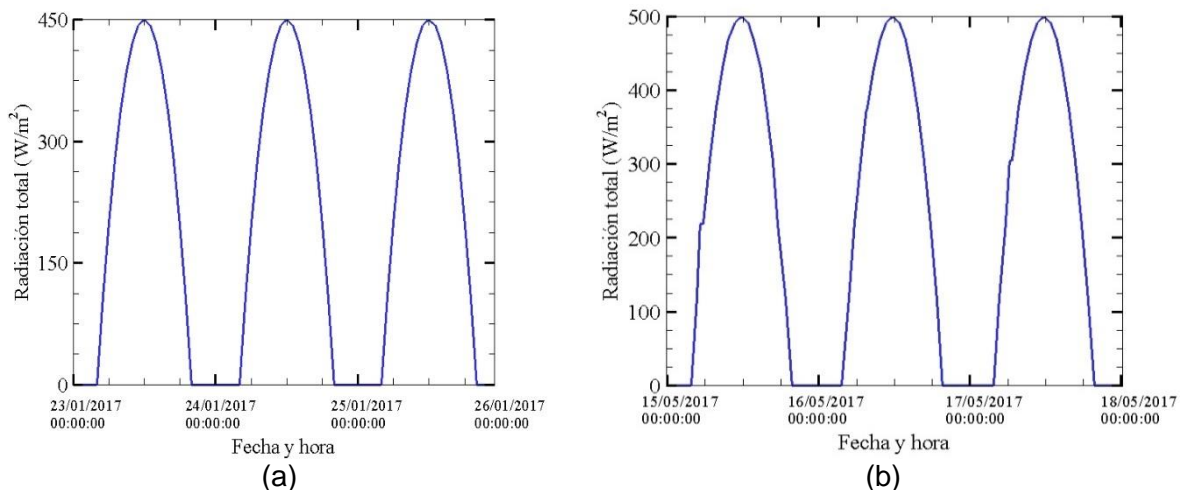


Figura 5.8: Radiación solar de la zona cercana a CNLV: (a) Invierno; (b) Primavera

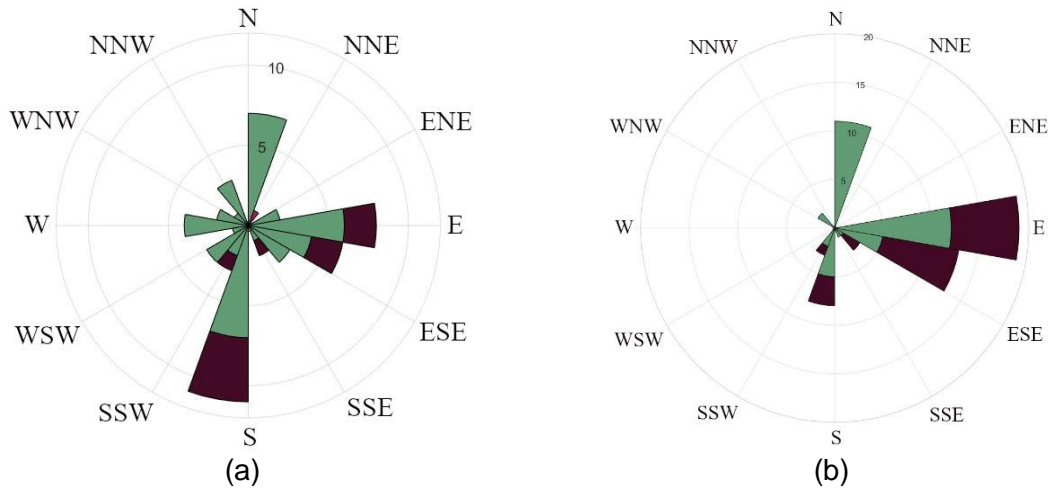


Figura 5.9: Rosa de los vientos de la zona cercana a CNLV: (a) Invierno; (b) Primavera.

5.2.6 Esquema de solución numérico

La solución del sistema de ecuaciones que describen el movimiento de aguas someras en Delft3D-FLOW es por la vía numérica. En este trabajo, se selecciona el esquema conocido como Cyclic desarrollado por [102] para la discretización espacial de los términos advectivos horizontales en las ecuaciones de cantidad de movimiento y de transporte.

5.2.7 Calibración y validación de las simulaciones numéricas

Para la calibración del modelo Delft3D-FLOW y la posterior validación de las simulaciones numéricas se hizo una comparativa de los campos de temperatura obtenidos mediante la técnica de Teledetección para los escenarios de invierno y primavera: Figura 4.25(a) y 4.25(b), respectivamente. La fecha y hora de lectura de los resultados en Delft3D-FLOW es el 25/01/2017 y el 17/05/2017, ambos a las 11:45 hr, para los escenarios de invierno y primavera, respectivamente. En todas las simulaciones, se utilizaron los modelos de cerradura de turbulencia AEM, $k - L$ y el $k - \varepsilon$ con y sin el modelo HLES. Lo anterior para visualizar y discutir las diferencias en los resultados devueltos al utilizar cada modelo de turbulencia. En el caso del HLES, en su configuración se adoptaron los valores que Delft3D-FLOW incluye por default.

Un proceso iterativo de prueba y error fue llevado a cabo para calibrar al modelo Delft3D-FLOW e involucró incrementar y decrementar los parámetros ν_H^{back} , ν_V^{back} , D_H^{back} y D_V^{back} ,

todos ellos descritos en la subsección 3.7.3, hasta obtener una concordancia apropiada entre los resultados numéricos y los obtenidos por Teledetección.

La validación contempla tres métricas, la primera es la misma que describe la ecuación (4.24). La segunda, conocida como métrica de Nash-Sutcliffe (NS), se muestra a continuación:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [T_{RS} - T_{sim}]^2}{\sum_{i=1}^n [T_{RS} - \bar{T}]^2} \quad (5.1)$$

Y la tercera, con el nombre de Mass Balance Error (m), es la siguiente:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n |T_{RS} - T_{sim}|}{\sum_{i=1}^n T_{RS}} \quad (5.2)$$

donde

- T_{RS} Es la temperatura obtenida con Teledetección, (°C)
- T_{sim} Es la temperatura obtenida con las simulaciones numéricas, (°C)
- \bar{T} Es el promedio de los valores obtenidos con Teledetección, (°C)
- n Es el número de datos contenidos en T_{RS}

Es importante mencionar que la calibración para el escenario de invierno solo se realizó en la malla 3, mientras que el escenario de primavera fue calibrado en las 5 mallas. Todos los valores de v_H^{back} , v_V^{back} , D_H^{back} y D_V^{back} fueron variados cientos de veces hasta obtener resultados satisfactorios. Los valores finales de ellos y que fueron utilizados para el posterior análisis de los resultados se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Valores finales obtenidos después de calibrar y validar las temperaturas.

Parámetro	Rango de valores	Invierno	Primavera
v_H^{back}	$10^{-5} - 10^2$	0.002	0.002
v_V^{back}	$10^{-5} - 10^2$	0.05	0.02
D_H^{back}	$10^{-5} - 10^2$	2	2
D_V^{back}	$10^{-5} - 10^2$	0.6	0.6

Los resultados de las métricas, obtenidos con los parámetros mostrados en la Tabla 5.4, para el escenario de invierno se presentan en las Tablas 5.5 (malla 3) mientras que, para el escenario de primavera, en las Tablas 5.6 -5.10 (mallas 1 a 5).

5.2 EJECUCIÓN DEL MODELO DELFT3D-FLOW

Tabla 5.5: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de invierno en malla3.

Métrica	Con HLES			Sin HLES		
	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$
RMSE	0.832	0.831	0.835	0.674	0.697	0.684
NS	0.796	0.797	0.795	0.866	0.857	0.862
m	0.018	0.018	0.018	0.017	0.018	0.018

Tabla 5.6: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de primavera en malla 1.

Métrica	Con HLES			Sin HLES		
	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$
RMSE	0.526	0.526	0.524	0.671	0.674	0.684
NS	0.835	0.836	0.837	0.732	0.730	0.722
m	0.014	0.014	0.014	0.018	0.018	0.018

Tabla 5.7: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de primavera en malla 2.

Métrica	Con HLES			Sin HLES		
	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$
RMSE	0.651	0.645	0.631	0.444	0.445	0.450
NS	0.748	0.753	0.764	0.883	0.882	0.879
m	0.016	0.016	0.016	0.011	0.011	0.012

Tabla 5.8: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de primavera en malla 3.

Métrica	Con HLES			Sin HLES		
	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$
RMSE	0.598	0.594	0.585	0.334	0.334	0.333
NS	0.788	0.791	0.797	0.934	0.934	0.934
m	0.014	0.014	0.014	0.009	0.009	0.009

Tabla 5.9: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de primavera en malla 4.

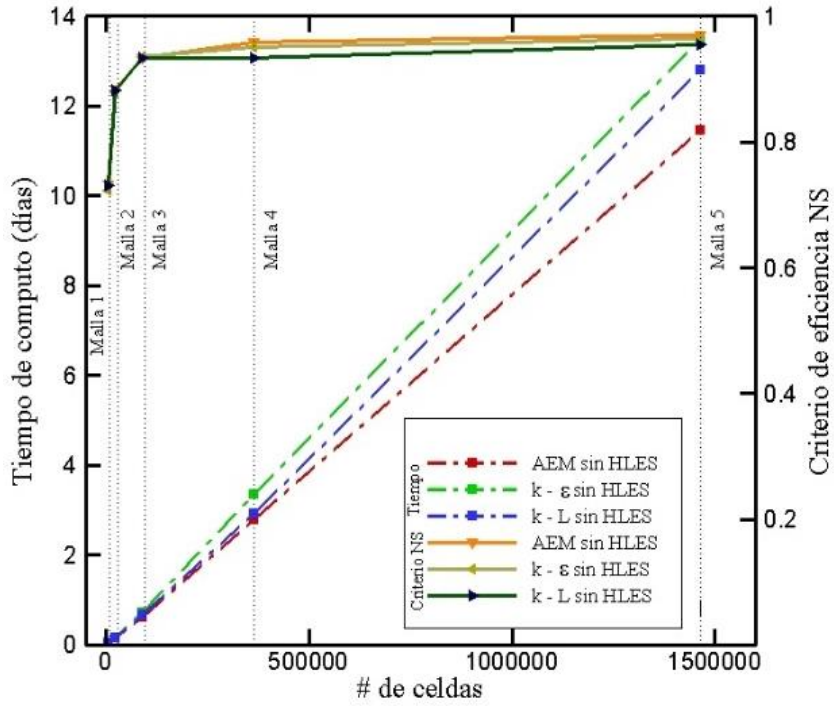
Métrica	Con HLES			Sin HLES		
	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$
RMSE	0.491	0.486	0.475	0.264	0.336	0.289
NS	0.857	0.859	0.866	0.958	0.933	0.950
m	0.012	0.012	0.012	0.007	0.009	0.008

Tabla 5.10: Métricas para cada modelo de turbulencia, escenario de primavera en malla 5

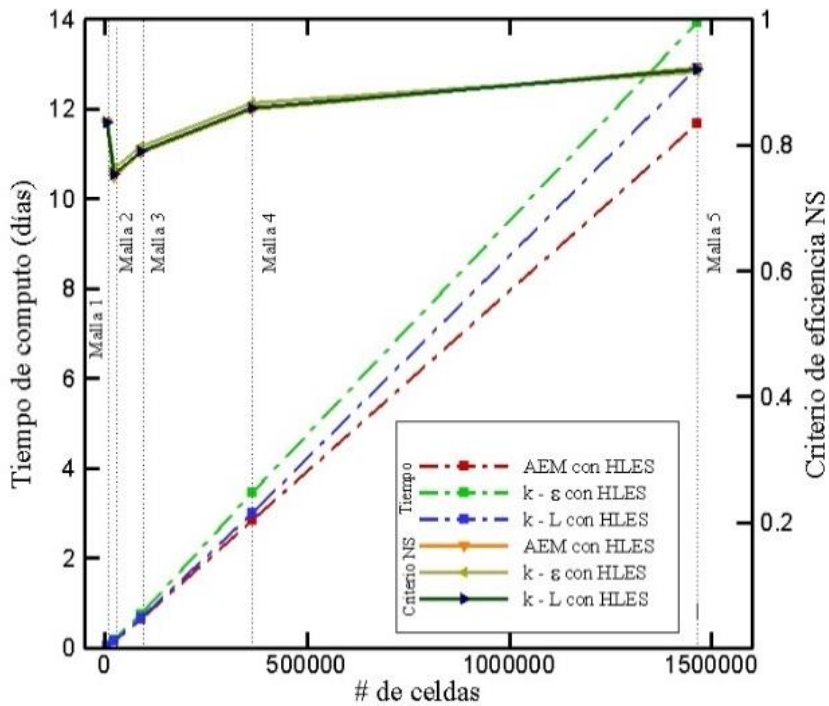
Métrica	Con HLES			Sin HLES		
	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$	AEM	$k-L$	$k-\varepsilon$
RMSE	0.361	0.368	0.374	0.224	0.274	0.243
NS	0.923	0.919	0.917	0.970	0.955	0.965
m	0.010	0.010	0.010	0.006	0.008	0.007

A pesar de que los resultados mostrados en las Tablas 5.6 a 5.10 mejoran al refinar las mallas, en ningún caso se obtiene un resultado que iguale a las temperaturas obtenidas con Teledetección. La explicación a esta diferencia de temperaturas puede asociarse a que participan incontables variables en el fenómeno de dispersión térmica, tales como las hidrológicas, meteorológicas, climáticas y oceanográficas, todas ellas introducen mayor complejidad al problema en estudio. Más aún, la diversidad en las escalas temporales y en las espaciales también generan cierto nivel de incertidumbre. Consecuentemente, este caso de estudio está lejos de ser un experimento controlado. Habiendo explicado lo anterior, se procede interpretar los puntajes de las métricas. Respecto de las métricas RMSE y m, si su puntaje es cercano a cero, la validación es aceptable. Por otro lado, en la métrica de NS, un valor de 1 equivale a una validación perfecta. De acuerdo con [103], para el criterio de NS un puntaje mayor a 0.5 indica que el desempeño numérico en la validación es aceptable. Tomando como referencia los puntajes obtenidos en la Tabla 5.10, la malla más fina, se observa que los puntajes de las tres métricas cumplen satisfactoriamente con los criterios de aceptabilidad para validar las simulaciones numéricas. Para el resultado de invierno, Tabla 5.5, también se cumplen los criterios de aceptación. Entonces, por lo anteriormente expuesto, los resultados de las validaciones se aceptan como confiables y se procede al análisis de las simulaciones. La Figura 5.10 muestra el puntaje NS obtenido, así como el tiempo de cómputo requerido para completar el periodo de simulación para cada malla. Se puede observar en ella que el tiempo de cómputo en las mallas más gruesas es del orden de horas mientras que el de la malla más fina es cercano a las 2 semanas. Es importante mencionar que en la malla 5 ya no se aprecia una mejora significativa del puntaje NS, por tanto, se ha alcanzado la independencia de malla de los resultados numéricos.

El tiempo de cómputo que necesita una simulación numérica para terminar depende, indudablemente, de los recursos computacionales disponibles.



(a)



(b)

Figura 5.10: Puntaje de la métrica NS y tiempo de cómputo para las 5 mallas, escenario de primavera: (a) Sin HLES; (b) con HLES

En esta disertación, todas las simulaciones fueron ejecutadas en una computadora personal que cuenta con los recursos siguientes:

- Sistema operativo: Windows 10 Home Single Language
- Procesador: Intel core i7-7700HQ CPU @ 2.80 GHz
- Memoria RAM: 16 GB
- Versión del Delft3D-FLOW: revisión 9180 (x64).

En general, los resultados reportados sin HLES muestran mejor aproximación que cuando se utiliza el modelo HLES. De forma particular por modelo de turbulencia, el modelo que muestra mejor desempeño en las tres métricas utilizadas en el presente trabajo de investigación es el modelo AEM.

A continuación, se presenta una comparativa a lo largo de los 7 puntos monitores de las temperaturas generadas con Teledetección contra las obtenidas con simulaciones numéricas después del proceso de calibración. La Figura 5.11 corresponde al escenario de invierno mientras que las Figuras 5.12 a 5.16 al escenario de primavera.

Las Figuras 5.11 a 5.16 muestran curvas de decaimiento de la temperatura en los 7 puntos monitores, del P7 al P1. El primero es el más cercano al canal de descarga y el último se ubica próximo a la obra de toma. En el escenario de invierno (Figura 5.11), los resultados corresponden a la fecha del 25/01/2017 a las 11:45 hr que es la misma fecha y hora de la imagen 4.25(a). Para el escenario de primavera, (Figuras 5.12-5.16), los resultados corresponden a la fecha del 17/05/2017 a las 11:45 hr que es la misma fecha y hora *local* de la Figura 4.25(b). En cada una de estas 6 figuras, la línea roja solida muestra el decaimiento de las temperaturas obtenidas con Teledetección, mientras que el resto de las líneas representan las curvas de decaimiento de la temperatura obtenidas por medio de las simulaciones numéricas utilizando los distintos modelos de turbulencia disponibles en Delft3D-FLOW. Se observa que, a medida que la refinación en el mallado aumenta, la diferencia entre las temperaturas numéricas y las obtenidas con Teledetección disminuye, pasando de variaciones de hasta 2 °C en la malla 1 (Figura 5.11) a diferencias menores a 0.5 °C en la malla 5 (Figura 5.16). Exclusivamente en el caso del escenario de invierno, el P7 coincide con la ubicación de la descarga. La ubicación del resto de los puntos monitores es la misma del escenario de primavera.

5.2 EJECUCIÓN DEL MODELO DELFT3D-FLOW

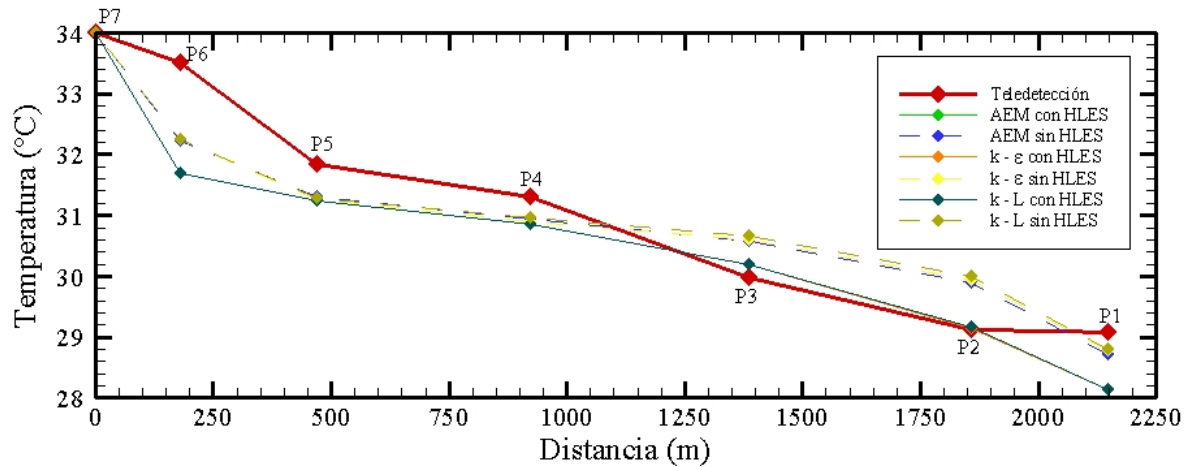


Figura 5.11: Comparativo de temperaturas para la malla 3, escenario de invierno.

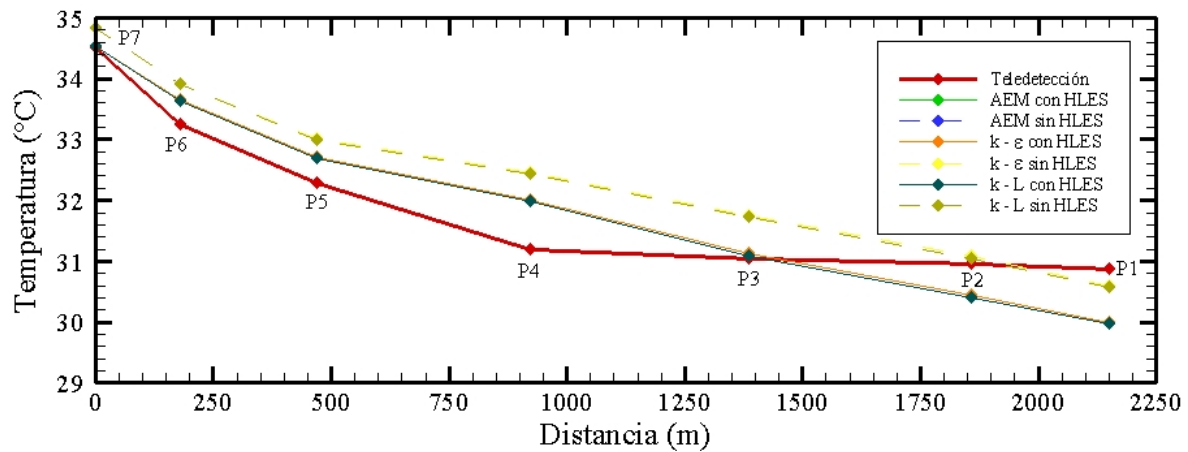


Figura 5.12: Comparativo de temperaturas para la malla 1, escenario de primavera.

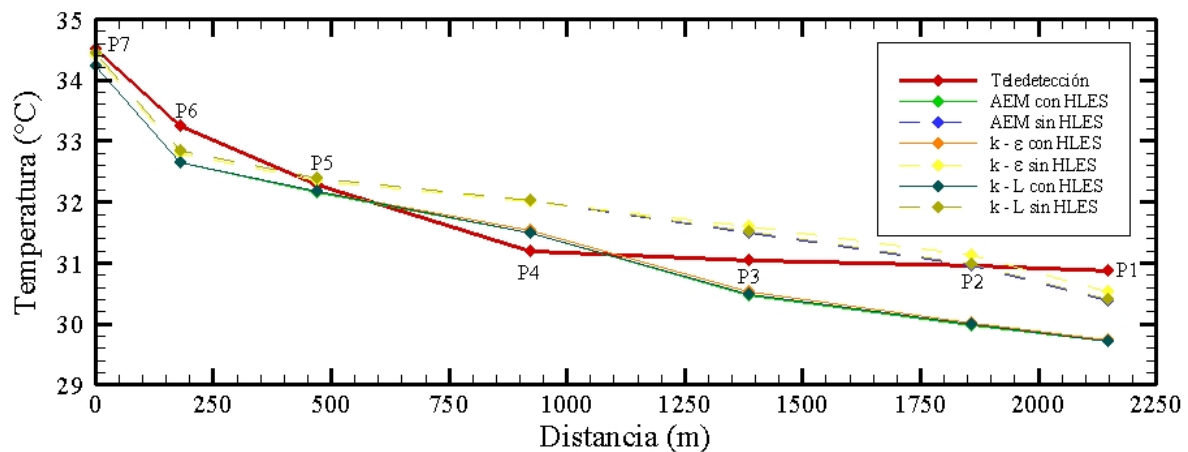


Figura 5.13: Comparativo de temperaturas para la malla 2, escenario de primavera.

5. IMPLEM.DEL DELFT3D A LA ZONA DE ESTUDIO Y ANALISIS DE RESULTADOS

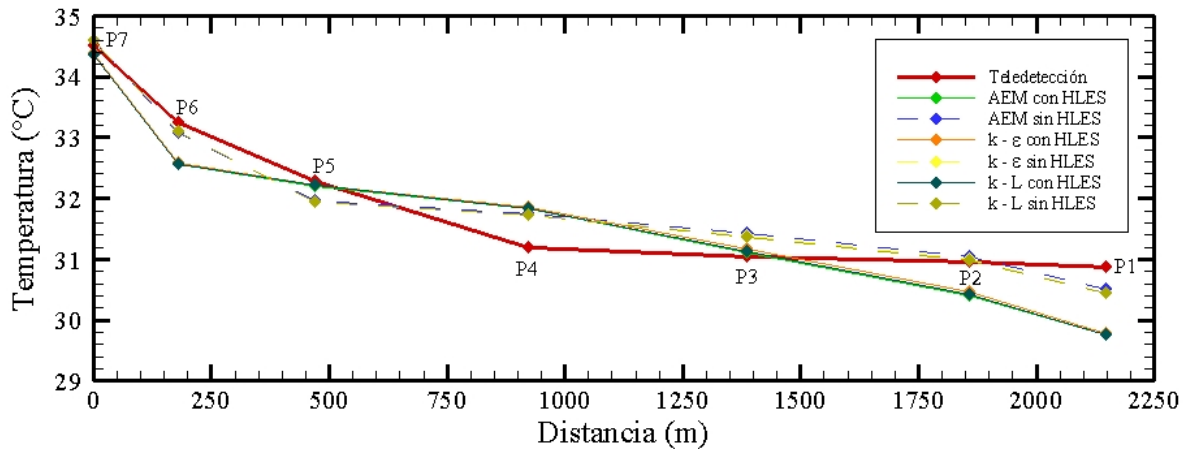


Figura 5.14: Comparativo de temperaturas para la malla 3, escenario de primavera.

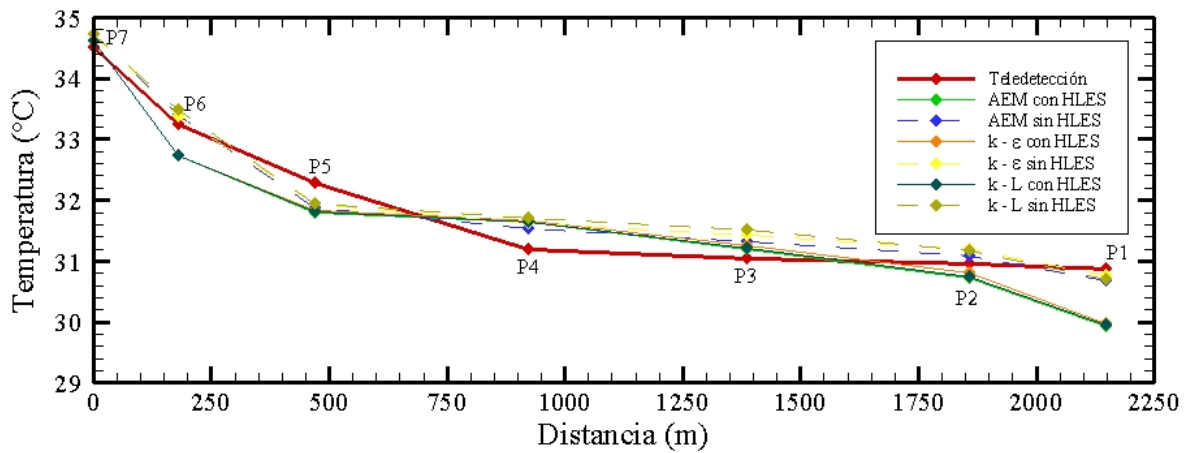


Figura 5.15: Comparativo de temperaturas para la malla 4, escenario de primavera.

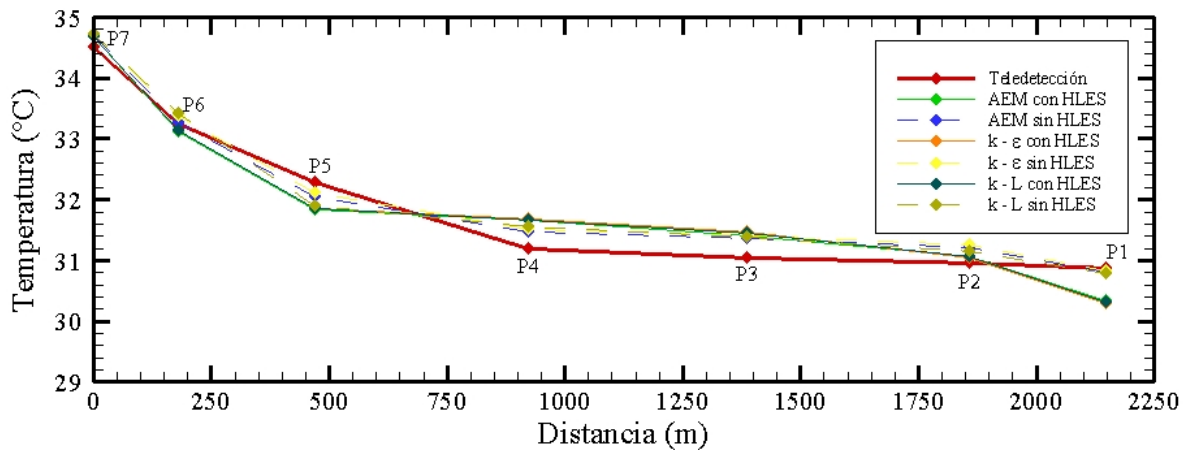


Figura 5.16: Comparativo de temperaturas para la malla 5, escenario de primavera.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

En esta subsección se presentan los campos de temperatura obtenidos para los escenarios de invierno y primavera. Además, para realizar una discusión posterior de los procesos termodinámicos involucrados en el fenómeno de dispersión térmica, se utiliza una serie de números adimensionales que van desde los clásicos encontrados en la literatura de Mecánica de Fluidos hasta algunos propuestos en esta disertación doctoral; todos ellos tienen relación con procesos de transferencia de calor.

5.3.1 Campos de temperatura

Los campos de temperatura obtenidos por medio de las simulaciones numéricas son presentados en esta sección. Primero se presenta el campo de temperatura para el escenario de invierno (malla 3) y posteriormente para el escenario de primavera (mallas 1 - 5). Se muestran las comparativas para los diversos modelos de turbulencia disponibles en Delft3D-FLOW, con y sin el modelo HLES, para analizar las diferencias que produce cada modelo de turbulencia. La Figura 5.17 muestra los campos de temperatura para el escenario de invierno en la malla 3, el cual debe ser comparado con la Figura 4.25(a). En general, los patrones de la temperatura simulada observan buena concordancia con los obtenidos con Teledetección. Las simulaciones numéricas muestran la recirculación térmica hacia la obra de toma, un escenario crítico pues la eficiencia del sistema de enfriamiento puede verse comprometida. Aunque en lo global los campos de temperatura obtenidos con los diversos modelos de turbulencia son similares en todos los casos, en los resultados sin HLES se puede observar, por medio de las isotermas, valores mayores de temperatura en la obra de toma. Esto significa que al activar el modelo HLES, el calor se disipa más rápidamente, comparado con las simulaciones en que HLES no es activado. Otra diferencia que merece atención es el área del núcleo de la pluma térmica, el cual con HLES es menor al que se reproduce sin HLES. En las Figuras 5.18 - 5.22 los campos de temperatura del escenario de primavera son mostrados para las mallas 1 a 5, respectivamente. Del segundo escenario, la mejor precisión de las isotermas se aprecia en la Figura 5.22, la cual resulta ser la idónea para ser comparada con la Figura 4.25(b). En ambos escenarios, el comportamiento de las isotermas es presuntamente similar, pudiéndose decir que el análisis para el escenario de invierno también es cierto para el escenario de primavera. Finalmente, de los campos de temperatura de cada modelo de turbulencia: AEM, $k - \varepsilon$ y $k - L$, no se observan diferencias entre ellos.

5. IMPLEM.DEL DELFT3D A LA ZONA DE ESTUDIO Y ANALISIS DE RESULTADOS

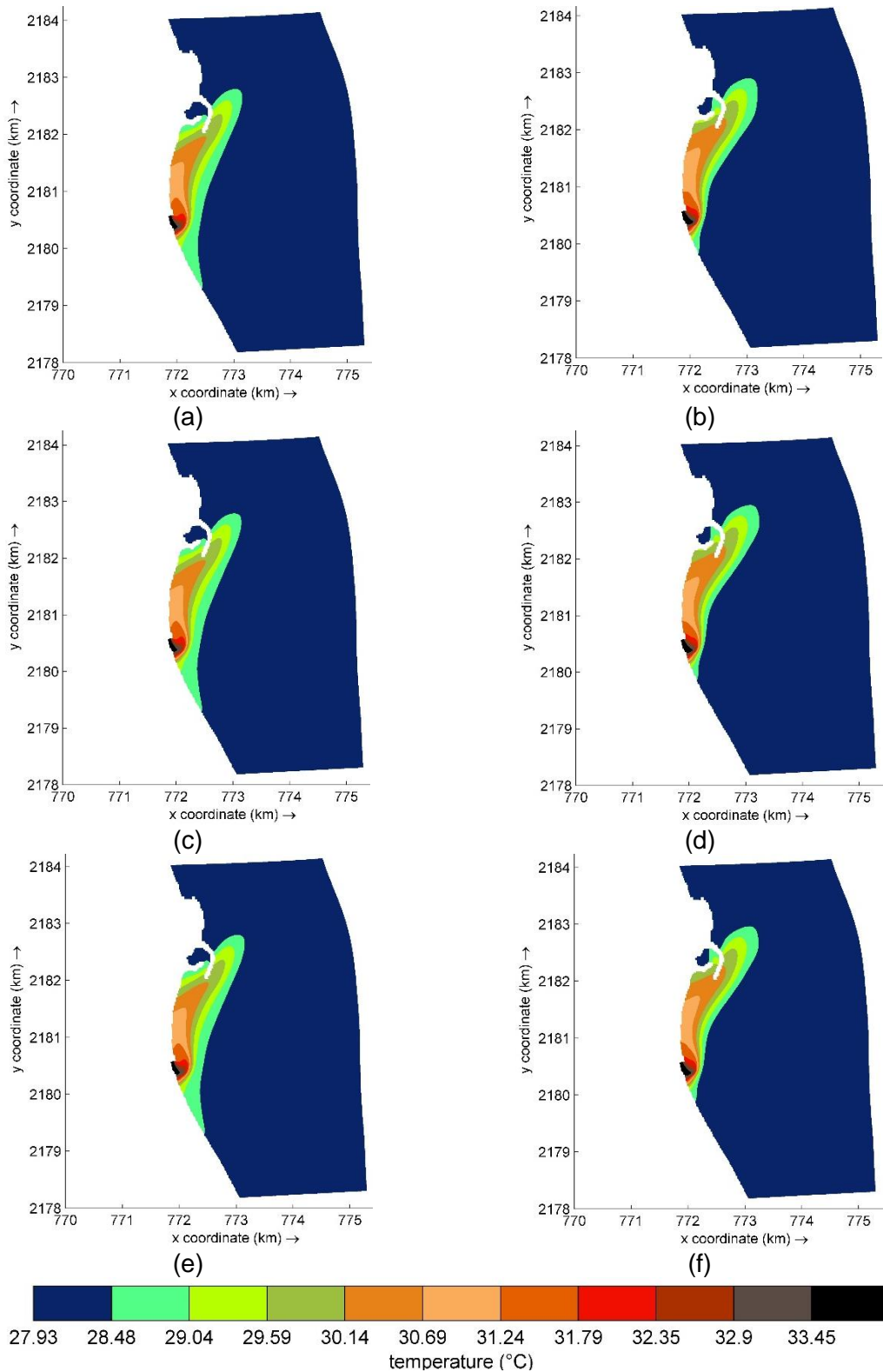


Figura 5.17: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 3, escenario de invierno, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \epsilon$ con HLES; (d) $k - \epsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

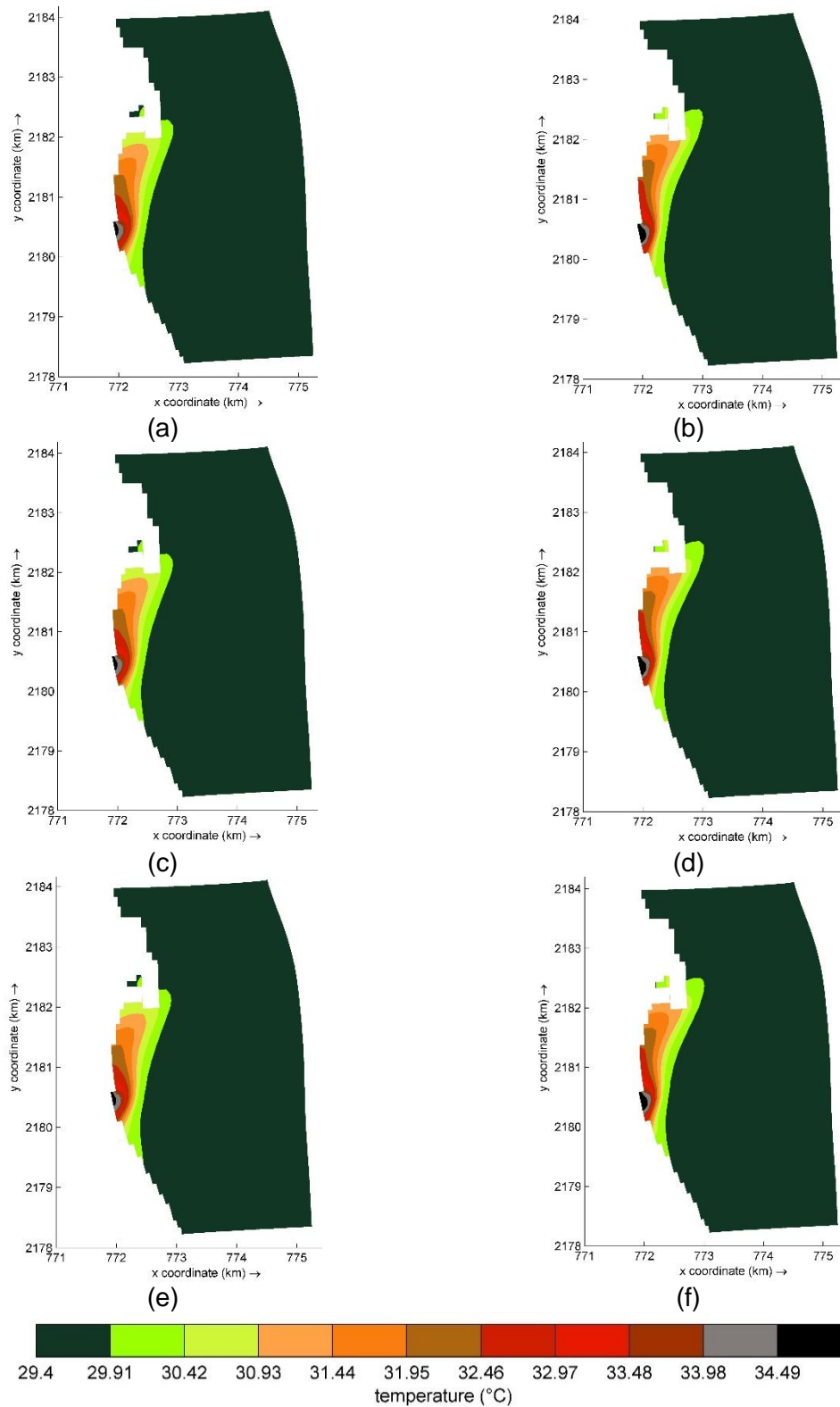


Figura 5.18: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 1, escenario de primavera, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \varepsilon$ con HLES; (d) $k - \varepsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.

5. IMPLEM.DEL DELFT3D A LA ZONA DE ESTUDIO Y ANALISIS DE RESULTADOS

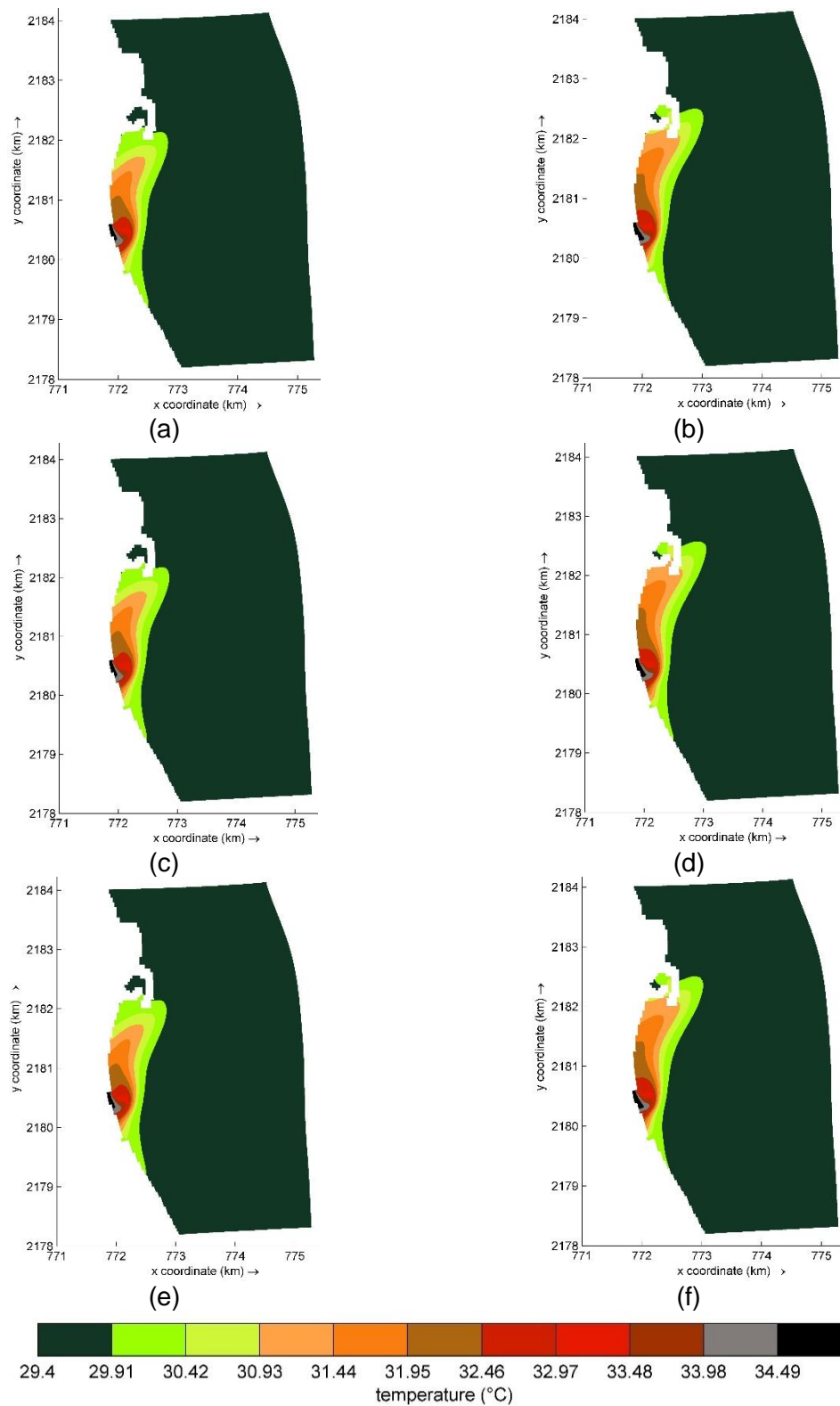


Figura 5.19: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 2, escenario de primavera, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \epsilon$ con HLES; (d) $k - \epsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

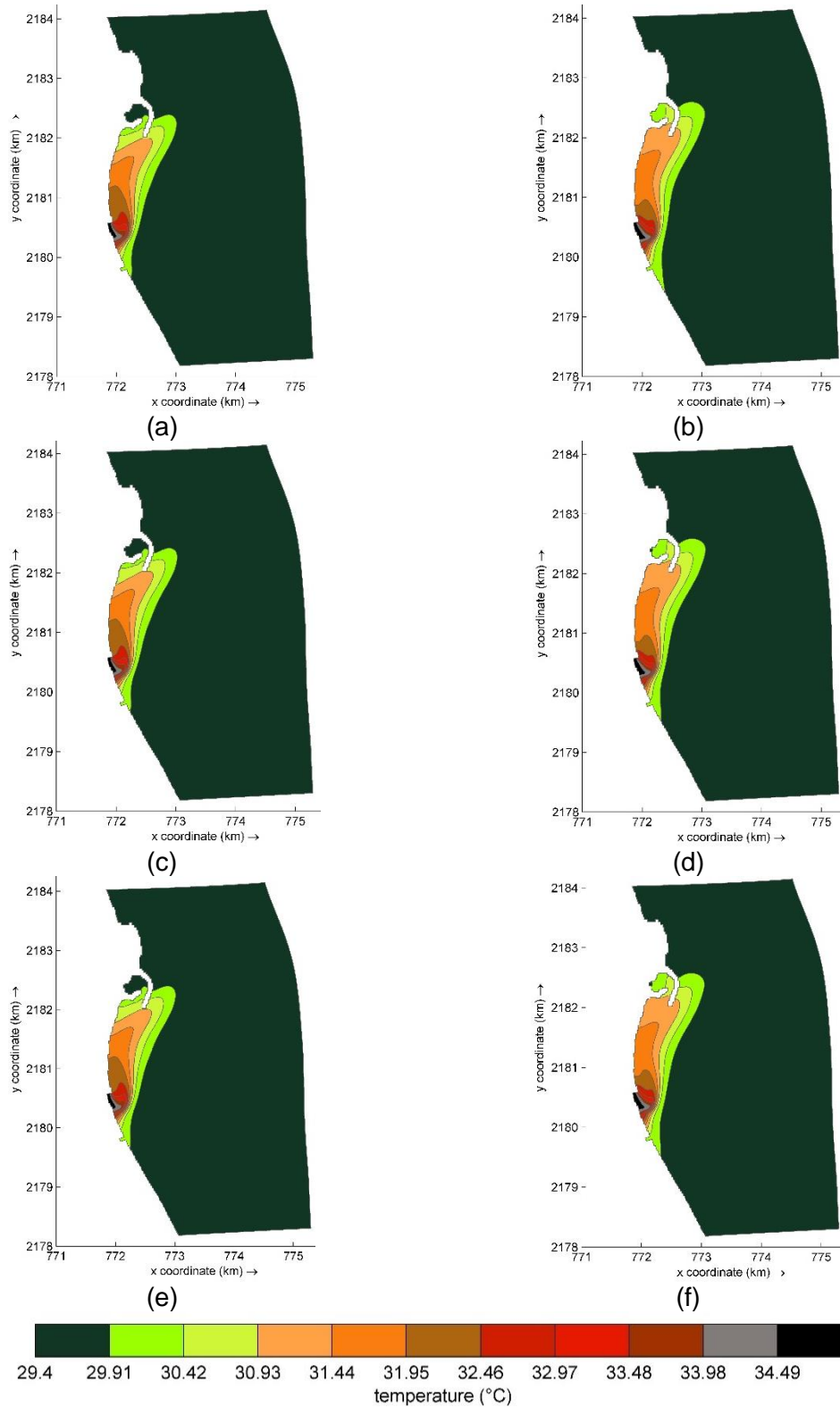


Figura 5.20: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 3, escenario de primavera, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \epsilon$ con HLES; (d) $k - \epsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.

5. IMPLEM.DEL DELFT3D A LA ZONA DE ESTUDIO Y ANALISIS DE RESULTADOS

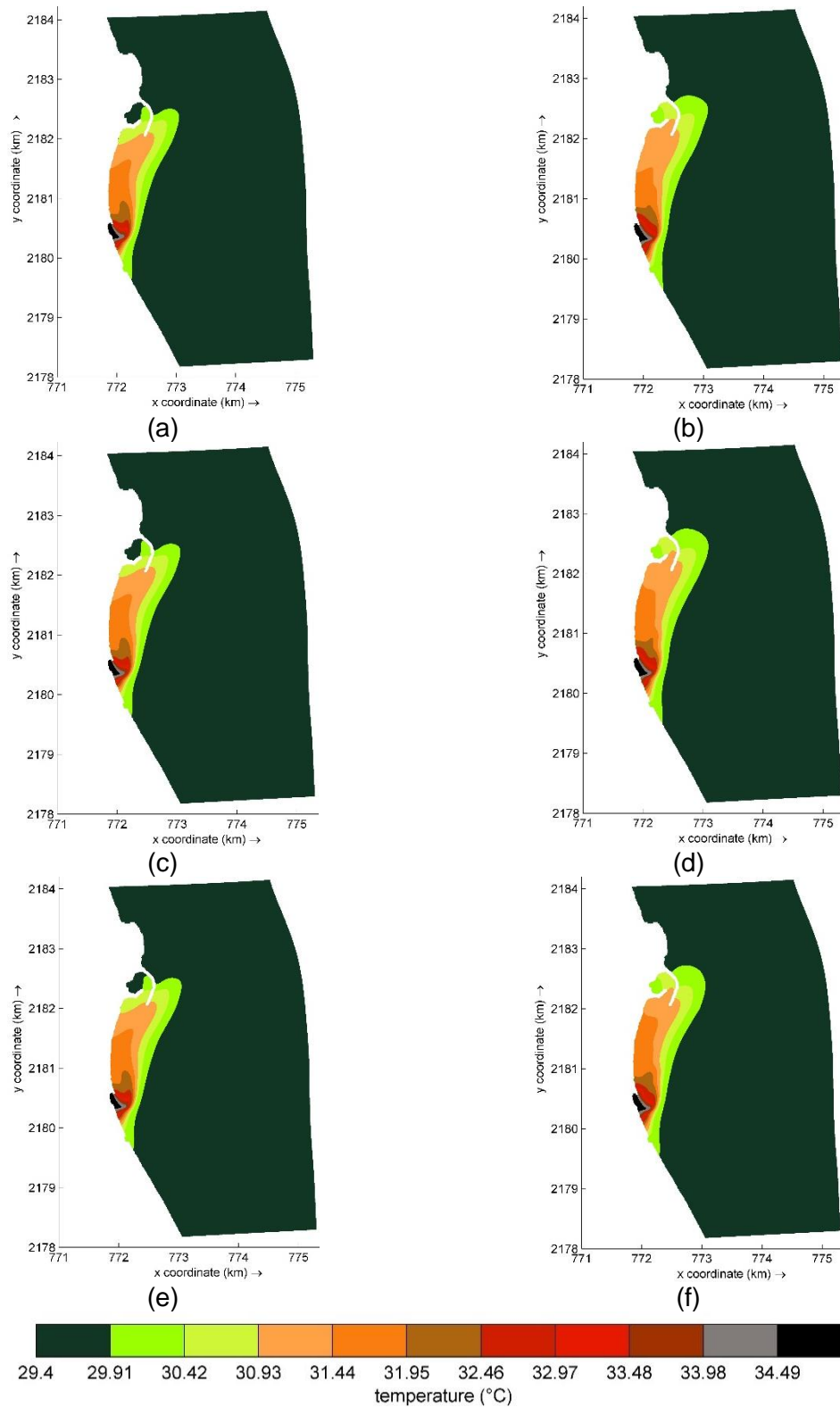


Figura 5.21: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 4, escenario de primavera, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \epsilon$ con HLES; (d) $k - \epsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

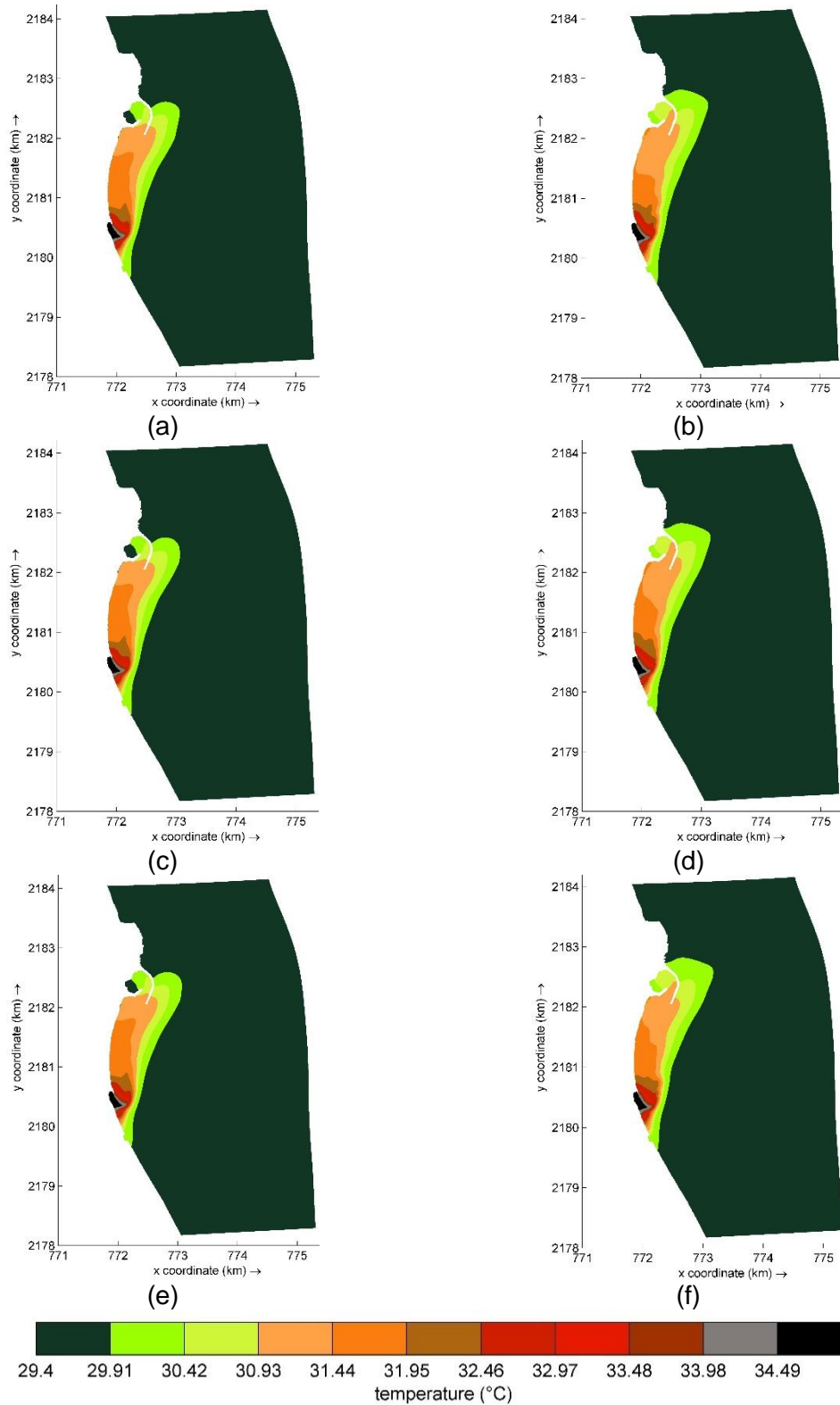


Figura 5.22: Comparativo de campos de temperaturas para la malla 5, escenario de primavera, con diversos modelos de turbulencia: (a) AEM con HLES; (b) AEM sin HLES; (c) $k - \varepsilon$ con HLES; (d) $k - \varepsilon$ sin HLES; (e) $k - L$ con HLES; (f) $k - L$ sin HLES.

5.3.2 Números adimensionales en procesos termodinámicos

Existen números adimensionales que relacionan los efectos de las fuerzas inerciales y viscosas, la convección natural y forzada, la transferencia de calor y la difusión térmica, y finalmente, los efectos de densidad y flotabilidad [104]. En la Tabla 5.11 se presentan los números adimensionales considerados en este trabajo.

Tabla 5.11: Definición de las variables adimensionales

Variable	Formula
Distancia adimensional	$X^* = \frac{X_p}{W_C}$
Velocidad horizontal adimensional	$U^* = \frac{U}{U_{max}}$
Temperatura adimensional	$T^* = \frac{T}{T_{max}}$
Viscosidad turbulenta vertical adimensional	$\nu_t^* = \frac{\nu_{3D}}{\nu_{3Dmax}}$
Energía turbulenta adimensional	$k^* = \frac{k}{k_{max}}$
Tasa de energía de disipación adimensional	$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}}$
Dilución	$S = \frac{T_0 - T_\infty}{T - T_\infty}$
Número de Reynolds	$Re = \frac{UW_D}{\nu_{mol}}$
Número de Froude densimétrico	$F_{rd} = \frac{U}{\sqrt{gW_D \left(\frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} \right)}}$
Número de Grashof	$G_r = \frac{g\beta(T_p - T_\infty)W_D^3}{\nu_{mol}^2}$
Número de Peclet	$Pe = RePr$
Número de Richardson	$Ri = \frac{G_r}{Re^2}$

donde

- W_D es la profundidad del canal de descarga en la salida, (m).
- W_C es el ancho del canal de descarga en la salida, (m).
- β es el coeficiente de expansión volumétrica, (1/°C).
- T_∞ es la temperatura ambiente, fijada en 28°C y 29.4 °C para los escenarios de

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

	invierno y primavera, respectivamente.
T_0	es la temperatura en la salida del canal de descarga, (°C).
P_r	es el numero Prandtl con valor de 0.9.
ρ_0	es la densidad estándar del agua de mar considerada en 1024 kg/m ³ .
X_p	es la distancia de P7 hacia el resto de los puntos monitores, (m),
k_{max}	es la energía turbulenta máxima en los 7 puntos monitores, (m ² /s ²).
ε_{max}	es la disipación de energía turbulenta máxima en los 7 puntos monitores, (m ² /s ³).
$\nu_{3D_{max}}$	es la viscosidad turbulenta vertical máxima en los 7 puntos monitores, (m ² /s).
T_{max}	es la temperatura máxima en los 7 puntos monitores, (°C).
U_{max}	es la velocidad máxima en los 7 puntos monitores, (m/s).

Para el caso del R_i , existe una clasificación para diferenciar los umbrales entre la convección natural, mixta y forzada [105]: Si $R_i \gg 1$, los efectos de la convección natural dominan; Si $R_i \ll 1$ las fuerzas boyantes son despreciables y convección forzada debe considerarse; y cuando $R_i \approx 1$, el flujo se encuentra en un estado de convección mixta.

Una contribución especial de esta investigación es la introducción de una cantidad adimensional, la cual fue nombrada Factor de densidad y está definida como [34]:

$$F_{D(T)} = F_{rd}^2 R_i = \beta \rho_0 \frac{\Delta T}{\Delta \rho} \quad (5.4)$$

Dicho factor se espera que sirva como alternativa para determinar el modo que domina la transferencia de calor en la dispersión de la pluma térmica, ya sea convección forzada, natural o mixta sobre los puntos monitores. El Factor $F_{D(T)}$ es una métrica de las variaciones de densidad porque refleja el sesgo de densidad adimensional debido a una dilatación lineal con respecto a la densidad de referencia ρ_0 . En los casos como los analizados en este trabajo, donde las variaciones de densidad debidas a la temperatura (dilatación) son pequeños, esta métrica permite representar tales variaciones en ordenes de variación cercanas a la unidad. Así, es posible observar si la convección forzada domina sobre la natural (o viceversa) en los procesos térmicos.

5.3.3 Interpolación pesada

En Delft3D-FLOW los diversos parámetros se calculan al centro de celda. Esto origina una discrepancia geográfica entre las mallas, pues el centro de celda en cada malla puede no coincidir con la ubicación exacta del punto monitor. Para solventar lo anterior, se procedió a efectuar interpolación pesada a fin de que los resultados obtenidos con cada malla coincidan en ubicación con el de los puntos monitores. En la Figura 5.23 se muestra el esquema de interpolación para vincular el valor de 4 puntos que en este caso son A, B, C y D y con ello obtener el valor ponderado en el punto de interés, P. Esta interpolación tiene la particularidad de dar más influencia (peso) a las celdas más cercanas al punto de interés y menor a las celdas más lejanas.

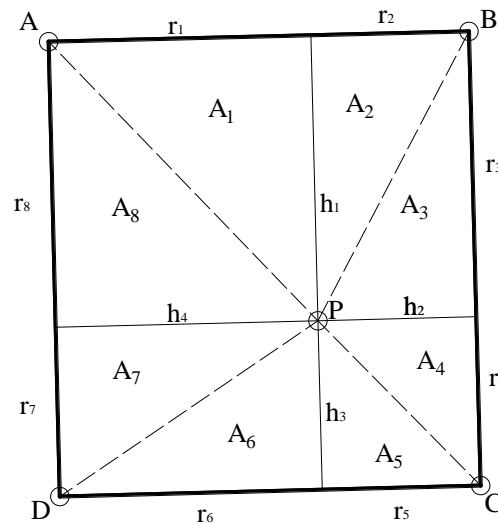


Figura 5.23: Esquema utilizado en la interpolación pesada.

El algoritmo para obtener el valor ponderado se describe a continuación:

- i. Se conocen los valores y las coordenadas de los puntos A, B C y D; además de la coordenada del punto P.
- ii. Formar segmentos de recta entre cada punto, es decir, la recta AB, BC, CD y DA. Además, es necesaria la longitud cada recta formada. Se utiliza, de la geometría analítica, la ecuación de distancia entre puntos.
- iii. Del punto P se trazan rectas perpendiculares hacia las rectas AB, BC, CD y DA, formando rectas nuevas que se les denomina h_1 , h_2 , h_3 y h_4 .
- iv. Construir los triángulos: $\Delta_1 = A_1+A_2$, $\Delta_2 = A_3+A_4$, $\Delta_3 = A_5+A_6$ y $\Delta_4 = A_7+A_8$.
- v. Obtener las áreas de los cuatro triángulos formados, con la ecuación del determinante:

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

$$A_{\Delta} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_p & y_p & 1 \end{vmatrix} \quad (5.3)$$

con (x_1, y_1) las coordenadas de un punto, (x_2, y_2) las coordenadas de otro punto y (x_p, y_p) las coordenadas del punto P.

- vi. Conociendo el área de cada triángulo, obtener la altura h de cada triángulo, puede despejarse de la fórmula clásica para obtener áreas de triángulos: $A = \frac{1}{2}bh$.
- vii. Se procede a obtener la distancia r , sustrayendo la distancia total de la base del triángulo con la altura h correspondiente. Por ejemplo: $r_1 = AB - h_2$.
- viii. Obtener el área individual de cada triángulo. Por ejemplo: $A_1 = \frac{1}{2}r_1h_1$.
- ix. Formar las áreas rectangulares: $A_I = A_1 + A_8$, $A_{II} = A_2 + A_3$, $A_{III} = A_4 + A_5$ y $A_{IV} = A_6 + A_7$. Consecuentemente, el área total será: $A_T = A_I + A_{II} + A_{III} + A_{IV}$.
- x. Finalmente, el valor ponderado se obtiene con la siguiente fórmula de interpolación pesada:

$$V_P = \frac{V_A A_I + V_B A_{II} + V_C A_{III} + V_D A_{IV}}{A_T} \quad (5.3)$$

5.3.4 Análisis por escenarios

Los resultados numéricos obtenidos y el análisis termodinámico basado en números adimensionales se presentan en esta subsección. Primero, se presenta el escenario de primavera mostrando cada número adimensional obtenido con cada una de las 5 mallas, a fin de observar la mejora de precisión numérica y detallar diferencias entre los modelos de turbulencia. Asimismo, se hace el análisis termodinámico con los resultados de la malla 3. Posteriormente, se mostrarán los resultados del escenario de invierno y su correspondiente análisis.

5.3.4.1 Escenario de primavera

En las Figuras 5.24 a 5.36 se muestra la evolución e impacto de la pluma térmica al analizar en los puntos monitores los números adimensionales definidos en la Tabla 5.11. En lo general, los valores de los modelos con HLES son mayores que aquellos sin HLES debido a que una viscosidad turbulenta adicional es introducida por ν_{SGS} .

La variación de R_e vs X^* es mostrada en la Figura 5.24, donde se puede apreciar que las fuerzas inerciales predominan sobre las viscosas. Es importante señalar que del P7 al P6, los mayores valores de R_e son observados; esto es esperado, dado que las mayores velocidades se encuentran cerca de la salida del canal de descarga.

La Figura 5.25 muestra la evolución de Fr_d vs X^* en la que se observa que cerca de la descarga y hasta el P5, las fuerzas inerciales predominan sobre las de flotabilidad. Después del P5, un equilibrio es observado entre estas dos fuerzas, con una ligera predominancia por la flotabilidad sobre las inerciales, dado que los valores de Fr_d son menores a la unidad.

En la Figura 5.26 la variación de G_r vs X^* es presentada. Los mayores gradientes de temperatura se encuentran entre los P7 - P6 y, como es esperado, los mayores valores de G_r se observan en dichos puntos. Del P6 al P1, G_r se reduce suavemente a medida que la pluma térmica se acerca a la obra de toma. En general, las fuerzas de flotabilidad tienden a dominar a las viscosas.

La variación de P_e vs X^* es presentada en la Figura 5.27. Entre P7 y P6, una predominancia de las fuerzas convectivas sobre la difusivas se aprecia, debido a la cantidad de movimiento introducida por el flujo térmico proveniente del canal de descarga. A pesar de que el valor de P_e disminuye considerablemente en el resto de los puntos, el

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

proceso permanece dominado por las fuerzas convectivas dado que las fuerzas difusivas no son lo suficientemente fuertes para contrarrestarlas.

La Figura 5.28 ilustra la relación entre Fr_d vs T^* . Entre los puntos P7 y P5, las fuerzas inerciales predominan por sobre las de flotabilidad. Del P5 al P1, se observa un incremento en las fuerzas de flotabilidad, lo que tiende a contrarrestar a las fuerzas inerciales, dado que las curvas se acercan al valor de $Fr_d = 1$.

La Figura 5.29 presenta la gráfica de S vs X^* la cual representa la dilución de la temperatura. Debido a que en la zona cercana al canal de descarga (P7 a P5) la cantidad de movimiento es la mayor que se observa, la dilución en estos puntos es menor comparada con el resto de los puntos monitores. En general, los resultados son similares tanto con HLES como sin HLES a excepción del P1, donde se aprecia variación. Luego entonces hay mayor dilución activando HLES, que corresponde a que también en el P1 hay mayor disipación del calor al activarse HLES, como se aprecia en la Figura 5.21.

La variación de U^* vs X^* se muestra en la Figura 5.30. Como es de esperarse, las mayores velocidades se presentan entre los puntos P7 y P6 llegando a su menor valor en P5. Después, éstas tienden a incrementarse gradualmente en dirección a la obra de toma. En los puntos P7 y P6, el transporte térmico es dominado por procesos advectivos derivados de la cantidad de movimiento introducida por la descarga mientras que entre los puntos P5 y P1 los procesos difusivos dominan, los cuales describen el transporte de la pluma térmica debido a la fuerza inducida por el viento y la inercia de las corrientes marinas costeras.

Las Figuras 5.31, 5.32 y 5.33 muestran parámetros adimensionales de turbulencia. En todas ellas se presentan resultados con el modelo $k - \varepsilon$ pues calcula los parámetros de turbulencia con ecuaciones de transporte. También se incluyen resultados para el modelo $k - L$, en el cual k es calculada con una ecuación de transporte, sin embargo, tanto ε como v_{3D} se calculan con la relación semi-empírica de Prandtl-Kolmogorov, ecuación (3.49), mostrando distintos comportamientos de los resultados obtenidos con el modelo $k - L$ con respecto a los encontrados con el modelo $k - \varepsilon$. Las variables turbulentas del modelo AEM no se incluyen dado que este modelo ni siquiera estima el transporte de energía cinética. En estas últimas 3 Figuras, entre los puntos P7 y P6, el decremento de los parámetros de turbulencia es dominado por la cantidad de movimiento inducida por el flujo del canal de descarga. Es en esta área en que la energía cinética turbulenta y,

consecuentemente su disipación, presentan sus valores más altos. Entre los puntos P6 y P1, la evolución de los parámetros de turbulencia es dominada por procesos difusivos inducidos por la velocidad y la temperatura en el campo lejano. Además, se observan diferencias entre los resultados obtenidos con y sin HLES de la misma manera que con el flujo medio.

La Figura 5.34 muestra la dinámica de los tipos de convección con la gráfica de R_i vs X^* . Utilizando el criterio de [106], se observa que debido a la influencia de la descarga en P7, $R_i < 1$ pero no es de ordenes de magnitud más pequeño como para decir que hay dominancia de la convección forzada sobre la natural. Entre P6 y P4, $R_i > 1$ aunque de nuevo, no es lo suficientemente grande como para deducir que la convección natural domina sobre la forzada. Debido a la influencia de la obra de toma, los valores de R_i tienden a ser ligeramente menores a 1 en los puntos P4 a P1; sin embargo, es difícil precisar que en esa zona hay dominancia de la convección forzada. Por tanto, se puede inferir que en todos los puntos monitores existe un régimen de convección mixta.

La Figura 5.35 muestra el comportamiento de $F_{D(T)}$ vs U^* . Esta figura trata de ilustrar los límites de la convección forzada y natural. De P7 a P6, $F_{D(T)}$ depende de la variación de la velocidad, esto significa que los gradientes de $F_{D(T)}$ sobre los gradientes de velocidad tienen valores que tienden a 1. En esta región se infiere que domina la convección forzada. De P5 a P1, el comportamiento es distinto, ya que el proceso es independiente de la velocidad, implicando que la relación de gradientes de $F_{D(T)}$ y U^* dará valores de ordenes de magnitud menores a 1. Así, esta región es dominada por la convección mixta.

La Figura 5.36 relaciona $F_{D(T)}$ y T^* , mostrando un comportamiento casi lineal. Se observa que a medida que T^* disminuye de P7 a P1, $F_{D(T)}$ también disminuye, esto significa que, si la temperatura disminuye, el sesgo de densidad disminuye. Finalmente, existe concordancia en el comportamiento del $F_{D(T)}$ con el estado termodinámico del sistema.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

Número de Reynolds

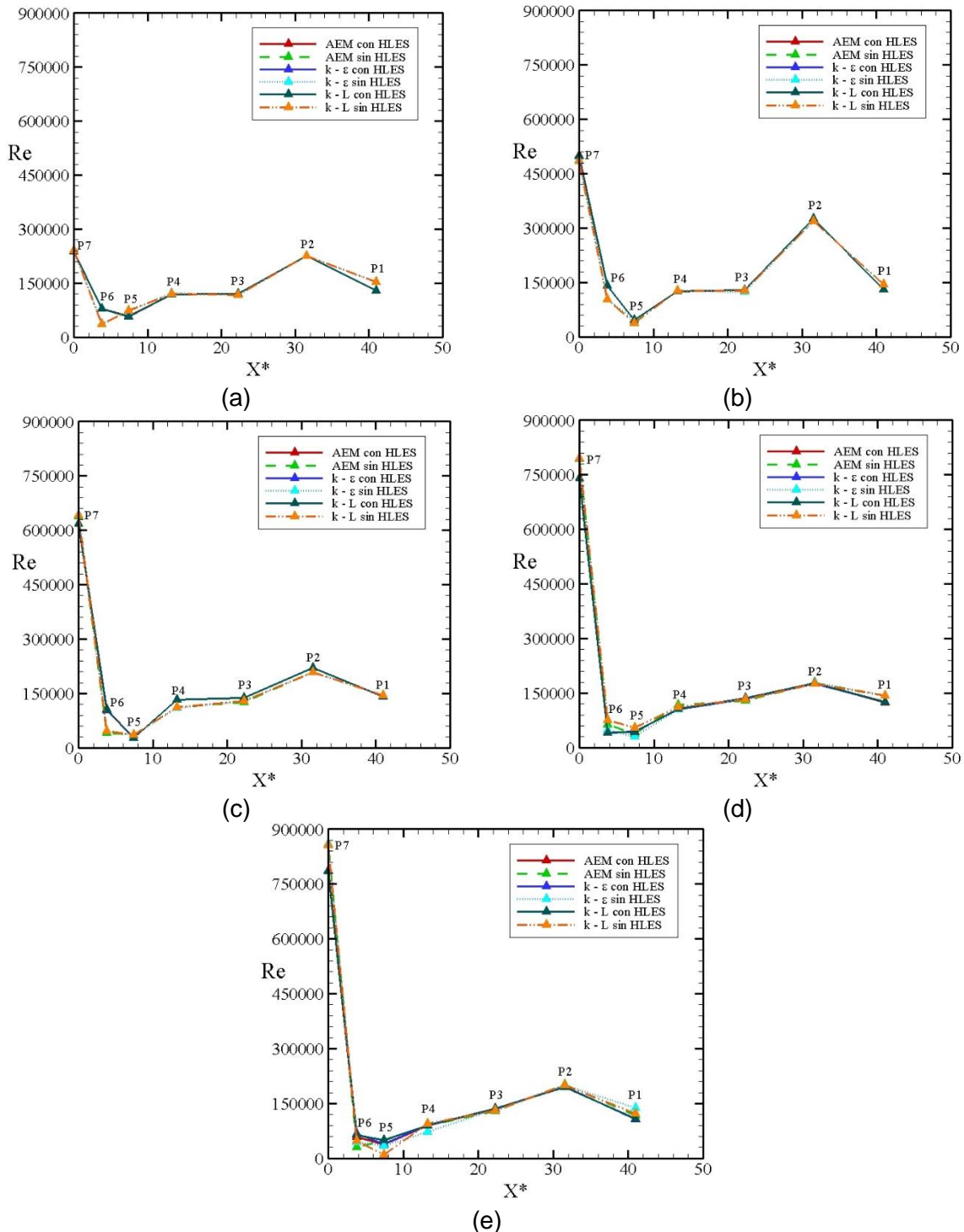


Figura 5.24: Re vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

Número de Froude

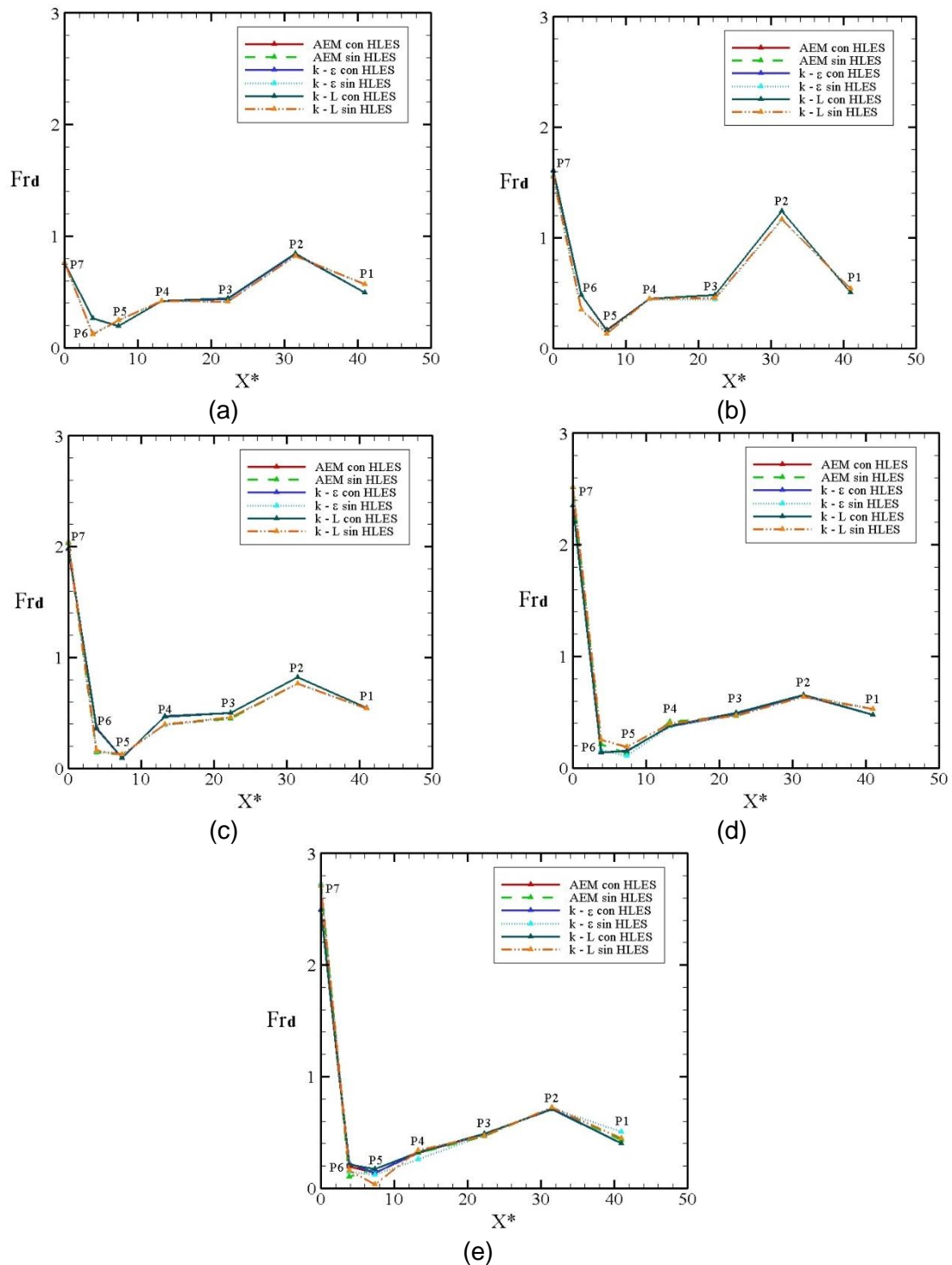


Figura 5.25: Fr_d vs X* para el escenario de primavera:
 (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

Número de Grashof

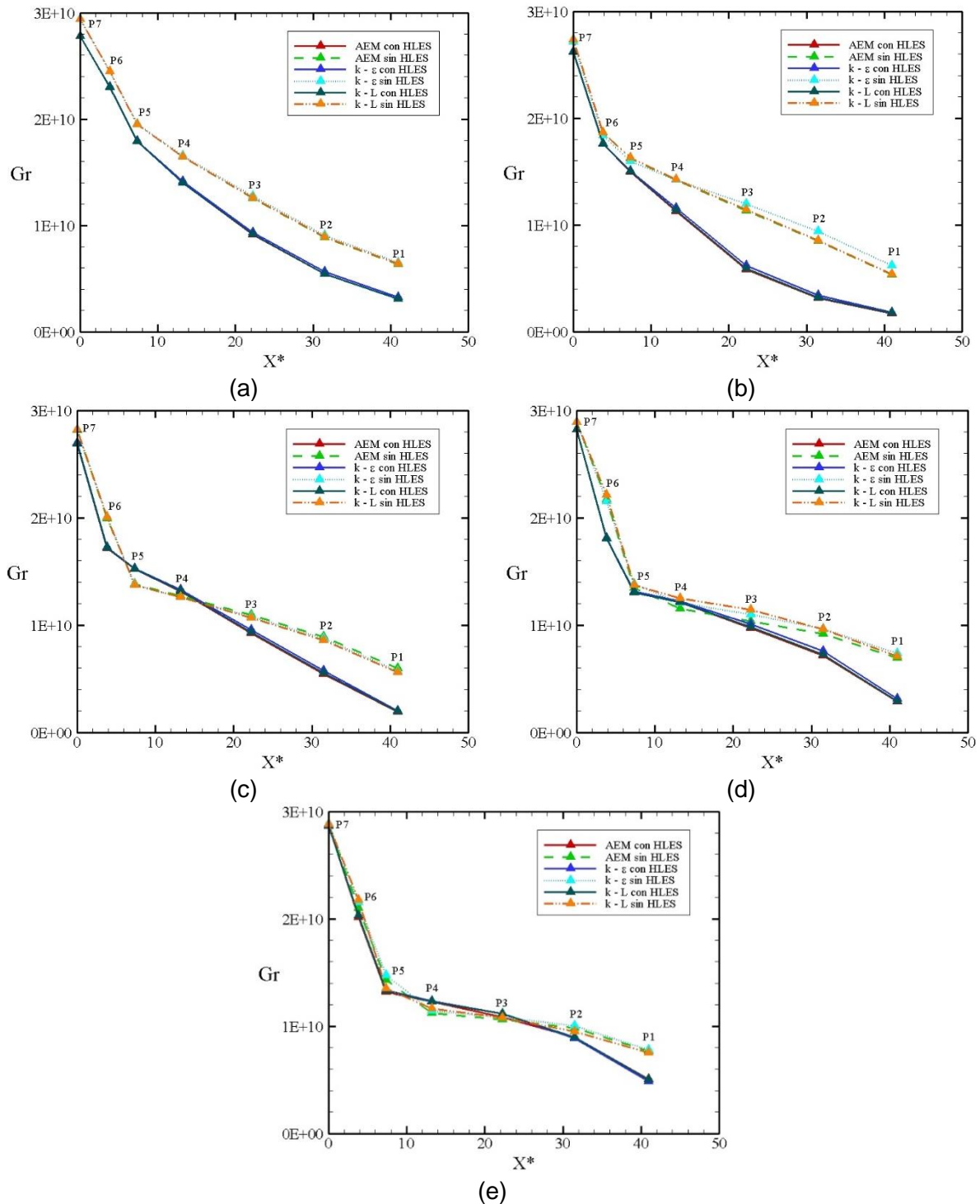


Figura 5. 26: Gr vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

Número de Peclet

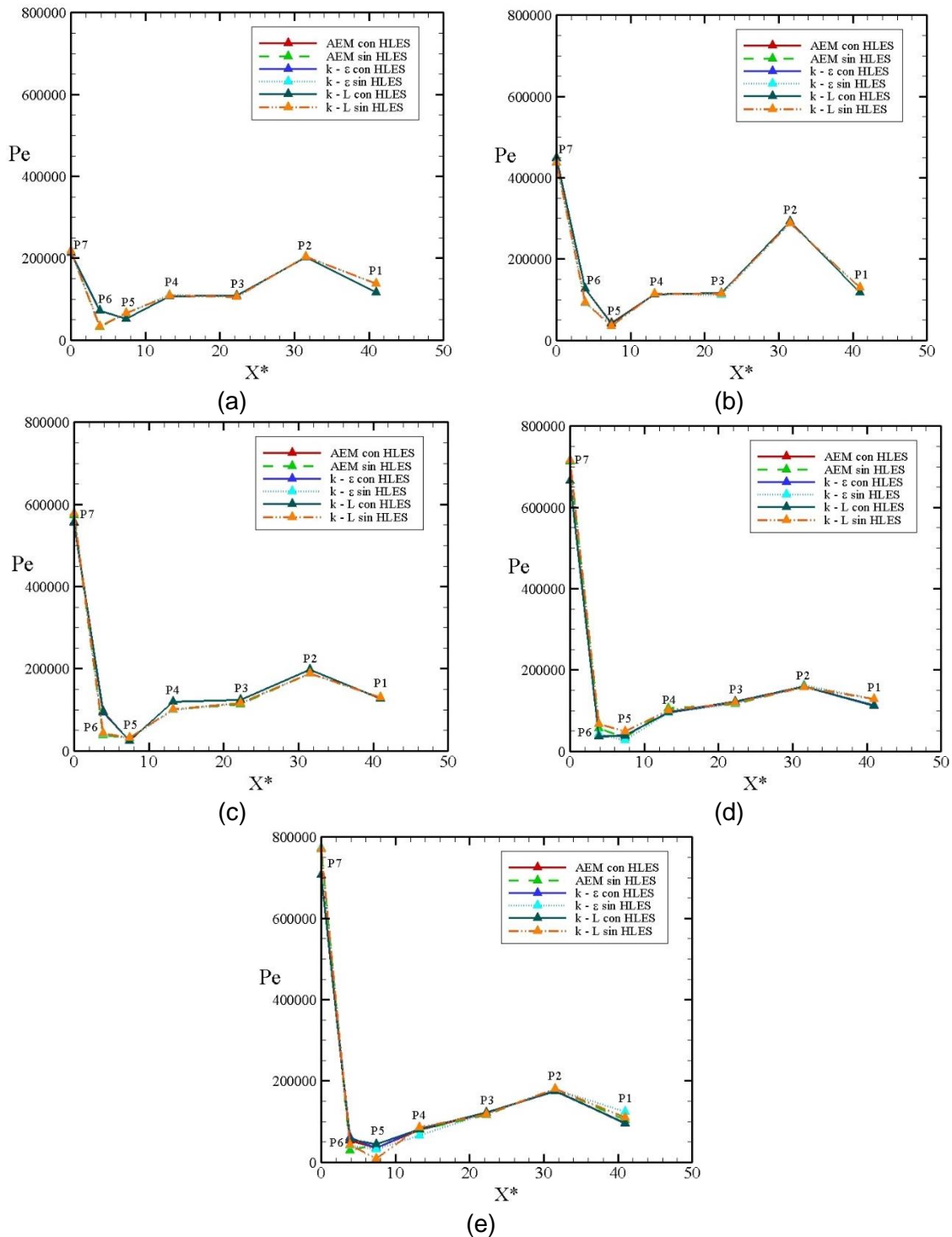


Figura 5. 27: P_e vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

Fr_d vs T^*

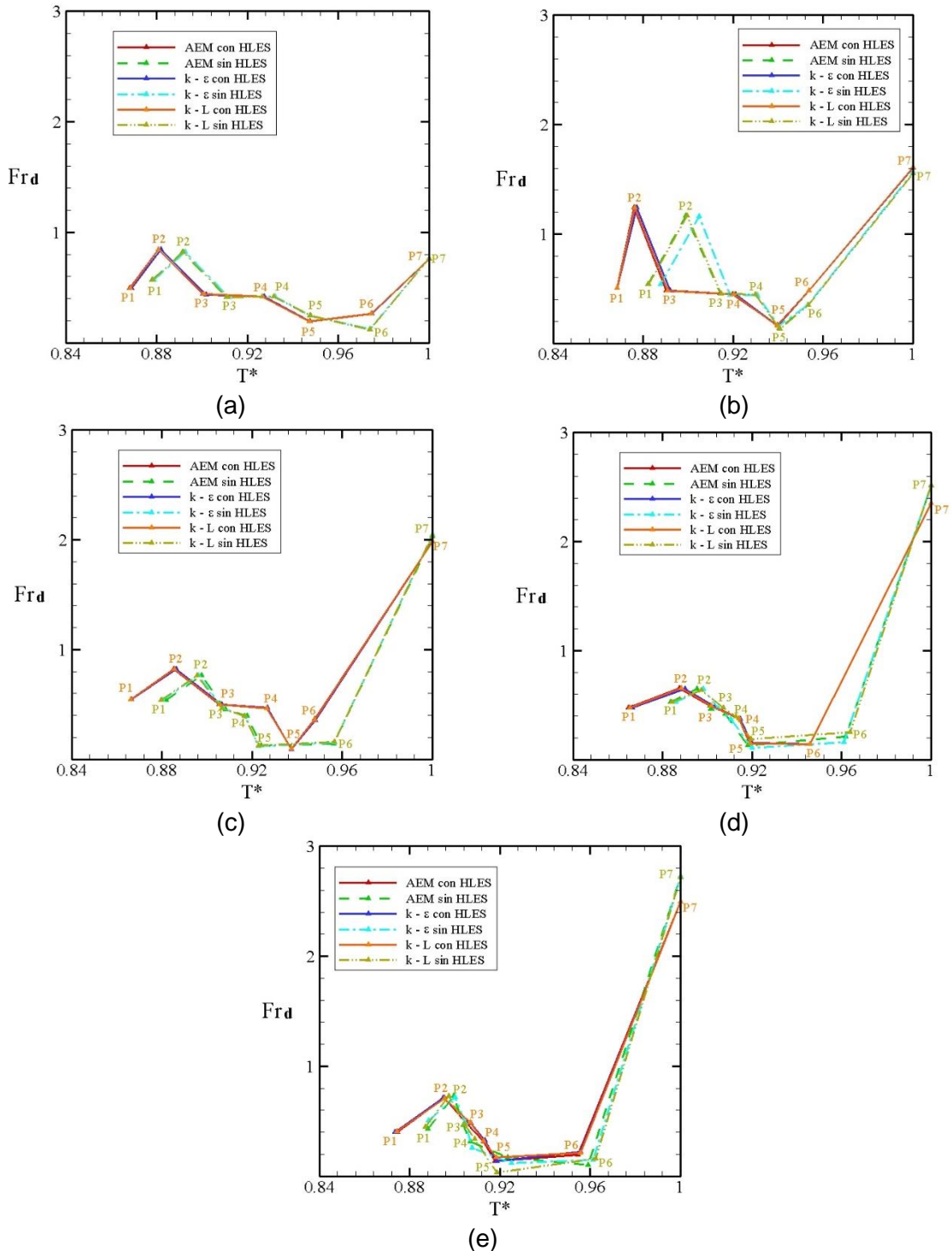


Figura 5.28: Fr_d vs T^* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

Dilución S vs X*

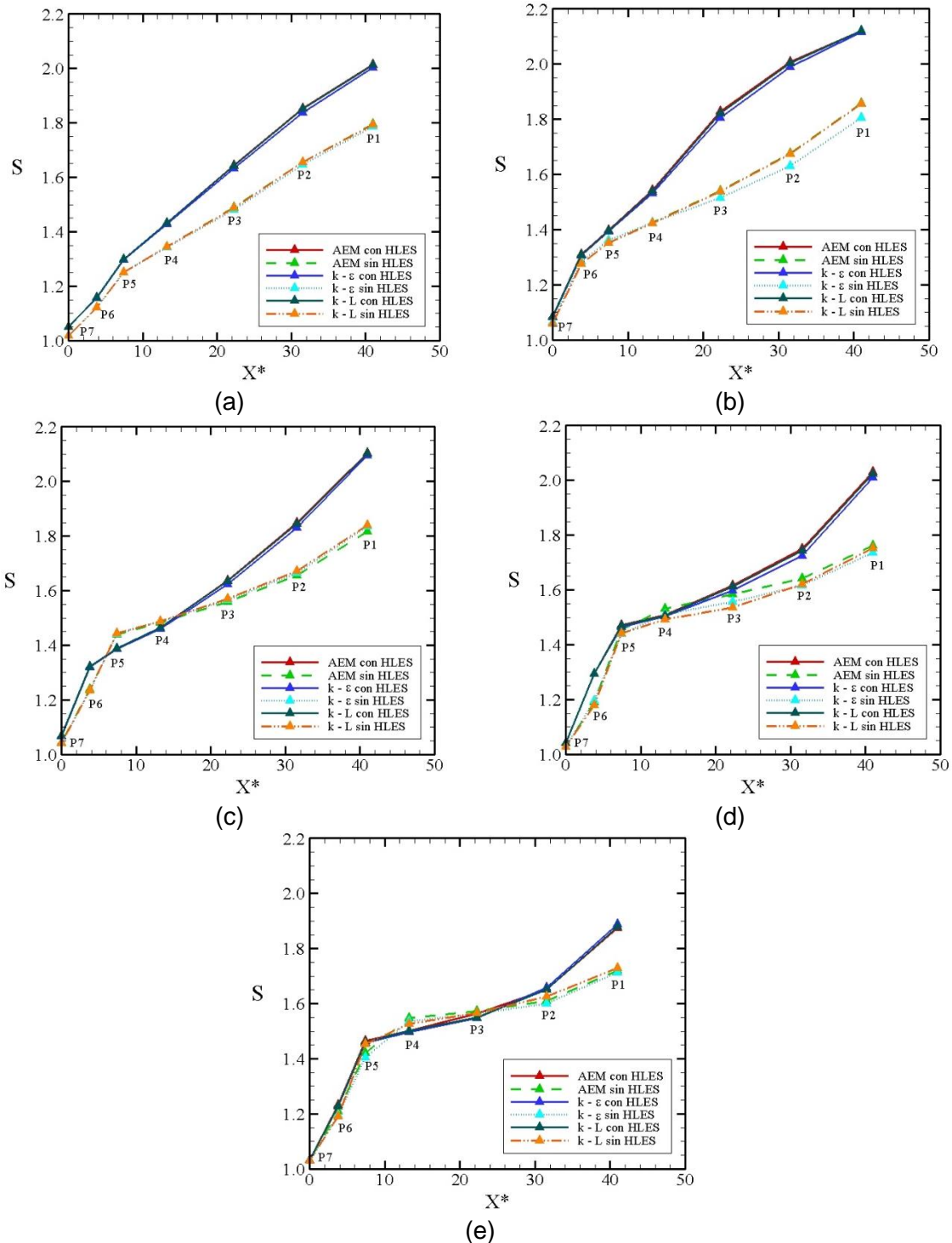


Figura 5.29: S vs X* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

U^* vs X^*

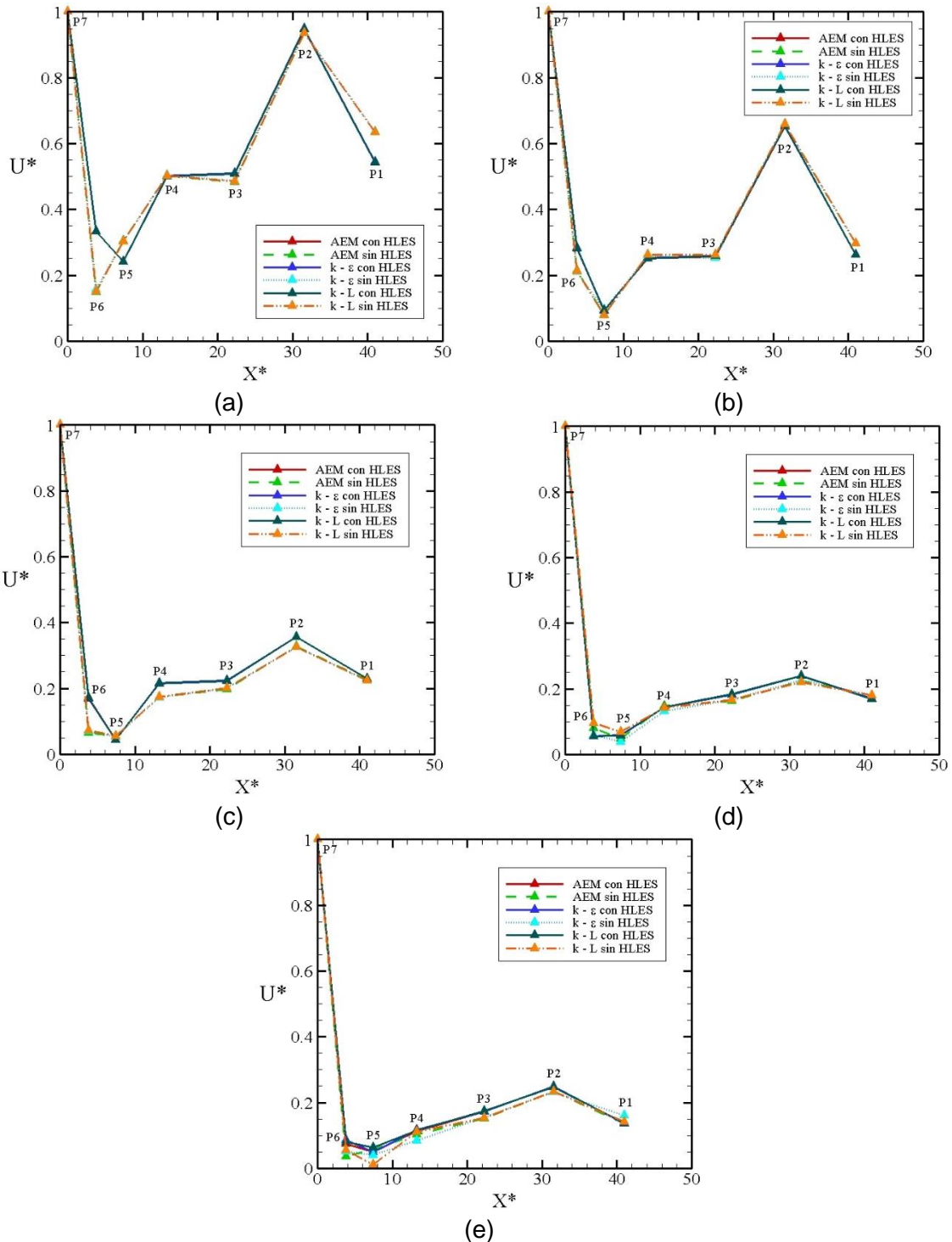


Figura 5.30: U^* vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

v_t^* vs X^*

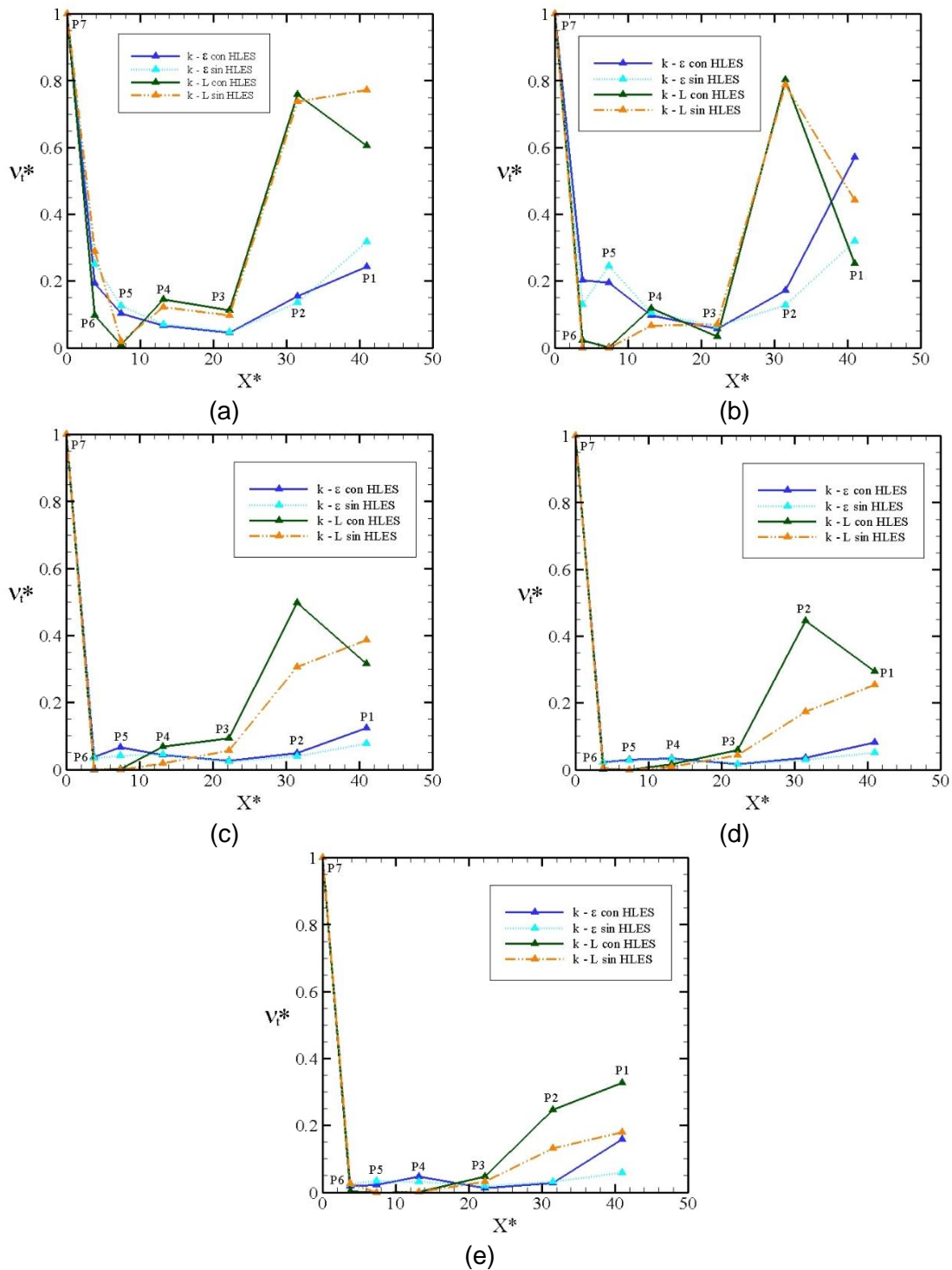


Figura 5.31: v_t^* vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

k^* vs X^*

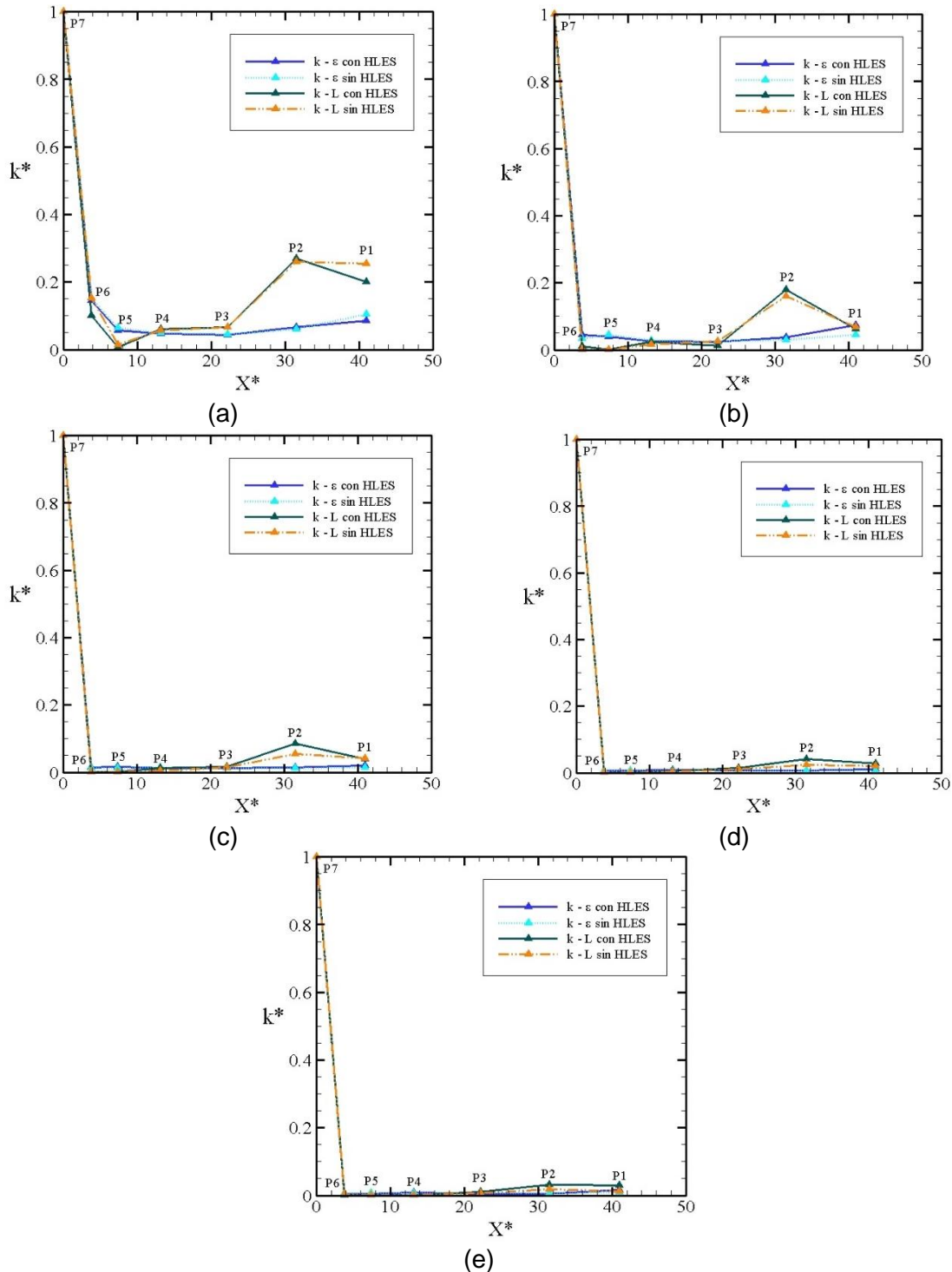


Figura 5.32: k^* vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

5. IMPLEM.DEL DELFT3D A LA ZONA DE ESTUDIO Y ANALISIS DE RESULTADOS

ε^* vs X^*

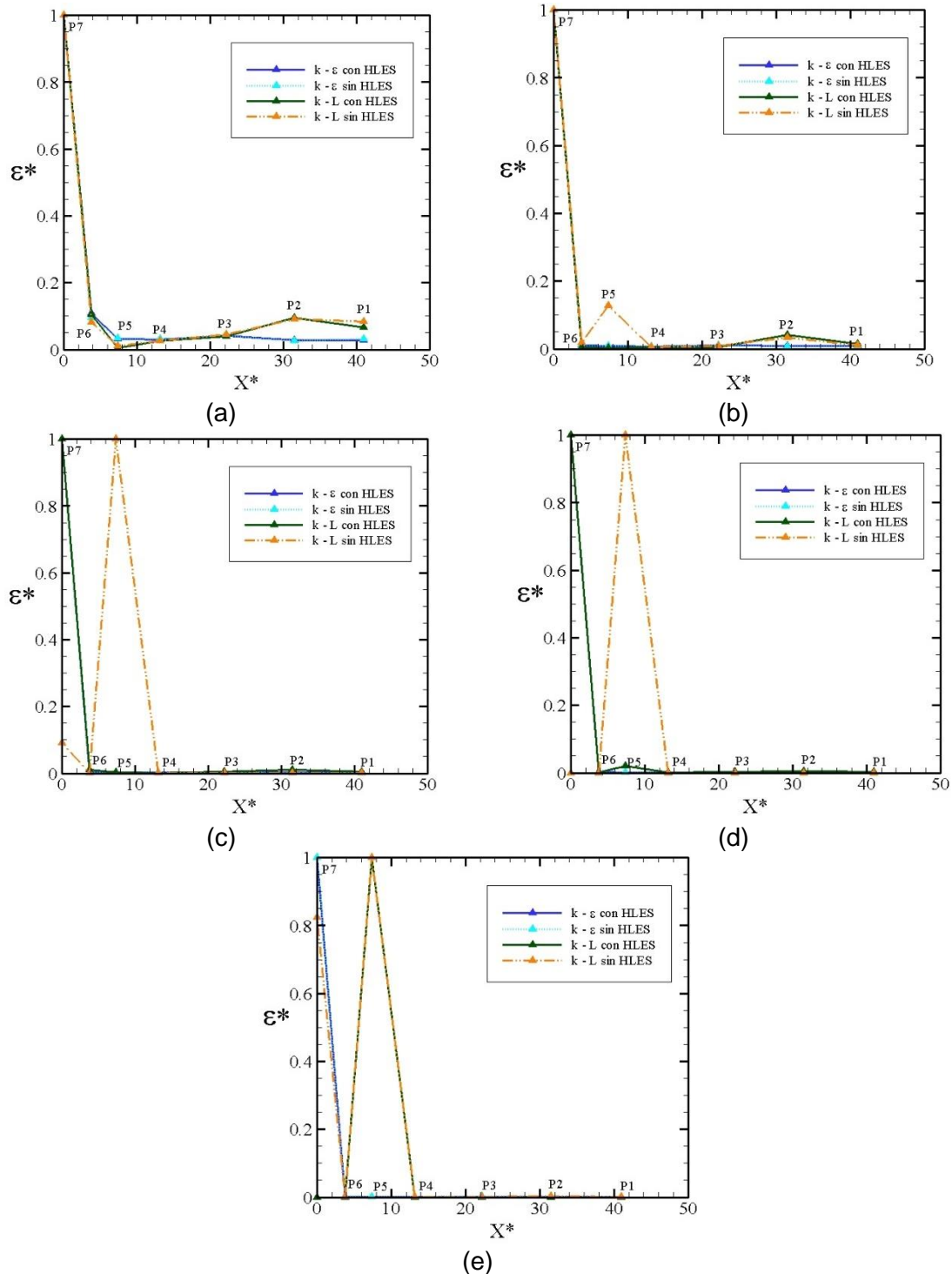


Figura 5.33: ε^* vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

R_i vs X^*

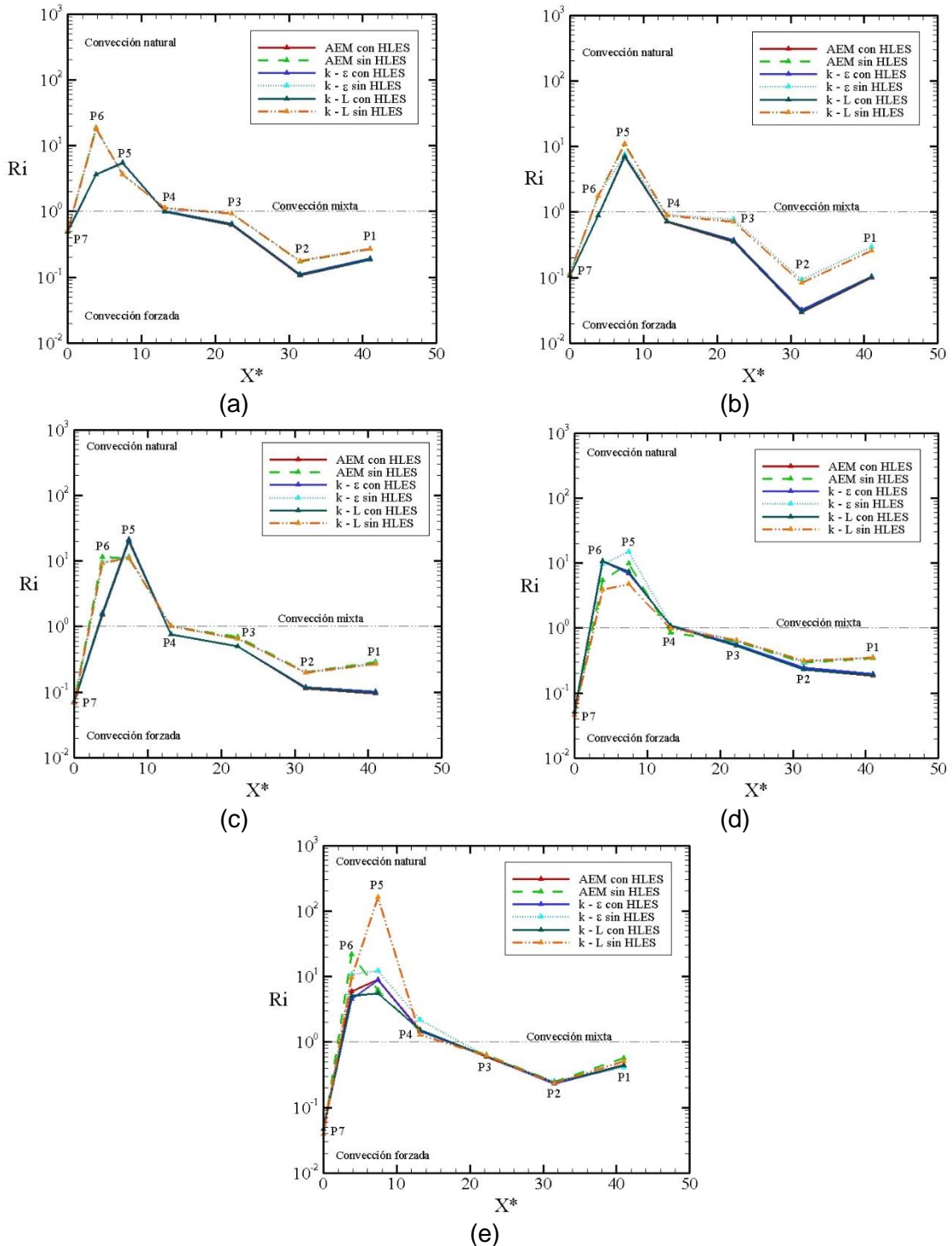


Figura 5.34: R_i vs X^* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

$F_{D(T)}$ vs U^*

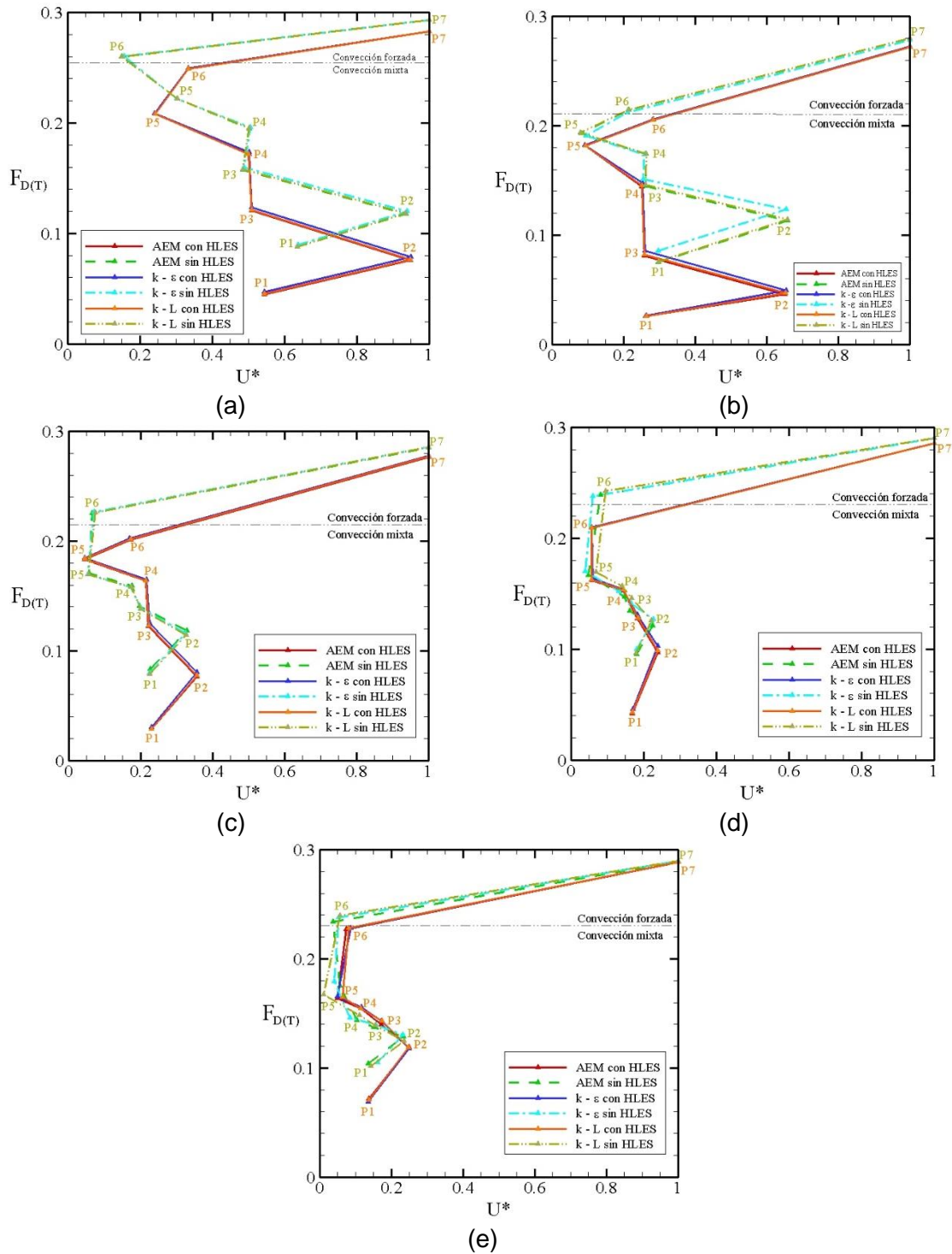


Figura 5.35: $F_{D(T)}$ vs U^* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

$F_{D(T)}$ vs T^*

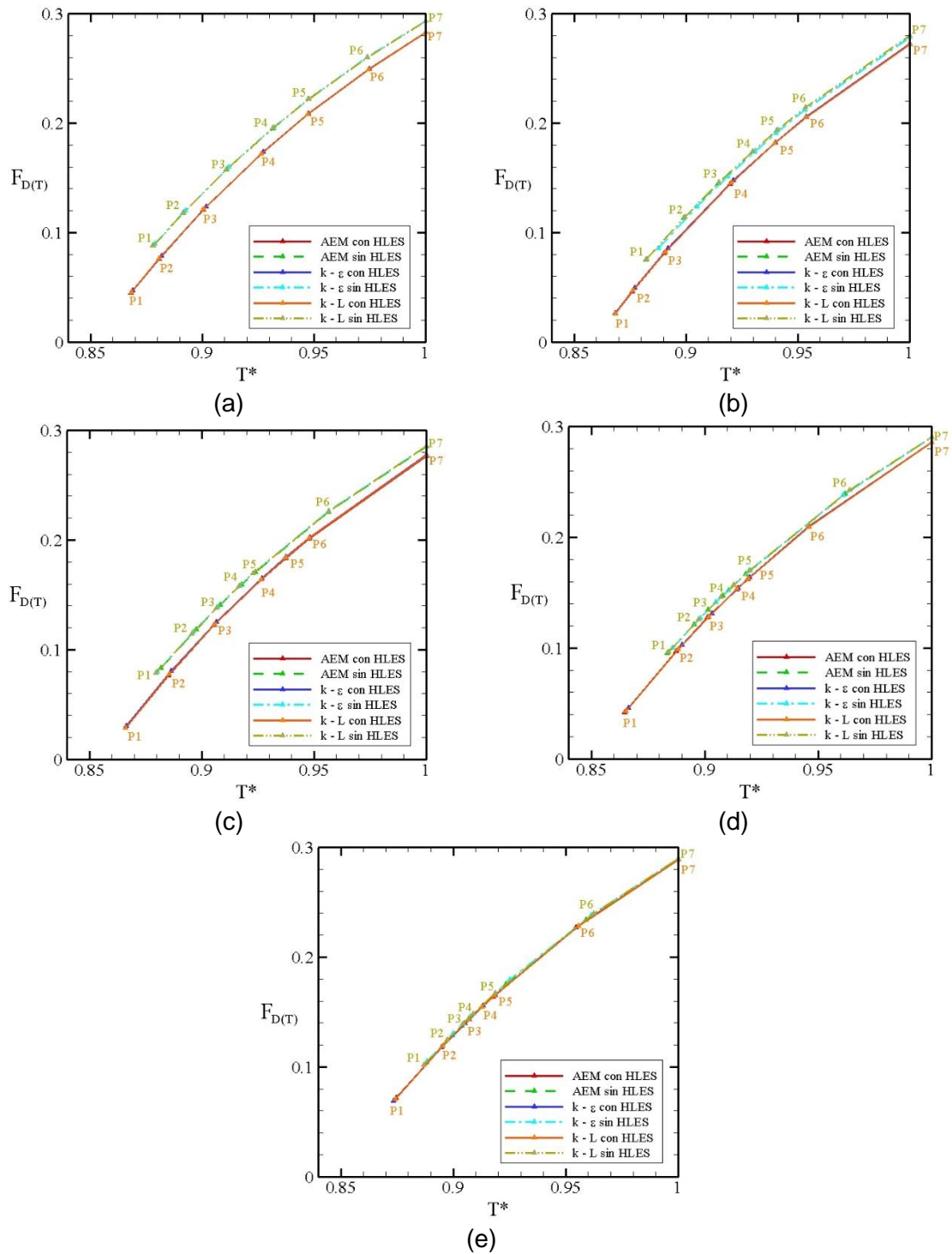


Figura 5.36: $F_{D(T)}$ vs T^* para el escenario de primavera: (a) Malla 1; (b) Malla 2; (c) Malla 3; (d) Malla 4; (e) Malla 5.

5.3.4.2 Escenario de invierno

Similar al escenario de primavera, se presentan los resultados para el escenario de invierno solamente para la malla 3, pues como ya se evidenció con el escenario de primavera, la precisión numérica mejora ligeramente a partir de la malla 4. Estos resultados se presentan en las Figuras 5.37, 5.38 y 5.39. En general, el mismo análisis del escenario de primavera puede considerarse como cierto y valido para este escenario de invierno, pues en todos los números adimensionales se observan comportamientos similares entre ambos escenarios.

Las diferencias que resaltan entre los escenarios son las siguientes:

- De P7 a P6, casi todos los números adimensionales muestran valores ligeramente mayores en primavera. Esto es de esperarse, pues la temperatura en primavera es mayor que en invierno. La excepción a esto es con G_r , donde en invierno presenta un valor mayor (Figura 5.37(c)). Esto se explica debido a que la diferencia de temperaturas entre el flujo a la salida del canal de descarga y la zona costera es mayor en invierno que en primavera.
- Mayores valores de la dilución S se observan en invierno (Figura 5.37(f)), sobre todo de P2 a P1. Nuevamente, esto es de esperarse, pues la disolución depende de las diferencias de temperatura y en este caso dicha diferencia (en el denominador de la ecuación) es más pequeña que en primavera para el P1 entre la zona costera y la simulada en este punto.
- En la Figura 5.38(b), referente a v_t^* vs X^* en el escenario de invierno, se observan diferencias notorias. El valor de la v_t^* con el modelo $k - \varepsilon$ sin HLES es mayor en invierno que en primavera, pero la v_t^* obtenida con este mismo modelo utilizando HLES es parecido en ambos escenarios. Respecto al modelo $k - L$ sin HLES, en invierno la mayor viscosidad turbulenta se presenta en P2 mientras que en primavera es en P7.
- En la Figura 5.38(c), referente a k^* vs X^* para el escenario de invierno, con el modelo $k - \varepsilon$ sin HLES se observan resultados mayores y con el modelo $k - L$ sin HLES en P2 se observa un aumento de k^* que no se observa en el escenario de primavera.
- En la Figura 5.38(d), referente a ε^* vs X^* en el escenario de invierno, se observan diferencias notorias. El valor de la ε^* con el modelo $k - \varepsilon$ sin HLES es mayor en invierno que en primavera, sin embargo, la ε^* obtenida con este mismo modelo

utilizando HLES es similar en ambos escenarios. Respecto al modelo $k - L$ sin HLES, en ambos escenarios la mayor tasa de disipación se presenta en P5. Además, la magnitud de ε^* es mayor en P1 para invierno que en primavera. También se observa que empleando el modelo $k - L$ con HLES la mayor tasa de disipación se presente en P1 para el escenario de invierno y no en P7 como es el caso del escenario de primavera.

- Respecto a la variación de R_i vs X^* , presentada para el caso de invierno en la Figura 5.39(c), se observa que utilizando los diversos modelos de turbulencia con HLES, en general los valores obtenidos son menores que en el escenario de primavera. Por el otro lado, cuando no se utiliza HLES los modelos de turbulencia devuelven resultados similares en todos los puntos monitores con excepción del P6, donde en el caso del escenario de invierno los resultados son mayores que en el escenario de primavera.

5. IMPLEM.DEL DELFT3D A LA ZONA DE ESTUDIO Y ANALISIS DE RESULTADOS

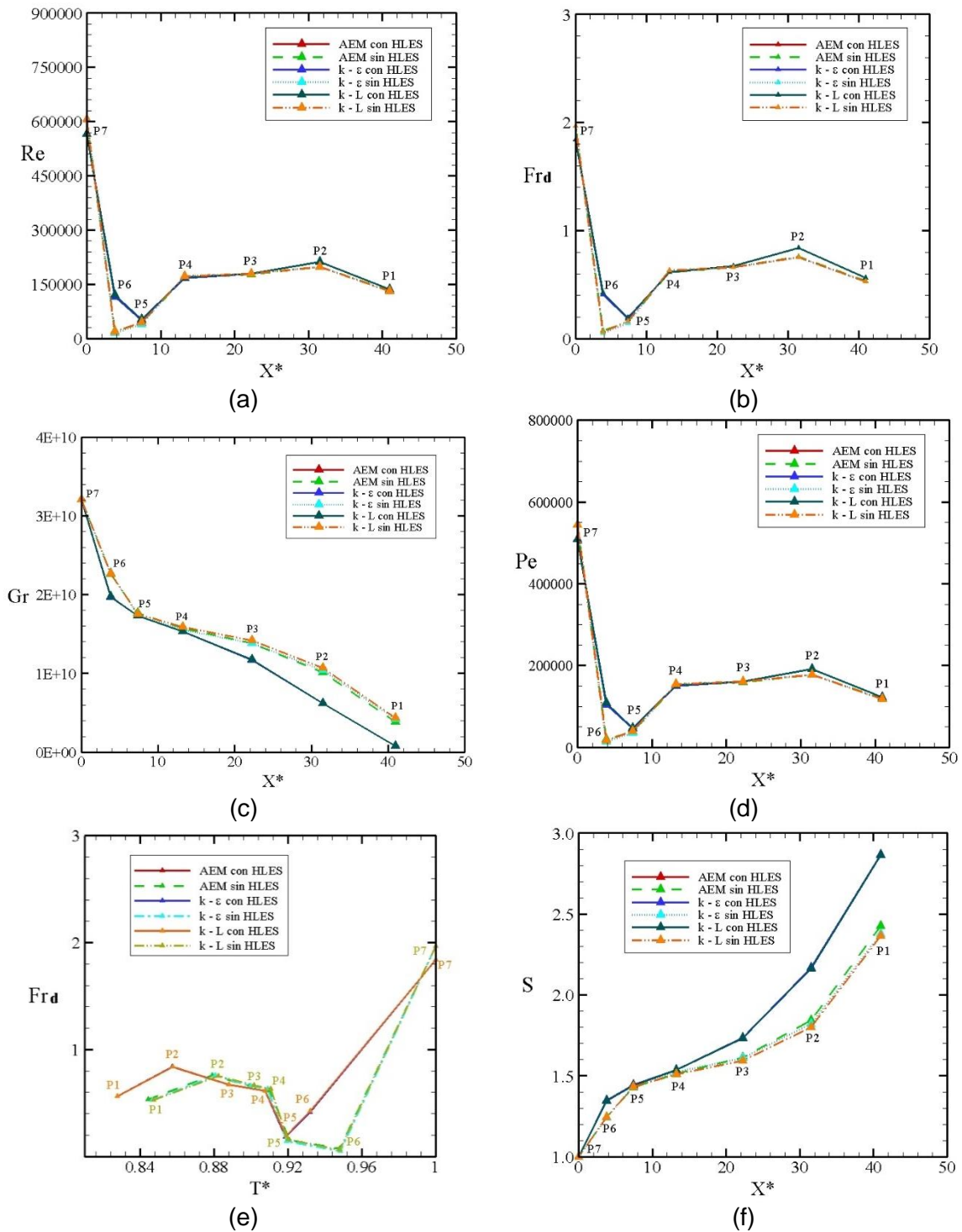


Figura 5.37: Evolución de P7 a P1 de distintos números adimensionales para los diversos modelos de turbulencia considerados en el escenario de invierno: (a) Re ; (b) Fr_d ; (c) Gr ; (d) Pe ; (e) Fr_d vs T^* ; (f) S .

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

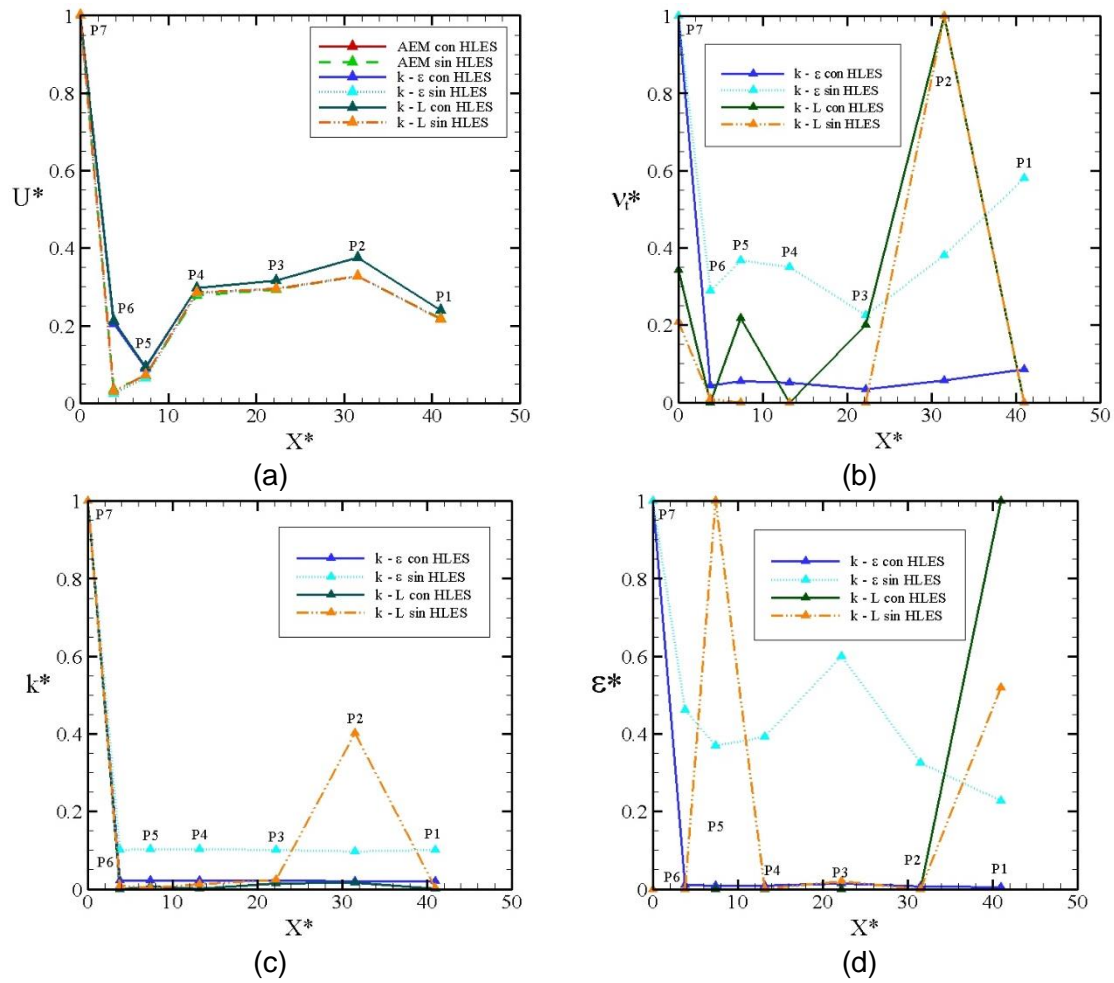


Figura 5.38: Evolución de P7 a P1 para dos modelos de turbulencia considerados en el escenario de invierno de: (a) U^* ; (b) v_t^* ; (c) k^* ; (d) ϵ^* .

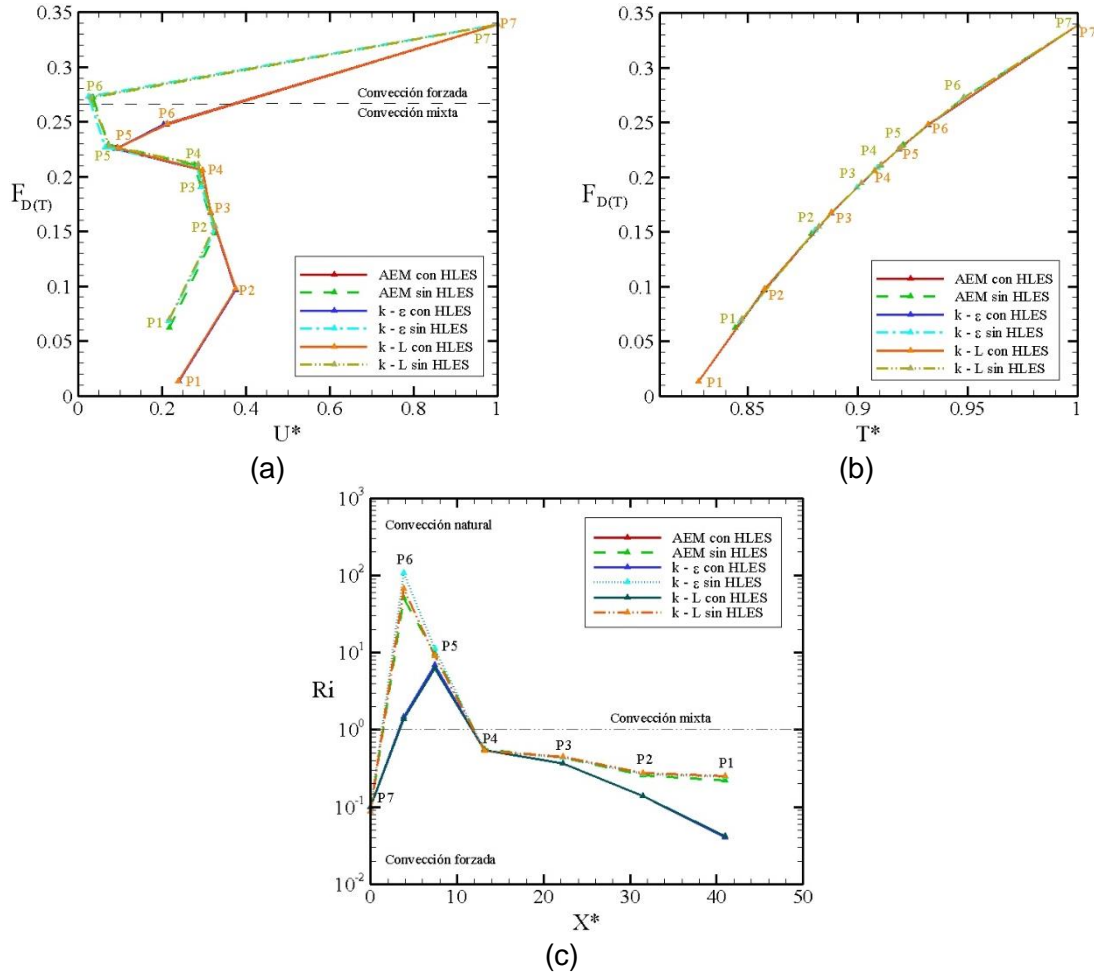


Figura 5.39: Comportamiento para diversos modelos de turbulencia considerados en el escenario de invierno de: (a) $F_{D(T)}$ vs U^* ; (b) $F_{D(T)}$ vs T^* ; (c) Ri vs X^* .

5.4 COMPARATIVO DE EFICACIA ENTRE LOS MODELOS DE TURBULENCIA

En las Tablas 5.12 a 5.17 se muestra un comparativo de los modelos de turbulencia AEM, $k - L$ y $k - \epsilon$ con y sin HLES reportando el valor de R^2 obtenido con la métrica de NS. En cada Tabla se presentan 5 números adimensionales y para cada uno de ellos se reporta su eficacia por malla con respecto al mismo número obtenido con la malla 5 y el modelo $k - \epsilon$ sin HLES. Se eligió este modelo como base de comparación al presentar excelente puntaje en la calibración del Delft3D-FLOW y por calcular los parámetros de turbulencia con ecuaciones de transporte. A partir de lo observado en las Tablas 5.12 a 5.17, se puede constatar qué tan buenos resultados son conseguidos por cada modelo en cada

5.4 COMPARATIVO DE EFICACIA ENTRE LOS MODELOS DE TURBULENCIA

mallas, siendo evidente que se pueden considerar aceptables a partir de la malla 3 y que no hay prácticamente diferencias a partir de la malla 4.

Tabla 5.12: Valores de R^2 para el modelo AEM con HLES

Número adimensional	M1 - M5	M2 - M5	M3 - M5	M4 - M5	M5 - M5
U^*	0.2333	0.6919	0.8713	0.9688	0.9869
T^*	0.8062	0.6101	0.7524	0.8534	0.9602
Re	0.2333	0.6919	0.8713	0.9688	0.9869
Fr_d	0.2187	0.6701	0.8712	0.9692	0.9864
$F_{D(T)}$	0.6450	0.2405	0.5491	0.7354	0.9309

Tabla 5.13: Valores de R^2 para el modelo AEM sin HLES

Número adimensional	M1 - M5	M2 - M5	M3 - M5	M4 - M5	M5 - M5
U^*	0.2424	0.6854	0.9015	0.9863	0.9977
T^*	0.8156	0.9141	0.9704	0.9898	0.9982
Re	0.2424	0.6854	0.9015	0.9863	0.9978
Fr_d	0.2226	0.6722	0.9009	0.9846	0.9971
$F_{D(T)}$	0.7859	0.8849	0.9564	0.9844	0.9979

Tabla 5.14: Valores de R^2 para el modelo $k - \varepsilon$ con HLES

Número adimensional	M1 - M5	M2 - M5	M3 - M5	M4 - M5	M5 - M5
U^*	0.2323	0.6892	0.8711	0.9688	0.9862
T^*	0.8149	0.6360	0.7704	0.8717	0.9581
Re	0.2323	0.6892	0.8711	0.9688	0.9862
Fr_d	0.2179	0.6677	0.8709	0.9691	0.9856
$F_{D(T)}$	0.6681	0.2945	0.5845	0.7737	0.9234

Tabla 5.15: Valores de R^2 para el modelo $k - \varepsilon$ sin HLES

Número adimensional	M1 - M5	M2 - M5	M3 - M5	M4 - M5	M5 - M5
U^*	0.2404	0.6893	0.9057	0.9894	1
T^*	0.8114	0.9235	0.9679	0.9953	1
Re	0.2404	0.6893	0.9057	0.9894	1
Fr_d	0.2206	0.6787	0.9049	0.9884	1
$F_{D(T)}$	0.7826	0.9112	0.9491	0.9333	1

Tabla 5.16: Valores de R^2 para el modelo $k - L$ con HLES

Número adimensional	M1 - M5	M2 - M5	M3 - M5	M4 - M5	M5 - M5
U^*	0.2334	0.6912	0.8713	0.9688	0.9862
T^*	0.8076	0.6176	0.7576	0.8585	0.9611
Re	0.2335	0.6912	0.8713	0.9688	0.9862
Fr_d	0.2189	0.6695	0.8712	0.9691	0.9856
$F_{D(T)}$	0.6486	0.2563	0.5592	0.7459	0.9302

Tabla 5.17: Valores de R^2 para el modelo $k - L$ sin HLES

Número adimensional	M1 - M5	M2 - M5	M3 - M5	M4 - M5	M5 - M5
U^*	0.2422	0.6852	0.9052	0.9856	0.9971
T^*	0.8145	0.9153	0.9653	0.9898	0.9939
Re	0.2422	0.6852	0.9052	0.9856	0.9971
Fr_d	0.2224	0.6721	0.9044	0.9839	0.9963
$F_{D(T)}$	0.7848	0.8871	0.9440	0.9852	0.9917

5.5 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

En este Capítulo se describió la implementación del modelo Delft3D-FLOW al caso de estudio: la pluma térmica de la CNLV. Se seleccionaron dos escenarios para las simulaciones: el primero del 23 al 26 de enero de 2017, correspondiente a la temporada invernal y el segundo, del 15 al 18 mayo de 2017, en la primavera. Se procedió a alimentar el modelo con las consideraciones necesarias para la reproducción de la pluma térmica. Dichas consideraciones son: el dominio computacional, el periodo de simulación, el esquema numérico de solución, las condiciones iniciales y de frontera, la batimetría, y los puntos monitores. Posteriormente, se realizó la calibración y validación del modelo numérico. También, se analizó la pertinencia de los modelos de turbulencia disponibles en Delft3D-FLOW sobre los resultados obtenidos. Además, se realizó una evaluación de las condiciones termodinámicas y ambientales del lugar en dichos puntos monitores por medio de un análisis basado en números adimensionales asociados a problemas de transferencia de calor.

Una de las principales contribuciones de esta investigación fue la introducción de una cantidad adimensional nombrada Factor de Densidad y definida en la ecuación (5.4). Este Factor en principio está aceptado por la comunidad científica internacional ya que fue empleado en la publicación emanada de esta investigación [34]: *Analysis of Thermal Plume Dispersion into the Sea by Remote Sensing and Numerical Modeling*.

Con los resultados obtenidos, se evidencia la superioridad de las simulaciones numéricas por sobre las técnicas de monitoreo de mediciones *in situ* y de teledetección: es posible obtener información detallada de la dispersión térmica como las velocidades, la densidad, la temperatura, datos de las pequeñas escalas, etc. Adicionalmente, se pudo hacer la clasificación de los regímenes de convección natural, forzada o mixta.

Los resultados obtenidos para cada escenario se resumen a continuación:

- En el escenario de primavera, se utilizaron 5 tipos de mallas, variando desde una malla gruesa a una malla fina, donde en todas y en cada una de ellas se obtuvieron diversos números adimensionales para realizar el análisis correspondiente. Se observó la mejora de precisión numérica al ir refinando las mallas, notando que a partir de la malla 3 no hay una mejora significativa en los resultados (Figura 5.10). Respecto a los hallazgos encontrados en los puntos monitores, cerca del canal de descarga, en los puntos P7 a P5, se observa que debido a la cantidad de movimiento introducida por el flujo del canal de descarga y por ser esta locación el núcleo de la pluma térmica, hay predominancia de las fuerzas inerciales sobre las viscosas, de las de flotabilidad por sobre las inerciales, de las gravitacionales por sobre las viscosas y además de una predominancia de las convectivas sobre las difusivas. El flujo en esta zona presenta un comportamiento de convección forzada. Por otro lado, en las variables de gran escala no se observaron diferencias entre los modelos de turbulencia. Sin embargo, en las de pequeña escala, se observaron comportamientos de decaimiento de la magnitud de las cantidades turbulentas adimensionales con el modelo $k - \varepsilon$ con y sin HLES, pero no con el modelo $k - L$. Adicionalmente, debido a que se carece de una solución analítica, se realizó una comparativa de los modelos de turbulencia con respecto al modelo $k - \varepsilon$ sin HLES, con lo que se muestra la eficacia de cada modelo de turbulencia en este tipo de problemas de transferencia de calor.
- En el escenario de invierno, solo se realizó el análisis para la malla 3, pues se mostró en el escenario de primavera que los resultados obtenidos con esta malla son aceptables. En general, lo dicho para el escenario de primavera es cierto para este escenario. Las diferencias encontradas fueron que en P7 y P6 el G_r es de mayor magnitud que en primavera, esto es de esperarse pues en invierno los gradientes de temperatura son mayores. En el caso de la relación S, se observa que también presenta magnitudes mayores en invierno que en primavera. Además, en la zona cercana a la obra de toma, se observa que activando el esquema HLES los valores de S son mayores a que cuando no se activa dicho esquema, coincidiendo en que HLES produce mayor disipación de calor como se puede apreciar en las figuras de los campos de temperatura (Figura 5.17).

A manera de reflexión, las diferencias encontradas en las cantidades turbulentas adimensionales al utilizar diversos modelos de turbulencia pueden explicarse si se recuerdan las características fundamentales asociadas a la naturaleza de la turbulencia: aleatoriedad, vorticidad y difusividad. Esto hace remembranza de que los flujos turbulentos son caóticos e impredecibles, los niveles de vorticidad fluctúan tanto en el tiempo como en el espacio y el mezclado intensifica el transporte de masa, cantidad de movimiento y energía. Por tanto, es normal encontrarse con comportamientos que pudiesen catalogarse como raros o sin sentido en las escalas más finas del movimiento, *simplemente así es la turbulencia*. Por otro lado, refiriéndose a las formulaciones de cada modelo de turbulencia, el modelo $k - \varepsilon$ obtiene las cantidades turbulentas con ecuaciones de transporte mientras que el modelo $k - L$ solo obtiene a k con una de transporte y a ε la obtiene con la relación de Prandtl-Kolmogorov. Más aún, el modelo AEM obtiene tanto a k como a ε con ecuaciones algebraicas. Consecuentemente, es normal esperar resultados nada parecidos en las variables más finas del movimiento al compararse los modelos de turbulencia.

6. CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

El presente trabajo de investigación consistió en la reproducción y análisis de plumas térmicas emitidas por la CNLV. En el Capítulo 2, se realizó una revisión de la literatura científica especializada en plumas térmicas detectando que no existen suficientes aportaciones científicas que analicen exhaustivamente la pertinencia de los modelos de turbulencia en la caracterización de plumas térmicas. Además, tampoco se encontró evidencia de análisis termodinámicos y ambientales basados en números adimensionales para caracterizar la dispersión térmica en aguas costeras. En el Capítulo 3, se presentó la filosofía de la CFD y se presentaron las razones del por qué se eligió al modelo Delft3D-FLOW para realizar las simulaciones de las plumas térmicas. En el Capítulo 4, se hizo una recopilación de la información necesaria para alimentar al modelo Delft3D-FLOW y se realizó un análisis de plumas térmicas generadas con la técnica de Teledetección. En el Capítulo 5, se presentó la implementación del modelo Delft3D-FLOW a la zona de estudio y se analizaron los resultados obtenidos con las simulaciones numéricas.

El modelo Delft3D-FLOW fue calibrado con imágenes generadas con la técnica de Teledetección y que presentan plumas térmicas de la CNLV. Debe hacerse énfasis en que dichas imágenes fueron calibradas y validadas con mediciones *in situ* en un área extensa. Estas imágenes resultaron ser una opción factible y confiable para la calibración del modelo Delft3D-FLOW. Más aún, las imágenes no solo fueron útiles para calibrar el modelo, también sirvieron como base para la representación espacial de la dispersión térmica. Esta es una contribución importante de la presente investigación, pues se propone una estrategia de calibración y validación de un modelo numérico con apoyo de

Teledetección, a falta de datos medidos espaciales e históricos de la temperatura del mar para generar campos de dispersión de plumas térmicas en el mar.

En la calibración del modelo Delft3D-FLOW con las imágenes de Teledetección, se utilizaron 5 niveles de mallas numéricas con el objetivo de verificar el efecto de malla en los resultados. Se observó que de la malla 3 a la malla 5 las variaciones de los resultados son prácticamente despreciables. Consecuencia de lo anterior, la malla 3 fue la seleccionada para analizar los resultados de las simulaciones en ambos escenarios estacionales definidos: invierno y primavera. La validación de los resultados fue llevada a cabo mediante el cálculo de tres métricas: RMSE, NS y m ; obteniendo valores satisfactorios de acuerdo con los rangos que manejan cada una de ellas.

Al evaluar la pertinencia de los modelos de turbulencia disponibles en Delft3D-FLOW en la caracterización de las plumas térmicas, se encontró lo siguiente:

1. Los campos de temperatura muestran similitud visual con la imagen de Teledetección.
2. Los campos de temperatura presentan una mayor disipación de calor al activar el modelo HLES, sin importar con qué modelo de turbulencia tipo RANS se acople, y esto se aprecia más en la zona cercana a la obra de toma. Lo anterior se observa tanto en el escenario de invierno como en primavera.
3. Al analizar los resultados de las variables de gran escala, en general no se observaron diferencias al utilizar uno u otro modelo de turbulencia.
4. Al analizar los resultados de las variables de pequeña escala, sí se observaron variaciones en su comportamiento. Con el modelo $k - \varepsilon$ se observaron decaimientos paulatinos, conforme la pluma evoluciona desde la descarga hasta puntos lejanos, sin embargo, no fue así cuando se seleccionó el modelo $k - L$. En el escenario de invierno, se observan comportamientos sin un aparente sentido lógico en ambos modelos de turbulencia.
5. De los modelos de turbulencia comparados, el que mejor desempeño mostró fue el $k - \varepsilon$ sin HLES, de acuerdo con la comparación de las temperaturas de las imágenes de Teledetección en los puntos de monitoreo, además de que permite contar con la evolución de las variables de pequeña escala.

Al analizar el estado termodinámico y ambiental de la pluma térmica por medio de números adimensionales asociados a procesos de transferencia de calor, se encontró que

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

entre los puntos monitores P7 a P5 predomina la convección forzada. Además, predominan las siguientes fuerzas en el fenómeno: inerciales sobre las viscosas, inerciales sobre las de flotabilidad, gravitacionales sobre las viscosas y convectivas sobre las difusivas. En el resto de los puntos monitores, P1 a P4, predomina la convección mixta. A partir del punto P5 y hasta el P2, puede apreciarse cómo la descarga deja de tener influencia en la dinámica de la dispersión térmica, pues las fuerzas predominantes en los P7 a P5 tienden a disminuir. Del P2 al P1, se puede observar que las condiciones tienden a comportarse de manera similar a lo observado entre P7 a P5, pues se presentan incrementos en la magnitud de los números adimensionales. Esto último puede deberse a la succión de agua por parte de la obra de toma y al diferencial batimétrico drástico de alrededor de 2 metros.

En general, en ambos escenarios estacionales analizados el comportamiento de los números adimensionales fue similar. La excepción sería con los números G_r y S . El primero presenta valores mayores en invierno y esto se explica debido a que el gradiente de temperatura es mayor. En el caso del segundo número, también se observan magnitudes mayores en invierno por los gradientes de temperatura. Además, también se observa mayor dilución en la zona de la obra de toma al utilizar el esquema HLES, concordando lo observado en los campos de temperatura donde también se observa una mayor disipación de calor en la misma zona.

Nuevamente, se hace un énfasis especial en otra de las principales contribuciones de esta investigación: la introducción del aquí denominado Factor de Densidad (ecuación (5.4)). Con este Factor, es posible interpretar el régimen de convección del flujo generado por la descarga y su posterior dispersión térmica en zonas costera, pues ayuda a disminuir la ambigüedad de la clasificación establecida por el criterio del R_i , en la cual no se ha indagado suficiente en este tipo de fenómenos, según la investigación de la literatura.

Por último, se remarca que los modelos hidrodinámicos y de dispersión térmica son una herramienta poderosa para el diseño y evaluación de diversos escenarios que, si son combinados con otras técnicas de monitoreo, los resultados obtenidos aumentan su certidumbre, y por tanto su potencial, ya que se mejora la respuesta cualitativa y cuantitativa obtenida con ellos. Más aún, en años recientes la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ha establecido, en la guía para la integración de Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA) en la modalidad regional, el

uso de modelos matemáticos y proyecciones numéricas para generación de escenarios o tendencias dentro de las memorias de cálculo [106]. Esto implica que oficialmente en México cualquier proyecto de obra o actividad en la que se prevea un impacto ambiental significativo y potencial, deberá considerar la aplicación de la CFD. Por tanto, se refuerza la importancia de la metodología de análisis basada en CFD planteada en esta investigación, como un procedimiento que permite evaluar el impacto de una descarga, en este caso térmica, en la zona costera, con baja incertidumbre, gracias al uso integrado de técnicas como la Teledetección y la simulación numérica. No debe olvidarse que en última instancia una mala operación, diseño y/o administración de las CGE, perjudica en la disponibilidad de energía eléctrica, la cual es necesaria para el funcionamiento de casi cualquier actividad productiva en una nación.

6.2 PERSPECTIVAS

En este trabajo se utilizó el modelo hidrodinámico Delft3D-FLOW utilizando los módulos de la hidrodinámica, temperatura, flujo de calor y viento. A pesar de que los resultados obtenidos cuentan con precisión aceptable, es posible que ellos se asemejen más a la realidad si se considera el módulo del oleaje en las simulaciones numéricas con sus diferentes fenómenos: refracción, difracción, reflexión y rompiente.

Las condiciones exploradas fueron para escenarios de invierno y primavera. Si se contaran con mediciones *in situ* para otras temporadas del año, como verano y otoño, se pueden analizar las condiciones de las plumas térmicas para estas últimas temporadas. Desafortunadamente, actualmente, no es una política primordial en la CNLV el contar con mediciones.

Versiones futuras de este trabajo pueden ser mejoradas si se contara con una base de datos más completa de alguna institución gubernamental nacional para la zona cercana a la CNLV, pues como ya se mencionó, datos de viento o de radiación solar no fueron posibles encontrarlos en dichas instituciones. También, el campo de aplicabilidad de este trabajo puede ser ampliado al acoplar estos resultados con el módulo de calidad de agua del Delft3D-FLOW.

Por otra parte, solo se trabajó con 3 modelos de turbulencia del tipo RANS en 3D y uno del tipo LES en cuasi3D. No obstante, existen otros modelos de turbulencia no disponibles en Delft3D-FLOW pero sí en otros modelos hidrodinámicos, por lo que se puede investigar el comportamiento de la pluma térmica utilizando modelos de turbulencia no explorados aquí comparándolos con los analizados en este trabajo.

Más aun, de la revisión literaria, solo se encontraron 2 trabajos que publicaron los coeficientes de difusión utilizados, por lo que se puede investigar con otros modelos de turbulencia el valor de dichos coeficientes hasta encontrar un rango de valores para este tipo de casos de estudio. Se espera que la metodología utilizada en este trabajo contribuya para ser un referente al llegarse el momento en que sea factible efectuar simulaciones numéricas directas de las descargas térmicas.

Finalmente, México cuenta con diversas CGE, las cuales operan bajo el sistema de enfriamiento del tipo abierto; generando obviamente sus propias descargas térmicas. Esto se puede traducir en que existe un campo de aplicación extenso de los modelos

hidrodinámicos como herramienta de diseño en la formulación de escenarios hipotéticos donde se generen plumas térmicas.

Esto es cierto en la actualidad y en los años por venir, pues nuevas CGE existirán y ellas requerirán de estudios termodinámicos que garanticen su funcionamiento óptimo y un bajo impacto ambiental según la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) [107].

BIBLIOGRAFÍA

1. Kirillin, G.; Shatwell, T.; Kasprzak, P. Consequences of Thermal Pollution from a Nuclear Plant on Lake Temperature and Mixing Regime. *J. Hydrol.* **2013**, *496*, 47–56, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.023>.
2. Li, X.Y.; Li, B.; Sun, X.L. Effects of a Coastal Power Plant Thermal Discharge on Phytoplankton Community Structure in Zhanjiang Bay, China. *Mar. Pollut. Bull.* **2014**, *81*, 210–217, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.08.006>.
3. Azmi, S.; Agarwadkar, Y.; Bhattacharya, M.; Apte, M.; Inamdar, A.B. Monitoring and Trend Mapping of Sea Surface Temperature (SST) from MODIS Data: A Case Study of Mumbai Coast. *Environ. Monit. Assess.* **2015**, *187*, 165, <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4386-9>.
4. Donlon, C.J.; Minnett, P.J.; Gentemann, C.; Nightingale, T.; Barton, I.J.; Ward, B.; Murray, M.J. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *J. Clim.* **2002**, *15*, 353–369.
5. Ahn, Y.-H.; Shanmugam, P.; Lee, J.-H.; Kang, Y.Q. Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea. *Mar. Environ. Res.* **2006**, *61*, 186–201.
6. Li, N.; Mao, Z.; Zhang, Q.; Wang, D.; Bai, Y.; Pan, D. The Numerical Simulation and Remote Sensing of the Thermal Discharge from the Qinshan Nuclear Power Station. *Remote. Sens. Inland Coast. Ocean. Waters* **2008**, *7150T*, <https://doi.org/10.1117/12.804838>.
7. Zoran, M.A.; Savastru, R.S.; Savastru, D.M.; Miclos, S.I.; Tautan, M.N.; Baschir, L.V. Thermal Pollution Assessment in Nuclear Power Plant Environment by Satellite Remote Sensing Data. *Remote Sens. Agric. Ecosyst. Hydrol. XIV* **2012**, *8531*, 853120, <https://doi.org/10.1117/12.974402>.
8. Zhang, Z.; He, G.; Wang, M.; Long, T.; Wang, G.; Zhang, X.; Jiao, W. Towards an Operational Method for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Data. *Remote Sens. Lett.* **2016**, *7*, 279–288, <https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1130877>.
9. Bonansea, M.; Ferrero, S.; Ferral, A.; Ledesma, M.; German, A.; Carreño, J.; Rodríguez, C.; Pinotti, L. Assessing Water Surface Temperature from Landsat Imagery and Its Relationship with a Nuclear Power Plant. *Hydrol. Sci. J.* **2021**, *66*, 50–58, <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1845342>.
10. García, R. Análisis de dispersión de la pluma térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde mediante teledetección. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, México, 16 Diciembre 2020; <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21602.25288>.
11. Gaeta, M.G.; Samaras, A.G.; Archetti, R. Numerical Investigation of Thermal Discharge to Coastal Areas: A Case Study in South Italy. *Environ. Model. Softw.* **2020**, *124*, 104596, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104596>.
12. Jia, H.I.; Zheng, S.; Xie, J.; Ying, X.m.; Zhang, C.p. Influence of Geographic Setting on Thermal Discharge from Coastal Power Plants. *Mar. Pollut. Bull.* **2016**, *111*, 106–114, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.07.024>.
13. Deabes, E.A.M. The Impact of Thermal Power Stations on Coastline and Benthic Fauna: Case Study of El-Burullus Power Plant in Egypt. *Results Eng.* **2020**, *7*, 100128, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100128>.
14. Issakhov, A. Mathematical Modeling of the Discharged Heat Water Effect on the Aquatic Environment from Thermal Power Plant under Various Operational Capacities. *Appl. Math. Model.* **2016**, *40*, 1082–1096, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.06.024>.

15. Shah, V.; Dekhatwala, A.; Banerjee, J.; Patra, A.K. Analysis of Dispersion of Heated Effluent from Power Plant: A Case Study. *Sadhana Acad. Proc. Eng. Sci.* **2017**, *42*, 557–574, <https://doi.org/10.1007/s12046-017-0625-9>.
16. Durán-Colmenares, A.; Barrios-Piña, H.; Ramírez-León, H. Numerical Modeling of Water Thermal Plumes Emitted by Thermal Power Plants. *Water* **2016**, *8*, 1–16, <https://doi.org/10.3390/w8110482>.
17. Yu, L.; Yu, J. Numerical Research on Flow and Thermal Transport in Cooling Pool of Electrical Power Station Using Three Depth-Averaged Turbulence Models. *Water Sci. Eng.* **2009**, *2*, 1–12, <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.03.001>.
18. Lunis, M.; Mamchuk, V.; Movchan, V.; Romanyuk, L.; Shkvar, E. Algebraic Models of Turbulent Viscosity and Heat Transfer in Analysis of Near-Wall Turbulent Flows. *Int. J. Fluid Mech. Res.* **2004**, *31*, 60–74, <https://doi.org/10.1615/InterJFluidMechRes.v31.i3.60>.
19. Furue, R.; Jia, Y.; McCreary, J.P.; Schneider, N.; Richards, K.J.; Müller, P.; Cornuelle, B.D.; Avellaneda, N.M.; Stammer, D.; Liu, C.; et al. Impacts of Regional Mixing on the Temperature Structure of the Equatorial Pacific Ocean. Part 1: Vertically Uniform Vertical Diffusion. *Ocean Model.* **2015**, *91*, 91–111, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.10.002>.
20. Ali, J.; Fieldhouse, J.; Talbot, C. Turbulent Cooling Water Discharge into Still Body of Water. *Nucl. Eng. Des.* **2011**, *241*, 2006–2012, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.09.005>.
21. Kumar, R.; Dewan, A. Computational Models for Turbulent Thermal Plumes: Recent Advances and Challenges. *Heat Transf. Eng.* **2014**, *35*, 367–383, <https://doi.org/10.1080/01457632.2013.828558>.
22. Burchard, H.; Craig, P.D.; Gemmrich, J.R.; van Haren, H.; Mathieu, P.P.; Meier, H.E.M.; Smith, W.A.M.N.; Prandke, H.; Rippeth, T.P.; Skillingstad, E.D.; et al. Observational and Numerical Modeling Methods for Quantifying Coastal Ocean Turbulence and Mixing. *Prog. Oceanogr.* **2008**, *76*, 399–442, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.09.005>.
23. James, I.D. Modelling Pollution Dispersion, the Ecosystem and Water Quality in Coastal Waters: A Review. *Environ. Model. Softw.* **2002**, *17*, 363–385, [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00080-9](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00080-9).
24. Chen, Q.; Xu, W. A Zero-Equation Turbulence Model for Indoor Airflow Simulation. *Energy Build.* **1998**, *28*, 137–144, [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(98\)00020-6](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(98)00020-6).
25. Rodi, W. Turbulence Modeling and Simulation in Hydraulics: A Historical Review. *J. Hydraul. Eng.* **2017**, *143*, 1–20, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001288).
26. Hinterberger, C.; Froehlich, J.; Rodi, W. Three-dimensional and depth-averaged Large-Eddy Simulations of Some Shallow Water Flows. *J. Hydraul. Eng.* **2007**, *133*, 857–872, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:8\(857\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(857)).
27. Silva, H.A.; Botello, A.V. Evaluación del Impacto ambiental de la central Nucleoeléctrica Laguna Verde. In *Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*; EPOMEX: Campeche, Mexico, 1996.
28. Botello, A.V.; Rendón, J. Evaluación del Impacto ambiental de la central Nucleoeléctrica Laguna Verde a 15 años de operación. In *Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*; EPOMEX: Campeche, Mexico, 2005.
29. Ramírez-León, H.; Couder-Castañeda, C.; Herrera-Díaz, I.E.; Barrios-Piña, H.A. Modelación Numérica de La Descarga Térmica de La Central Nucleoeléctrica Laguna Verde. *Rev. Int. Metod. Numer. Calc. Disen. Ing.* **2013**, *29*, 114–121, <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.04.002>.
30. Roelvink, J.A.; Van Banning, G.K.F.M. Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics. In *Hydroinformatics*; Verwey, A., Minns, A.W.,

- Babovic, V., Maksimovic, C., Eds.; Balkema: Rotterdam, The Netherlands, 1994; pp. 451–456.
31. Lesser, G.R.; Roelvink, J.A.; van Kester, J.A.T.M.; Stelling, G.S. Development and Validation of a Three-Dimensional Morphological Model. *Coast. Eng.* **2004**, *51*, 883–915, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>.
 32. Gerritsen, H.; de Goede, E.D.; Platzek, F.W.; Genseberger, M.; van Kester, J.A.T.M.; Uittenbogaard, R.E. *Validation Document Delft3D-FLOW: A Software System for 3D Flow Simulations*; Deltares: Delft, The Netherlands, 2007; p. 266.
 33. Deltares. *Delft3D-FLOW User Manual*, 3.15 ed.; Deltares: Delft, The Netherlands, 2020.
 34. Laguna-Zarate, L.; Barrios-Piña, H.; Ramírez-León, H.; García-Díaz, R.; Becerril-Piña, R. Analysis of Thermal Plume Dispersion into the Sea by Remote Sensing and Numerical Modeling. *J. Mar. Sci. Eng.* **2021**, *9*, 1437. <https://doi.org/10.3390/jmse9121437>
 35. Ramos-Gutierrez, L.; Montenegro-Fragoso, M. La generación de energía eléctrica en México. *Tecnología y Ciencias del Agua.* **2012**, *3*, 197–211.
 36. SENER. *Balance Nacional de Energía 2019*. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. México, 2020.
 37. Radioactive Waste Management. Available online: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx> (accessed on 30 October 2021).
 38. Leal, C. Propuesta técnica y económica de la ampliación de la Central Nucleoelectrica Laguna Verde con un reactor nuclear adicional. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México. 2005.
 39. Lamarsh, J.R.; Baratta, A.J. *Introduction to Nuclear Engineering*, 3rd ed.; Pearson: USA, 2014; pp. 133-136.
 40. Nuclear power. Available online: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-power#/media/1/421749/177423> (accessed on 30 October 2021).
 41. Thermal power plants. Available online: <https://stem.guide/topic/thermal-power-plants/> (accessed on 30 October 2021).
 42. Hao, R.; Qiao, L.; Han, L.; Tian, C. Experimental Study on the Effect of Heat-Retaining and Diversion Facilities on Thermal Discharge from a Power Plant. *Water (Switzerland)*, **2020**, *12* (8). <https://doi.org/10.3390/w12082267.666>
 43. Attia, S.I. The influence of condenser cooling water temperature on the thermal efficiency of a nuclear power plant. *Ann. Nucl. Energy* **2015**, *80*, 371–378.
 44. Issakhov, A.; Zhandalet, Y. Numerical Simulation of Thermal Pollution Zones' Formations in the Water Environment from the Activities of the Power Plant. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, **2019**, *13* (1), 279–299. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1584126.555>
 45. Cooling Water Options for the New Generation of Nuclear Power Stations in the UK. Available online: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291077/scho0610bsot-e-e.pdf (accessed on 30 November 2021).
 46. Schaltout, M.; Omstedt, A. Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Mediterranean Sea. *Oceanologia.*, **2014**, *56*(3), 411–443.
 47. Campos, C. Modelación matemática de descargas térmicas en medios marinos. Aplicación a la descarga de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde. Tesis de Maestría, IPN. México, D.F. México. 2006.
 48. SEMARNAT. Available online: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO2470.pdf> (accessed on 30 October 2021).
 49. Shiah, F. K.; Wu, T. H.; Li, K. Y.; Kao, S. J.; Tseng, Y. F.; Chung, J. L.; Jan, S. Thermal Effects on Heterotrophic Processes in a Coastal Ecosystem Adjacent to a

- Nuclear Power Plant. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **2006**, 309 (Dai 1999), 55–65. <https://doi.org/10.3354/meps309055>.
50. Muhammad, Q.H.; Hussein, A.H.; Lafta, J.A.; The effect of Musayyib thermal power station wastewater on some physical and chemical properties of the Euphrates River water, *Journal of AL-Qadisiyah for Engineering Sciences* 7 (4) **2014**
51. Ramírez-León, H.; Barrios-Piña, H.; Torres-Bejarano, F.; Cuevas-Otero, A.; Rodríguez-Cuevas, C. Numerical Modelling of the Laguna Verde Nuclear Power Station Thermal Plume Discharge to the Sea. In *High Performance Computer Applications*, 1st ed.; Gliter, I., Klapp, J., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016; pp. 495–507.
52. Blanco, L.; Luna, E.; Sancho, A. Determinación de patrones espaciales de la vegetación a escala de potrero mediante procesamiento digital de imágenes satelitales. En *Manual para evaluación de pastizales naturales del Chaco Árido con fines ganaderos*. Blanco, L., Quiroga, E., Eds.; INTA Ediciones: Buenos Aires, Argentina, 2020; pp. 6–14.
53. Suh, S. W. A Hybrid Near-Field/Far-Field Thermal Discharge Model for Coastal Areas. *Mar. Pollut. Bull.*, **2001**, 43 (7–12), 225–233. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00074-1](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00074-1).
54. Zeng, P.; Chen, H.; Ao, B.; Ji, P.; Wang, X.; Ou, Z. Transport of Waste Heat from a Nuclear Power Plant into Coastal Water. *Coast. Eng.*, **2002**, 44 (4), 301–319. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(01\)00039-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(01)00039-4).
55. Tang, D. L.; Kester, D. R.; Wang, Z.; Lian, J.; Kawamura, H. AVHRR Satellite Remote Sensing and Shipboard Measurements of the Thermal Plume from the Daya Bay, Nuclear Power Station, China. *Remote Sens. Environ.*, **2003**, 84 (4), 506–515. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00149-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00149-9).
56. Jan, S.; Chen, C. T. A.; Tu, Y. Y.; Tsai, H. S. Physical Properties of Thermal Plumes from a Nuclear Power Plant in the Southernmost Taiwan. *J. Mar. Sci. Technol.*, **2004**, 12 (5), 433–441.
57. Cheng, Y.; Ying, B. Numerical Simulation and Comparison of Water Intake-Outlet Methods in Power Plants. *J. Hydrodyn.*, **2007**, 19 (5), 623–629. [https://doi.org/10.1016/s1001-6058\(07\)60162-0](https://doi.org/10.1016/s1001-6058(07)60162-0).
58. German, A.; Espino, M.; Blasco, J.; Maidana, M. Finite Element Modelling of the Thermal Outflow of Three Power Plants in Huelva Estuary. *Adv. Eng. Softw.*, **2007**, 38 (6), 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.09.010>.
59. Li, N.; Mao, Z.; Zhang, Q.; Wang, D.; Bai, Y.; Pan, D. The Numerical Simulation and Remote Sensing of the Thermal Discharge from the Qinshan Nuclear Power Station. *Remote Sens. Inland, Coastal, Ocean. Waters*, **2008**, 7150 (40576080), 71500T. <https://doi.org/10.1117/12.804838>.
60. Lowe, S. A.; Schuepfer, F.; Dunning, D. J. Case Study: Three-Dimensional Hydrodynamic Model of a Power Plant Thermal Discharge. *J. Hydraul. Eng.*, **2009**, 135 (4), 247–256. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2009\)135:4\(247\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2009)135:4(247)).
61. Cheng, Y. L.; Hao, Q. Z.; Jing, H. Effects of Topography on Diffusion of Thermal Discharge in Power Plant. *Procedia Environ. Sci.*, **2011**, 11 (PART B), 618–623. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.096>.
62. Fossati, M.; Santoro, P.; Urrestarazu, S.; Piedra-Cueva, I. Numerical Study of the Effect of a Power Plant Cooling Water Discharge in the Montevideo Bay. *J. Appl. Math.*, **2011**, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/970467>.
63. Cheng, Y. L.; Hao, Q. Z.; Liu, L. L. The Effect of Velocity and Outlet Angle of the Thermal Discharge on Its Diffusion with Basic Flow in Power Plant. *Procedia Environ. Sci.*, **2011**, 11 (PART B), 611–617. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.095>.

64. El-Ghorab, E. A. S. Physical Model to Investigate the Effect of the Thermal Discharge on the Mixing Zone (Case Study: North Giza Power Plant, Egypt). *Alexandria Eng. J.*, **2013**, 52 (2), 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.12.003>.
65. Salgueiro, D. V.; De Pablo, H.; Neves, R.; Mateus, M. Modelling the Thermal Effluent of a near Coast Power Plant (Sines, Portugal). *J. Integr. Coast. Zo. Manag.*, **2015**, 15 (4), 533–544. <https://doi.org/10.5894/rgci577>.
66. Ashfaq, S. M. Thermal Dispersion Model for Cooling Water of Thermal Power Plant System. *Inpressco*, **2015**, 5 (4), 2472–2477.
67. Ma, P.; Dai, X.; Guo, Z.; Wei, C.; Ma, W. Detection of Thermal Pollution from Power Plants on China's Eastern Coast Using Remote Sensing Data. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, **2017**, 31 (8), 1957–1975. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1293-8>.
68. Roy, P.; Rao, I. N.; Martha, T. R.; Kumar, K. V. Discharge Water Temperature Assessment of Thermal Power Plant Using Remote Sensing Techniques. *Energy Geosci.*, **2021**, No. xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.06.006>.
69. Versteeg, H.; Malalasekera, W. An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd ed.; Pearson, Prentice Hall, 2007.
70. Fernández, J. Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos, 1st ed.; Ediciones Reverté, España, 2012; pp. 266-267.
71. Bradshaw, P. An introduction to turbulence and its measurement, 1st ed.; Pergamon Press, Oxford, U.K, 1971.
72. Ferziger, J. H. Large Eddy Numerical Simulations of Turbulent Flows. *AIAA J.*, **1977**, 15 (9), 1261–1267. <https://doi.org/10.2514/3.60782>.
73. Wilcox, D. Turbulence modeling for CFD, 3rd ed.; DWC Industries. 2006; pp. 33-39.
74. Launder, B. E.; Reece, G. J.; Rodi, W. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure. *J. Fluid Mech.*, **1975**, 68 (3), 537–566. <https://doi.org/10.1017/S0022112075001814>.
75. Rodi, W. Turbulence models and their application in hydraulics: A state of the art review, 1st ed.; IAHR, USA, 1984.
76. Boussinesq, J. Essai sur la theorie des eaux courantes, memories presentes par divers savants. L'acad des sci. Inst.Nat. France, 1877.
77. Frahnert H., Dallmann U. Examination of the Eddy-Viscosity Concept Regarding its Physical Justification. In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III. Notes on Numerical Fluid Mechanics (NNFM)*, Wagner S.; Rist, U.; Heinemann, H.; Hilbig, R. Eds.; Springer, Berlin, Germany, 2002; vol 77. pp. 255-262. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45466-3_31.
78. Uittenbogaard, R.; vanVossen, B. Subgrid-scale model for quasi-2D turbulence in shallow water. In *Shallow Flows*; Jirka, G., Uijttewaal, W., Eds.; Taylor & Francis Group: London, UK, 2004; pp. 575–582.
79. Campos, D. *Procesos del ciclo hidrológico*, 3^a ed.; Editorial universitaria potosina, Mexico, 1998.
80. Campos, D. Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la república mexicana Rainfall Maximum Intensities for Urban Hydrological Design in Mexican Republic. *Ingeniería, Investigación y Tecnología.*, **2010**, XI(2), 179–188.
81. Chen, C. Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas. *Journal of Hydraulic Engineering.*, 1983, 109(12), 1603–1621. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429,109:12\(1603\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429,109:12(1603))

82. Isoyetas de intensidad - duración- periodo de retorno para la república mexicana. Available online: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/> (accessed online: 15 February 2020).
83. Bedient, P. Hydrology and floodplain analysis. In *Choice Reviews Online.*, **1990**, (Vol. 27, Issue 05). <https://doi.org/10.5860/choice.27-2736>
84. Ortiz-Lozano, L.; Arceo-Briseño, P.; Granados-Barba, A.; Salas-Monreal, D.; Jiménez-Badillo, M. In: Zona Costera, *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz, Patrimonio Natural*, Florescano, E.; Ortiz-Escamilla, J. Eds.; Editorial Universidad Veracruzana, México; 2010; 1ª. Ed, Tomo 1, pp.123-146.
85. Weather online. Available online: <https://www.weatheronline.mx/weather/maps/city> (accessed online: 20 October 2021).
86. Radiación solar. Available online: http://areas.geofisica.unam.mx/radiacion_solar/irradiacion.php (accessed online: 20 October 2021).
87. Cruz, H. Evaluación de las distintas alternativas para los sistemas de enfriamiento de reactores nucleares generación III en el sitio de Laguna Verde. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.; México, 2013.
88. CICESE. Available online: <http://clicom-mex.cicese.mx> (accessed online: 15 February 2020).
89. Policastro, J.; Tokar, J. Heated Effluent Dispersion in Large Lakes: State-of-the-Art of Analytical Modeling. Part I. Critique of Model Formulations, ANL/ES-11, 1972; pp. 90-139.
90. Slagter, B.; Tsendbazar, N.-E.; Vollrath, A.; Reiche, J. Mapping wetland characteristics using temporally dense Sentinel-1 and Sentinel-2 data: A case study in the St. Lucia wetlands, South Africa. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, **2020**, 86, 102009, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102009>
91. Short, N. The Landsat tutorial workbook. In: Basics of satellite remote sensing. Washington, DC: NASA Science and Technical Information Branch. NASA Reference Publication 1078, 1982.
92. Markham, B.; Arvidson, T.; Barsi, J.; Choate, M.; Kaita, E.; Levy, R.; Lubke, M.; Masek, J. Landsat program. *Comprehensive Remote Sensing (Vols. 1–9)*. Elsevier. 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10313-6>
93. USGS. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*, Version 5; Department of the Interior, U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2019.
94. Yu, X.; Guo, X.; Wu, Z. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS- Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sens.* **2014**, 6, 9829–9852, <https://doi.org/10.3390/rs6109829>.
95. Snyder, J.; Boss, E.; Weatherbee, R.; Thomas, A.C.; Brady, D.; Newell, C. Oyster Aquaculture Site Selection Using Landsat 8-Derived Sea Surface Temperature, Turbidity, and Chlorophyll A. *Front. Mar. Sci.* **2017**, 4, 190, <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00190>.
96. Allen, R.G.; Tasumi, M.; Morse, A.; Trezza, R.; Wright, J.L.; Bastiaanssen, W.; Kramber, W.; Lorite, I.; Robison, C.W. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2007**, 133, 395–406, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(395)).

97. Wukelic, G.E.; Gibbons, D.E.; Martucci, L.M.; Foote, H.P. Radiometric Calibration of Landsat Thematic Mapper Thermal Band. *Remote Sens. Environ.* **1989**, *28*, 339–347, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90125-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90125-9).
98. Newman, S.M.; Smith, J.A.; Glew, M.D.; Rogers, S.M.; Taylor, J.P. Temperature and Salinity Dependence of Sea Surface Emissivity in the Thermal Infrared. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2005**, *131*, 2539–2557, <https://doi.org/10.1256/qj.04.150>.
99. Telford, R.J.; Birks, H.J.B. The Secret Assumption of Transfer Functions: Problems with Spatial Autocorrelation in Evaluating Model Performance. *Quat. Sci. Rev.* **2005**, *24*, 2173–2179, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.05.001>.
100. Ghani, A.A.; Zakaria, N.A.; Kiat, C.C.; Ariffin, J.; Hasan, Z.A.; Abdul Ghaffar, A.B. Revised Equations for Manning’s Coefficient for Sand-Bed Rivers. *Int. J. River Basin Manag.* **2007**, *5*, 329–346, <https://doi.org/10.1080/15715124.2007.9635331>.
101. Archivo de tiempo en Veracruz (Aeropuerto), METAR. Available online: [https://rp5.ru/Archivo_de_tiempo_en_Veracruz_\(aeropuerto\),_METAR](https://rp5.ru/Archivo_de_tiempo_en_Veracruz_(aeropuerto),_METAR) (accessed on 13 October 2020).
102. Stelling, G.; Leendertse, J. Approximation of convective processes by cyclic AOI methods. In *Estuarine and Coastal Modeling*; Spaulding, M., Bedford, K., Blumberg, A., Eds.; American Society of Civil Engineers: Tampa, FL, USA, 1992; pp. 771–782.
103. Knobon, W.J.M.; Freer, J.E.; Woods, R.A. Technical Note: Inherent Benchmark or Not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta Efficiency Scores. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2019**, *23*, 4323–4331, <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>.
104. Bezuglyi, B.A.; Ivanova, N.A.; Sizova, L.V. Transport Phenomena and Dimensionless Numbers: Towards a New Methodological Approach. *Eur. J. Phys.* **2017**, *38*, 033001, <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa565d>.
105. Çengel, Y.; Cimbala, J.; Turner, R. *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*, 5th ed.; McGraw Hill Education: New York, NY, USA, 2017; pp. 828–829.
106. MIA-Regional. Available online: <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Gu%C3%ADas%20SEMAR%20NAT/MIA,%20Informe%20Preventivo%20y%20DTU/MIA%20Regional/MIA%20Regional.pdf> (accessed on 05 May 2022).
107. LGEEPA. Available online: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/148.pdf> (accessed on 05 May 2022).

Anexos

Apéndice A

Artículo del XXIX congreso Latinoamericano de Hidráulica
México 2021

**XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO NACIONAL DE HIDRÁULICA
ACAPULCO, MÉXICO, ABRIL DE 2021**

**EFICIENCIA DE LOS MODELOS DE TURBULENCIA EN LA
SIMULACIÓN NUMÉRICA DE PLUMAS TÉRMICAS. APLICACIÓN A LA
DESCARGA DE LA CENTRAL NUCLEOELÉCTRICA DE LAGUNA
VERDE**

Luis F. Laguna-Zarate¹; Héctor A. Barrios Piña²; Hermilo Ramírez-León³

¹Tecnológico de Monterrey, México, A00824102@itesm.mx; ²Tecnológico de Monterrey, México, hector.barrios@tec.mx; ³PIMAS Proyectos de Ingeniería y Medio Ambiente S. A., México, hramirezl.pimas.consultores@gmail.com

RESUMEN:

El objetivo de este trabajo es evaluar diversos modelos de turbulencia para el estudio de la dispersión de plumas térmicas en zonas costeras, teniendo como objetivo comparar su pertinencia en el caso de estudio. El caso de aplicación comprende las inmediaciones de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV), en el Golfo de México (GDM), donde aguas producto del proceso de enfriamiento son vertidas al mar con una temperatura superior. El modelo implementado es calibrado a través de imágenes de satélite que representan la pluma térmica con la técnica de telemetría. Posteriormente, los efectos de la descarga térmica son investigados para un escenario definido, considerando la interacción océano-atmósfera, así como políticas de operación de la CNLV. Los resultados de las simulaciones numéricas con 3 diferentes modelos de turbulencia: Algebraico, k-L y k- ϵ ; son comparados y analizados con la imagen de satélite del escenario definido, enfocándose en las temperaturas calculadas de la pluma térmica y su área de influencia. Con estos resultados, se espera proveer de información a los tomadores de decisiones de la Comisión Federal de Electricidad, para mejorar la eficiencia de los sistemas de enfriamiento de la CNLV en el proceso de toma y vertido de agua de mar, y la mitigación del impacto al medio marino.

ABSTRACT:

The objective of this work is to evaluate diverse turbulence models for the study of thermal plume dispersion in coastal areas, with the aim of comparing their relevance in the case study. The case study includes the vicinity of the Laguna Verde Nuclear Power Plant (CNLV), in the Gulf of Mexico (GOM), where water derived from the cooling process is discharged into the sea at a higher temperature. The numerical model is calibrated through satellite images that represent the thermal plume through remote sensing. Subsequently, the effects of thermal discharge are investigated for a defined scenario, considering the ocean-atmosphere interaction, as well as CNLV's operating policies. The results of numerical simulations with 3 different turbulence models: Algebraic, k-L and k- ϵ ; are compared and analyzed with the satellite image of the defined scenario, focusing on the calculated temperatures of the thermal plume and its area of influence. With these results, it is expected to provide information to decision-makers of the Federal Electricity Commission, to improve the efficiency of CNLV's cooling systems in the process of intake and discharge seawater, and to mitigate the impact on the marine environment.

PALABRAS CLAVES: pluma térmica; Central Nucleoeléctrica; modelación numérica; zona costera

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se ha presentado un creciente problema con la actividad contaminante a diferentes cuerpos de agua. La contaminación de las costas deriva en alteraciones a los parámetros fisicoquímicos y biológicos de las aguas; dicha contaminación es resultado de actividades agrícolas, industriales, domésticas y descargas térmicas provenientes de plantas termoeléctricas y nucleoeeléctricas por mencionar algunas.

La contaminación térmica se puede definir como cualquier variación de la temperatura ambiente. A pesar de que al concepto de contaminación térmica pueda ser utilizado para los decrementos de temperatura, en la práctica se asocia para referirse a los incrementos de la temperatura del agua en ríos, lagos y zonas costeras, con las consecuencias que genera como la degradación a la calidad del agua. Desde una perspectiva ambiental, los gradientes de temperatura pueden alterar significativamente a los ecosistemas acuáticos (Huang et al, 1998). Consecuentemente, la contaminación térmica es vista como una amenaza severa para los ecosistemas acuáticos costeros en el mundo, y su uso industrial como agente enfriador es catalogado como la principal causa.

Es bien sabido que las plantas de energía típicamente toman el agua de zonas cercanas a la costa para enfriar su maquinaria (Gaeta et al, 2020), y posteriormente es regresada al cuerpo receptor con temperaturas elevadas. Dicha agua vuelve al mar en calidad de efluente térmico, generalmente es de menor densidad que el cuerpo de agua, ocasionando un jet boyante que termina por elevar la pluma térmica (Bleninger et al, 2010). El efluente térmico frecuentemente es descargado por vías fluviales ya sean naturales o artificiales cuyo flujo casi siempre es caracterizado por la presencia de turbulencia.

Dichos flujos son altamente irregulares, caóticos, fluctuantes y denotan torbellinos tridimensionales en su evolución. Los flujos turbulentos han sido siempre un tema desafiante para ingenieros y científicos debido a su impacto en los cuerpos de agua. Las fluctuaciones turbulentas contribuyen al transporte de la cantidad de movimiento, calor y masa en este tipo de flujos, consecuentemente influyen en la velocidad, temperatura y distribución de concentraciones en los cuerpos de agua (Rodi, 2017).

Derivado de lo anterior, resulta necesario el uso de diversas metodologías para caracterizar este tipo de flujos y las plumas térmicas que forman. Por una parte, existen los modelos hidrodinámicos que permiten simular diversos escenarios para predecir el comportamiento de esos flujos turbulentos. Estos modelos deben contar con ciertas características para poder predecir estos procesos complejos: orden aceptable de precisión, capacidad de manejo de geometrías irregulares, incorporación de variables atmosféricas y modelos de cierre de turbulencia (Yu y Yu, 2009).

Por otra parte, otro tipo de metodología que se utiliza para la caracterización de las plumas térmicas es la teledetección (Ma et al, 2017). El uso de datos de teledetección remota se emplea como una alternativa al monitoreo de la pluma térmica en sitio, permite reflejar la variación espacial de la pluma térmica y eficazmente monitorear la dinámica térmica en la superficie de los cuerpos de agua (Thomas et al, 2002).

De este modo, el objetivo del presente trabajo es comparar diferentes modelos de turbulencia a fin de evaluar su pertinencia para el caso de dispersión de pluma térmica en el mar. El caso de estudio es el de la descarga térmica de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, Veracruz México, única en su tipo en el país. Durante años, se ha previsto que la pluma recircula hacia la obra de toma, bajo ciertos escenarios climáticos, generando con esto la captación de agua caliente para los sistemas de enfriamiento, causal de una baja de rendimiento.

MÉTODOS Y METODOLOGÍA

Caso de estudio

La CNLV está localizada (ver Figura 1) en el municipio de Alto Lucero, Veracruz, México. Administrada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), tiene una capacidad de producción de 1.64GW y tiene influencia en el área del Golfo de México.

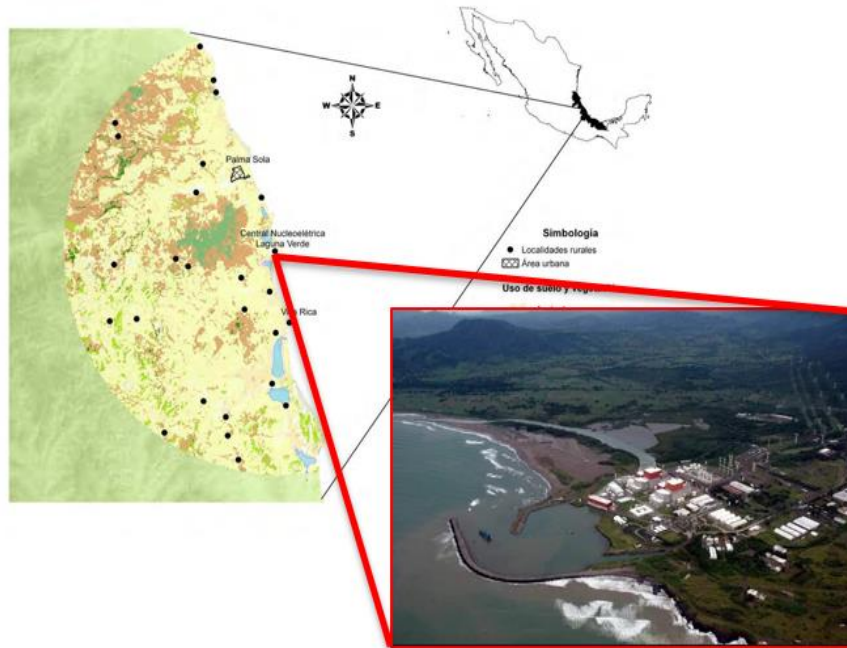


Figura 1.- Localización de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, Veracruz, México

Modelo numérico

El modelo numérico utilizado en este trabajo es el Delft3D-FLOW desarrollado por Deltares y ha sido ampliamente utilizado para diversos estudios de hidrodinámica marítimo-costera. El modelo simula flujo no estacionario en cuerpos de agua a superficie libre y puede ser aplicado en escenarios 2D y 3D. Las ecuaciones que resuelve son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv \\ = -g \left[\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \int_{z'=z}^{z'=\zeta} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right) dz' \right] + v_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + v_V \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad [1]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu \\ = -g \left[\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \int_{z'=z}^{z'=\zeta} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right) dz' \right] + v_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + v_V \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad [2]$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = Q. \quad [3]$$

Estas ecuaciones se acoplan con la ecuación de temperatura siguiente:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_H \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_V \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q_{tot}}{\rho_0 c_{pw}}, \quad [4]$$

donde u y v son las velocidades en el plano horizontal (m/s), en las direcciones x - y y , respectivamente; w es la componente de velocidad vertical (m/s); ρ_0 es la densidad (kg/m^3); g es la aceleración de la gravedad (m/s^2); ζ representa la variación de la superficie libre con referencia un plano (m); ν_H and ν_V son los coeficientes de viscosidad turbulenta horizontal y vertical, respectivamente (m^2/s); Q es la fuente o sumidero global por unidad de área (m/s); y f es el parámetro de Coriolis (1/s). En la Ec. (4), T es la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$); D_H y D_V son los coeficientes de difusión térmica horizontal y vertical, respectivamente; Q_{tot} es el flujo de calor en la superficie libre del agua ($\text{J}/(\text{m}^2\text{s})$) y c_{pw} es el calor específico del agua.

Los modelos de turbulencia disponibles en Delft3D-FLOW para caracterizar las escalas de turbulencia son cuatro: coeficientes constantes, un modelo algebraico (AEM), un modelo $k-L$ y un modelo $k-\varepsilon$. Los últimos tres modelos citados son los que se utilizaron en este presente trabajo. Además, para cada modelo de turbulencia el Delft3D-FLOW, se activó el módulo HLES (Horizontal Large Eddy Simulation) que permite caracterizar los fenómenos de gran escala a través de una aproximación de submalla. Detalles específicos como la discretización espacial, el método de integración temporal, modelación de la turbulencia y demás parámetros a considerar, se pueden consultar en Deltares (2011).

Implementación del modelo numérico al caso de estudio

El dominio computacional utilizado para las simulaciones se muestra en la Figura 2. La superficie cubre un frente de costa de 6 km y se extiende 3.3 km mar adentro. Se consideraron una serie de puntos de monitoreo para el análisis de resultados, los cuales se distribuyen a lo largo de la costa, como se muestra en la Figura 2. La obra de toma de la CNLV, junto al canal de descarga, se localiza en la línea costera, teniendo un gasto de succión de $63 \text{ m}^3/\text{s}$. En el norte, sur y al este se consideran fronteras abiertas, donde, para las simulaciones numéricas, se imponen al norte y sur corrientes y la marea en el este. Los vientos se asumen como uniformemente distribuidos en el área de estudio. Asimismo, se consideró la descarga del río El Viejón, que se encuentra al sur del canal de descarga de la CNLV, con un gasto constante de $5.18 \text{ m}^3/\text{s}$, según el estudio hidrológico para la época de secas.

Información referente a parámetros físicos que prevalecen en la zona de estudio, para generar las condiciones iniciales y de frontera del escenario considerado, fue obtenida por investigación en sitio y compilación bibliográfica. Parte de esta información se obtuvo de la Comisión Federal de Electricidad, de la Comisión Nacional del Agua y del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

La malla de cálculo se compone de 18,172 celdas curvilíneas, cuyos espaciamentos varían entre 21.5 m y 22.7 m en ambas direcciones. En la vertical se consideraron 5 capas distribuidas en todo el dominio con espesores igualmente repartidos, aprovechando las coordenadas sigma que ofrece el modelo Delft3D-FLOW.

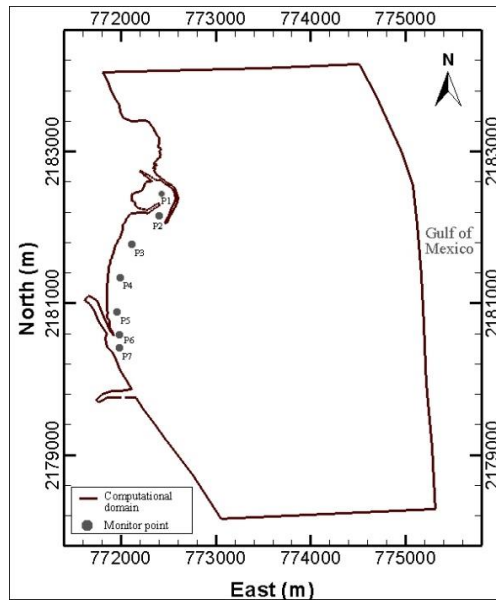


Figura 2.- Dominio computacional

Con base en un análisis exhaustivo de imágenes de satélite generadas con teledetección, se definió el escenario de simulación, tratando de que fuera un caso en el que la pluma térmica recircula hacia la obra de toma. Este es un escenario no deseado para los fines de operación de los sistemas de enfriamiento de la CNLV, ya que, al captar agua caliente, los sistemas de enfriamiento bajan su rendimiento. De este modo, el periodo de simulación se definió del 15 al 19 de mayo de 2017 (Figura 3). Las imágenes analizadas fueron calibradas y validadas con datos de la Secretaría de Marina (SEMAR) y del satélite Landsat 8 por medio de las bandas 10 y 11 de infrarrojo térmico respectivamente (García, 2020). Dichas imágenes evalúan la dispersión térmica emitidas por la descarga de CNLV.

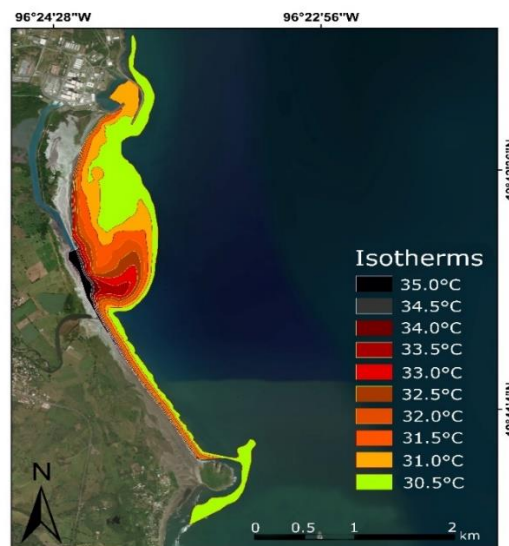


Figura 3.- Imagen satelital del 17 de mayo del 2017 de la pluma térmica de la CNLV. Escenario considerado para el estudio numérico.

RESULTADOS

En la Figura 4 se muestran los campos de temperatura de la superficie libre del agua obtenidos de las simulaciones numéricas con los diferentes modelos de turbulencia, con y sin el módulo de submalla HLES. Los campos de temperatura corresponden a la fecha del 17 de mayo del 2017 a las 11:45 h, misma fecha que para el caso de la imagen satelital de la Figura 3. Se observa que en general,

el modelo reproduce la dispersión de la pluma térmica con dirección hacia la obra de toma, tal como se determinó a través de la técnica con teledetección ilustrada con la imagen de satélite (Figura 3). La gama de colores permite observar ligeras diferencias entre las simulaciones sin HLES y con HLES, resultando en un mayor calentamiento en la zona de la obra de toma cuando se considera el módulo de submalla HLES. Entre cada modelo de turbulencia, no se logran apreciar grandes diferencias.

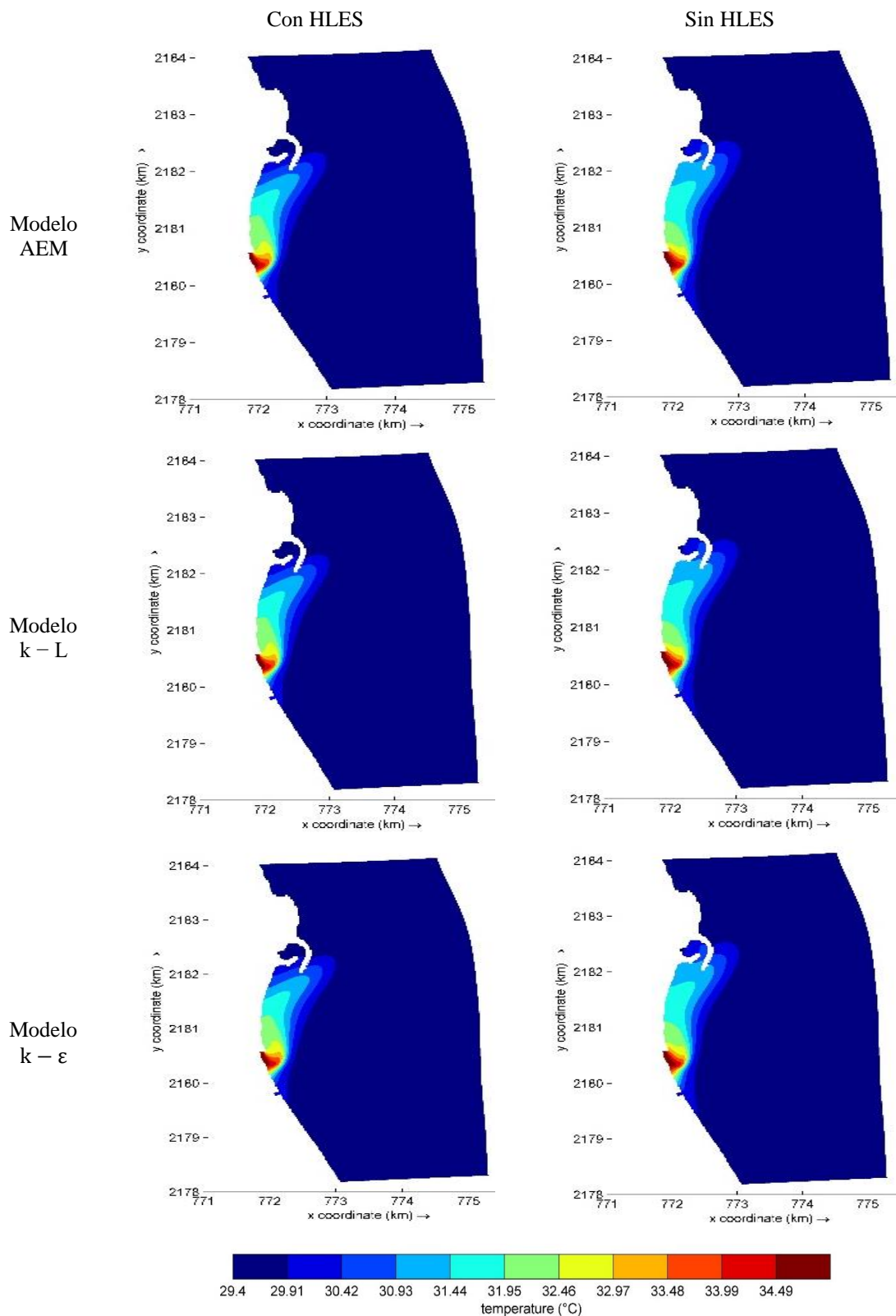


Figura 4.- Campos de temperatura calculados correspondientes al 17 de mayo a las 11:45 h.

En la Figura 5 se graficaron los valores de las temperaturas de la capa superficial en los puntos de monitoreo (ver Figura 2). Las gráficas muestran todos los resultados de las simulaciones, con los modelos de turbulencia considerados, con y sin el módulo de submallá HLES, y las temperaturas obtenidas con teledetección (línea sólida roja) que sirve como referencia. Con ayuda de estas gráficas es posible observar las diferencias entre una y otra simulación, donde en algunos casos en unos puntos se subestima la temperatura y en otros se sobreestima, respecto de la temperatura de la telemetría. No obstante, en todos los casos la pendiente de decaimiento es muy similar a la de referencia.

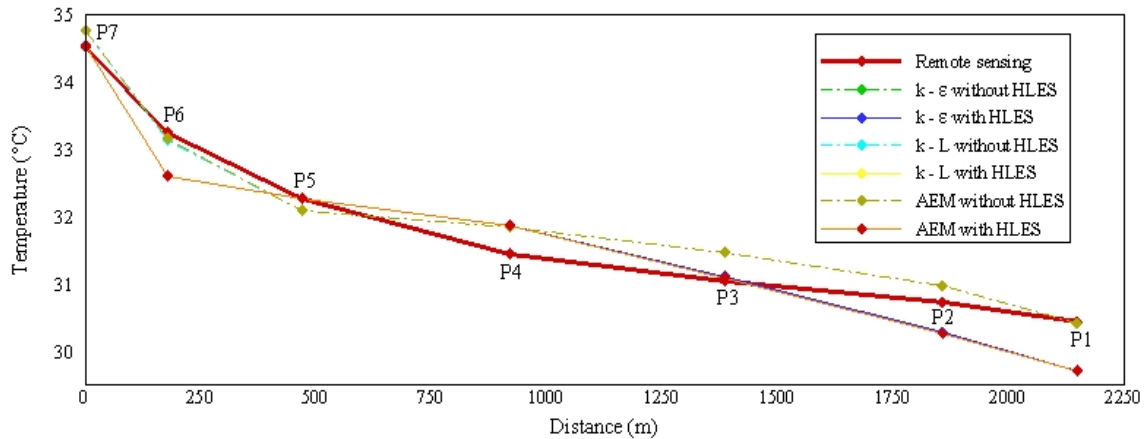


Figura 5.- Curvas de decaimiento de la temperatura en la superficie libre para las diferentes simulaciones.

Para cuantificar el error tomando como referencia la temperatura generada con telemetría, se calculó la norma Nash-Sutcliffe (NS) a través de la expresión siguiente:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [T_{RS}(i) - T_{sim}(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [T_{RS}(i) - \bar{T}]^2}, \quad [5]$$

donde T_{RS} y T_{sim} son las temperaturas obtenidas con telemetría y las temperaturas obtenidas con las simulaciones numéricas, respectivamente; y \bar{T} es la temperatura promedio de las obtenidas con telemetría. El rango de esta norma es de $(-\infty, 1]$, donde 1 es una aproximación perfecta. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Resultados de la norma de Nash Sutcliffe

Criterio	con HLES			sin HLES		
	AEM	k - L	k - ε	AEM	k - L	k - ε
NS	0.898215	0.898617	0.899848	0.961027	0.961380	0.961195

De los resultados del análisis con la norma de Nash Sutcliffe se concluye que se logra una mejor aproximación cuando no se activa el módulo de submallá HLES, ya que los valores de NS son más aproximados a 1. Además, prácticamente no hay diferencia entre los resultados de la dispersión térmica generada con los diferentes modelos de turbulencia, con y sin HLES. Evidentemente, estos resultados se generaron con un proceso riguroso de calibración, manipulando los parámetros pertinentes en el modelo Delft3D Flow, por lo que los campos de temperatura que se muestra en este trabajo corresponden a la mejor aproximación obtenida en el proceso, para cada modelo de turbulencia utilizado.

CONCLUSIONES

En este trabajo se llevaron a cabo simulaciones numéricas para predecir el comportamiento en el mar de la pluma térmica de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, Veracruz, México. Se

realizaron simulaciones numéricas utilizando el modelo Delft3D-FLOW, considerando diferentes modelos de turbulencia. Para fines de validación, se tomó como referencia una imagen satelital, previamente calibrada y validada para un escenario de dispersión, con condiciones ambientales particulares que originaron la recirculación de la pluma térmica hacia la obra de toma.

Los resultados muestran que las simulaciones de la dispersión térmica en la zona costera frente a la CNLV son muy similares utilizando uno u otro modelo de turbulencia. Se observó que se logra una menor aproximación a los datos de referencia de la imagen de satélite cuando se activa el módulo de submalla HLES, que tiene integrado el Delft3D-FLOW para complementar la precisión de los modelos de turbulencia.

Como perspectiva, este trabajo se continuará realizando para otros escenarios climáticos, una vez que se implementó y calibró el modelo para las condiciones de la zona de estudio. Estos escenarios pueden aportar información a los tomadores de decisión de la Comisión Federal de Electricidad, en la reestructuración de la descarga térmica de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde.

REFERENCIAS

- Bleninger, T., Niepelt, A., and Jirka, G.H.** (2010) “Desalination plant discharge calculator.” *Desalination and Water Treat.*, 13(13),156–173.
- Deltares** (2011) Delft3D-Flow User Manual, 3.15ed.; Delft, The Netherlands.
- Huang, X. Zhu, Z., Xu, M. y Jing, Q.** (1998) “Variation of water temperature in the southwestern Daya Bay before and after the operation of Daya Bay Nuclear powerplant.” *Report annual research reports, marine biology research station at Daya Bay*, Beijing, China, pp 102-112.
- Gaeta, M. G., Samaras, A. G., & Archetti, R.** (2020). “Numerical investigation of thermal discharge to coastal areas: A case study in South Italy.” *Environmental Modelling and Software*, 124(June 2019), 104596. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104596>
- García, R.** (2020) Análisis de dispersión de la pluma térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde mediante teledetección. (Tesis de maestría en proceso.) IITCA - UAEMex.
- Ma, P., Dai, X., Guo, Z., Wei, C., & Ma, W.** (2017). “Detection of thermal pollution from power plants on China’s eastern coast using remote sensing data.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31(8), 1957–1975. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1293-8>
- Rodi, W.** (2017). “Turbulence modeling and simulation in hydraulics: A historical review.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(5), 1–20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001288)
- Thomas, A., Byrne, D., & Weatherbee, R.** (2002). “Coastal sea surface temperature variability from Landsat infrared data.” *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 262–272. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00004-4)
- Yu, L., & Yu, J.** (2009). “Numerical research on flow and thermal transport in cooling pool of electrical power station using three depth-averaged turbulence models.” *Water Science and Engineering*, 2(3), 1–12. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.03.001>



Apéndice B

Artículo publicado en una revista indizada en Scopus

<https://doi.org/10.3390/jmse9121437>

Article

Analysis of Thermal Plume Dispersion into the Sea by Remote Sensing and Numerical Modeling

Luis Laguna-Zarate ¹, Héctor Barrios-Piña ^{1,*}, Hermilo Ramírez-León ², Raudel García-Díaz ³
and Rocio Becerril-Piña ⁴

¹ Tecnológico de Monterrey, Eugenio Garza Sada 2501, Tecnológico, Monterrey 64700, Mexico; luis.laguna@tec.mx

² Proyectos de Ingeniería y Medio Ambiente S.C. Eten 577, Lindavista, Gustavo A. Madero, Ciudad de Mexico 07300, Mexico; hramirezl.pimas.consultores@gmail.com

³ Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de Mexico, Carretera Toluca-Atlaconulco, Toluca 50200, Mexico; calidaddenpa@gmail.com

⁴ Red Lerma-Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de Mexico, Carretera Toluca-Atlaconulco, Toluca 50200, Mexico; rbecerrilp@uaemex.mx

* Correspondence: hector.barrios@tec.mx

Abstract: The aim of this work was to study, by remote sensing and numerical modeling, the thermal dispersion of a plume discharged into the sea by a nuclear power plant. The case study is the thermal discharge of the Laguna Verde nuclear power plant, located on the coast of the Gulf of Mexico. First, the thermal plume dispersion was characterized by applying remote sensing for different scenarios. Afterwards, Delft3D-FLOW numerical simulations were performed to expand the analysis of the thermal processes for a case in which the thermal plume tends towards the intake of the power plant. This thermal analysis was carried out by comparing the behavior of different dimensionless parameters. Moreover, the results of the numerical simulations were used to investigate the performance of the AEM and the $k-L$ and $k-\epsilon$ turbulence models, available in the Delft3D-FLOW model. An LES turbulence model contribution was also analyzed. The results show that forced convection is predominant near the plume discharge area and at the vicinity of the intake structure. According to the metrics calculated, all turbulence models produced good agreement with the remote sensing data, except when the LES scheme was considered. Finally, the use of remote sensing and numerical simulations is helpful to better understand thermal plume dispersion.

Keywords: coastal hydrodynamics; turbulence modeling; remote sensing; thermal plume discharge



Citation: Laguna-Zarate, L.; Barrios-Piña, H.; Ramírez-León, H.; García-Díaz, R.; Becerril-Piña, R. Analysis of Thermal Plume Dispersion into the Sea by Remote Sensing and Numerical Modeling. *J. Mar. Sci. Eng.* **2021**, *9*, 1437. <https://doi.org/10.3390/jmse9121437>

Academic Editor: Wei-Bo Chen

Received: 5 October 2021

Accepted: 19 November 2021

Published: 15 December 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Coastal zones are preferred locations for the operation of power plants due to the vast availability of seawater, which is used for cooling purposes. The water supply required by a nuclear power plant is higher than any other power source for a similar output by a factor of between 30% and 100% [1]. When the cooling cycle is complete, water is returned to the sea at an increased temperature. Consequently, thermal pollution is generated by thermal plumes that are mixed into the sea.

From an environmental point of view, thermal plumes are the cause of destruction and imbalance in marine life. Metabolic rates are increased and dissolved oxygen is reduced, causing a series of harmful events that gradually increase in severity [2,3]. This seriously endangers aquatic ecosystems [4]. Thermal plumes cause changes in flow, altering the environment for the proper feeding of some marine species. Such environments, in which low Reynolds numbers can be observed under normal conditions, are disturbed; consequently, the feeding mechanisms become altered by phenomena typical of turbulent flows, such as raking or stirring [5].

From an operational point of view, a problem may arise with the recirculation of warmer water to the intake structure if the discharge outlet is located incorrectly. This

could result in diminishing power plant efficiency, resulting in less energy generation. For these reasons, the thermal dispersion of such plumes must be studied and monitored to determine their area of influence and effects. In coastal zones, field measurements are typically taken using thermistor chains, multiparameter meters, and CTDs (conductivity, temperature, and depth) to collect data. In recent years, the remote sensing (RS) technique has been used to study thermal plumes [6–8], since it allows for the monitoring of the spatiotemporal dynamics of the sea surface temperature (SST) [9]. RS involves the calibration of satellite images with in situ measurements to extend their validity to the entire area of influence of the thermal plume. Numerical models are also applied to simulate and predict the thermal dispersion for different scenarios.

Over the last few years, numerical simulations have become the most essential technique to conduct research, given the valuable background knowledge they can provide. Although several numerical models have been used to analyze the problems of thermal pollution due to discharge from power plants [10–14], the small-scale transport effects of thermal plumes discharged into natural or artificial waterways are rarely studied [15]. Moreover, the effects of the turbulent viscosity and diffusivity are modeled using only constants, or at best using simple phenomenological algebraic formulas [16]. In some cases, those effects are analyzed in stagnant (still) water. At the coastal zone, several experimental and numerical results have provided evidence that vertical diffusion is as important as the horizontal one [17]. Therefore, to achieve a better understanding in regard to the turbulent dynamics of thermal discharges into the sea, its features should be analyzed in moving water [18]. For the latter scenario, different values of both horizontal and vertical turbulent diffusivity must be considered. Thermal plumes emitted by thermal power plants are considered forced thermal plumes. This type of plume consists of a mixed flow pattern of pure plume and pure jet. Consequently, it is driven by both buoyancy and momentum [19]. Buoyancy provides forcing at all length scales [20], but most dominantly at the larger ones. Thermal forcing enhances local heating, intensifying the coupling between the transport of temperature, mass, and momentum, and it eventually generates turbulence.

Turbulence modeling at different scales requires intense computational effort, and the more sophisticated the model, the greater the computer resources needed to store and process data. In addition, extensive performance analyses of turbulence closure models are rarely carried out when solving environmental problems. Most turbulence closure models are based on the Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) approach and are used to characterize small scales in terms of both space and time [21]. Due to their simplicity, zero-equation models are widely applied, since they consider mean variables and the turbulent motion is grouped up in an energetic scale [22,23]. There are also one- and two-equation turbulence closure models, such as the $k - L$ and $k - \epsilon$ models, respectively. Such models, available in several open-source or in non-free numerical models, have been applied to a wide variety of flows in many tests and applications, achieving reasonable success [24]. In addition, when selecting a particular model, factors such as the data available for calibration and validation of its coefficients, computer resources, and the user expertise should be considered.

As alternatives to RANS models, there are large-eddy simulation (LES) models and direct numerical simulation (DNS). In LES models, all turbulent motion is resolved with the grid scale, and the fluctuations are modeled by a sub-grid-scale model. Some numerical simulations with LES models of shallow water flows can be observed in [25]. For real-life applications in hydraulics or complex cases, its performance has not been fully analyzed. On the other hand, the applications of DNS are limited, since the simulation of turbulence at all scales demands considerable computing resources, reducing DNS to cases for low Reynolds numbers.

This paper focused on the study of a thermal plume dispersion into the sea, applying a methodology based on RS and numerical simulation. When combining these techniques, insightful data were obtained beyond the individual limitations of each technique. The case study is the thermal plume emitted by the Laguna Verde nuclear power plant (LVNPP), the

only nuclear power plant in Mexico. Few studies have analyzed the environmental impacts and plume recirculation of LVNPP discharge [26–28]. To advance the knowledge of how such thermal discharge behaves, the main objective of this paper is to analyze LVNPP plume dispersion with the RS technique for different climate scenarios. In addition, with the aid of numerical simulations for a specific case in which the plume recirculates towards the intake structure, thermodynamic analysis was carried out with proper dimensionless numbers. For this purpose, the Delft3D-FLOW numerical model developed by Deltares Institute of Netherlands was used. Some works have been carried out to describe its design [29], development [30], and validation [31]. Numerical simulations were compared against the RS data used for calibration. To enable further analysis in terms of turbulence modeling, the results obtained from three different models are presented: the algebraic eddy viscosity model and the $k - L$ and $k - \epsilon$ turbulence closure models. The Delft3D-FLOW model was calibrated based on the eddy viscosity and eddy diffusivity coefficients, for both horizontal and vertical scales.

2. Materials and Methods

2.1. Case Study

The case study is the thermal plume discharged by the LVNPP in the coastal zone of Veracruz State, Mexico, located in the Gulf of Mexico (GOM) (Figure 1). The LVNPP covers an area of about 400 ha and has two main reactors, each with a production capacity of 810 MW, providing clean energy at a rate of 5% of the Mexican national electricity system. A flow of seawater of $63 \text{ m}^3/\text{s}$ is withdrawn via the intake structure [28] to cool the heat exchangers down, and this water flow is returned to the sea through a 50 m wide channel after the cooling process. The mean estimated temperature difference between the inflow and outflow is 7°C .

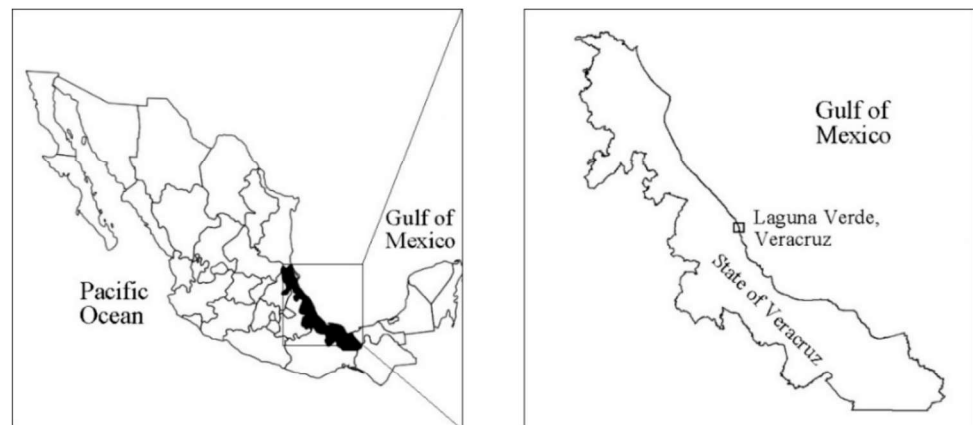


Figure 1. Location of the Laguna Verde nuclear power plant, Mexico.

2.2. Numerical Model

The numerical model used to perform the numerical simulations in this work is Delft3D-FLOW, which has been applied worldwide to several hydrodynamic and thermal studies in coastal zones [13,32–34]. The set of partial differential equations solved by the model is

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -g \left[\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \int_{z'=z}^{z'=\zeta} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right) dz' \right] + \nu_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \nu_V \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -g \left[\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \int_{z'=z}^{z'=\zeta} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right) dz' \right] + \nu_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \nu_V \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = Q, \tag{3}$$

where u and v are the horizontal velocities (m/s) in the x - and y -directions, respectively; w is the vertical component of velocity (m/s); ρ_0 is the reference density (kg/m^3); g is the acceleration due to gravity (m/s^2); ζ represents the water level variation (m) above the horizontal plane of reference; Q is the global source or sink per unit area (m/s); f is the Coriolis parameter (1/s). The coefficients ν_H and ν_V represent the horizontal and vertical eddy viscosity (m^2/s), respectively, computed as

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_V + \nu_H^{back}, \tag{4}$$

$$\nu_V = \nu_{mol} + \max(\nu_{3D}, \nu_V^{back}), \tag{5}$$

where ν_{SGS} is the sub-grid scale horizontal eddy viscosity (m^2/s), which represents the contributions from the horizontal turbulence motion and forcing that are not resolved by the horizontal grid. The term ν_H^{back} is the background horizontal viscosity (m^2/s). In Delft3D-FLOW, ν_{SGS} is computed using the sub-grid model HLES. The coefficient ν_{SGS} is a term that depends on variables such as grid size, water depth, the spatial low-pass filter coefficient, and the sum of the strain rates. The kinematic viscosity of water is represented by ν_{mol} (m^2/s), ν_{3D} is the fraction of the eddy viscosity (m^2/s) due to the turbulence model in the vertical direction, and ν_V^{back} is the background vertical eddy viscosity (m^2/s).

The system of equations is coupled with the following temperature equation:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_H \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_V \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q_{tot}}{\rho_0 c_{pw}}, \tag{6}$$

where T is the water temperature ($^\circ\text{C}$), Q_{tot} is the total heat flux through the free surface ($\text{J}/(\text{m}^2\text{s})$), and c_{pw} is the specific heat of water. The coefficients D_H and D_V are the horizontal and vertical eddy diffusivity coefficients (m^2/s), respectively, defined as

$$D_H = D_{SGS} + D_V + D_H^{back}, \tag{7}$$

$$D_V = \frac{\nu_{mol}}{\sigma_{mol}} + \max(D_{3D}, D_V^{back}), \tag{8}$$

where D_{SGS} is the contribution of diffusion (m^2/s) to the sub-grid scale turbulence computed by the HLES model; D_H^{back} is the background horizontal eddy diffusivity coefficient (m^2/s); σ_{mol} is the Prandtl–Schmidt number for molecular mixing; D_{3D} is the diffusion (m^2/s) due to turbulence modeling in the vertical direction; D_V^{back} is the background vertical eddy diffusivity coefficient (m^2/s). The coefficients ν_H^{back} , ν_V^{back} , D_H^{back} , and D_V^{back} , which together account for all other forms of either unresolved turbulent motion or mixing, are typically used as calibration parameters [35].

2.3. Turbulence Modeling

Delft3D-FLOW can use four different turbulence closure models: the constant coefficient model, the algebraic eddy viscosity model (AEM), and the $k - L$ and $k - \epsilon$ models. The last three of these models were used in the present study to characterize the turbulence in the thermal dispersion problem. The coefficient ν_{3D} in Equation (5) is obtained from the well-known Kolmogorov–Prandtl expression:

$$\nu_{3D} = c_\mu^{\frac{1}{4}} L \sqrt{k} = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \tag{9}$$

where L is the mixing length (m), k is the turbulent kinetic energy (m^2/s^2), ϵ is the dissipation rate of the turbulent energy (m^2/s^3), and $c_\mu \approx 0.09$ is an empirical constant derived from the standard $k - \epsilon$ model.

The 3D contribution from the vertical eddy diffusivity in Equation (8) is obtained from the following relationship:

$$D_{3D} = \frac{v_{3D}}{\sigma_c}, \tag{10}$$

where σ_c is the Prandtl–Schmidt number.

In addition, Delft3D-FLOW is also capable of performing two-dimensional depth-averaged large-eddy simulations with its scheme HLES, which involves the Smagorinsky model [36] adapted with the considerations made in [37]. Specific details of the theoretical physics underpinning Delft3D-FLOW are discussed in [35].

2.4. Numerical Model Configuration

The area covered by the computational domain was defined based on the satellite images of [38] and the study of [39] to reproduce the thermal plume without boundary effects. The bathymetry varies from 0 to 28 m deep. Both the computational domain and the bathymetry used for the simulations are shown in Figure 2. Seven monitoring points were defined along the shoreline for calibration and validation to facilitate the discussion of the results (Table 1). To define the grid size, a mesh independence analysis was carried out, considering five different grids. The analysis was performed by applying the Nash Sutcliffe (NS) metric. As observed in Figure 3, the NS metric does not improve from Grid 3, and CPU time is considerably longer as the grid is refined from Grid 3 to Grid 4, so Grid 3 is applied in this study. The grid is composed of 18,172 curvilinear cells, with an average size of 21.5 and 22.7 m in the x - and y -directions, respectively (Figure 4); the Cartesian coordinate system of Delft3D-FLOW is used. Since the zone under analysis is shallow and thermal stratification is unlikely to occur, only five sigma layers were used in the vertical direction, distributed equally in each mesh point. The simulation period was configured from 15 May 2017, 00:00 h, to 17 May 2017, 11:00 h. The choice of this simulation time period is explained in Section 3.2.1. The first two days were treated as a warm-up phase in order to avoid spurious results from numerical oscillations. The computational time step was set to 0.01 min to meet the Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) criterion. The simulation period was run over employing the cyclic scheme of [40].

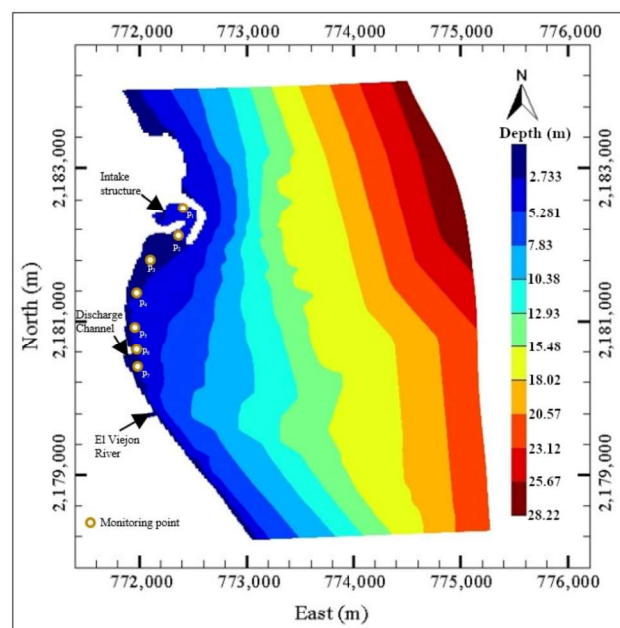


Figure 2. Bathymetry of the computational domain and monitoring points.

Table 1. Location of monitoring points.

Monitoring Points	Depth (m)	UTM Coordinates ¹		Geographic Coordinates	
		East (m)	North (m)	Latitude (°)	Longitude (°)
1	5.000	772,425.201	2,182,447.463	19.7187	−96.4009
2	3.085	772,400.956	2,182,157.199	19.7161	−96.4012
3	1.956	772,117.267	2,181,778.558	19.7127	−96.4039
4	2.967	771,987.358	2,181,333.401	19.7087	−96.4052
5	3.122	771,986.412	2,180,881.994	19.7047	−96.4056
6	2.438	771,986.412	2,180,590.917	19.7020	−96.4054
7	1.938	771,980.561	2,180,413.213	19.7004	−96.4054

¹ Zone: 14 N.

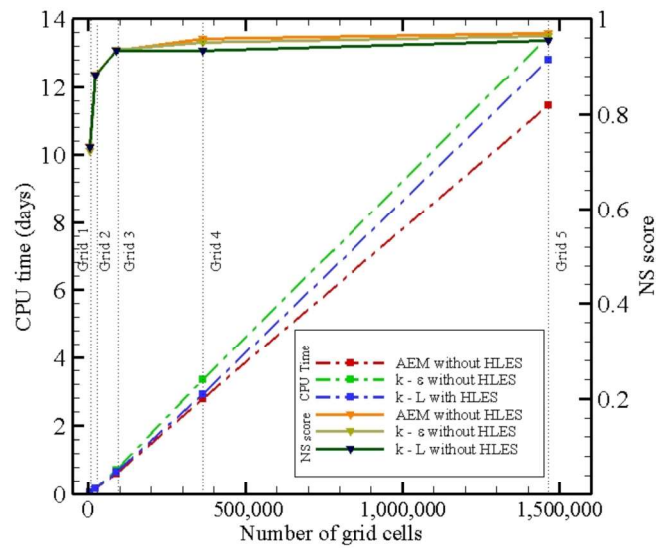


Figure 3. NS score obtained and CPU time for mesh independence analysis.

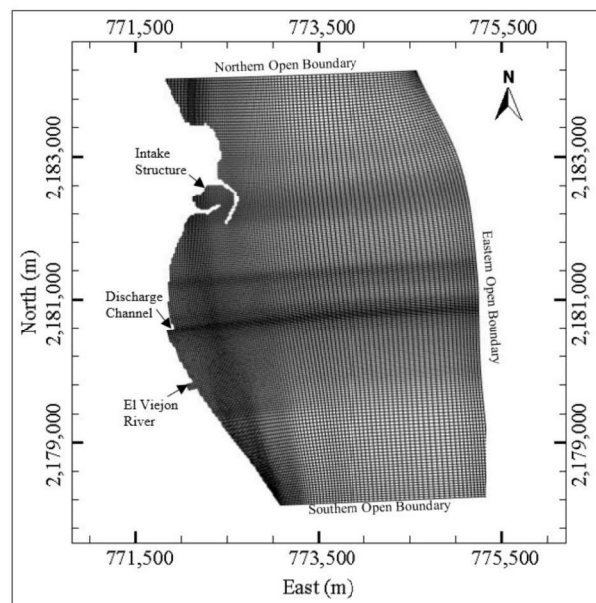


Figure 4. Grid and boundary conditions used in the numerical simulations.

2.5. Initial and Boundary Conditions

For the initial conditions, a uniform temperature of 29.4 °C was assumed over the entire computational domain. The velocities were set to 0 m/s, and the water level was set to the first data of the tide considered. The reference density was set to 1024 kg/m³, and a constant salinity was fixed to 33 ppt. Since the seabed is mostly composed of sand, a Manning roughness coefficient of 0.025 s/m^{1/3} was selected [41]. A free slip boundary condition was chosen for the wall roughness, and open boundary conditions were implemented as shown in Figure 4. Ocean currents generated with the HYCOM model were assigned at both the northern and southern open boundaries. Tides for the simulation period (Figure 5a) were obtained from the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) and set up at the eastern open boundary. Because of the lack of data in the specific location, the total solar radiation (Figure 5b) considered in the heat flux model was adapted from [42], whose case study is near the LVNPP. Other values used to configure the heat free surface flux model and wind stress at the free surface, such as the air temperature, cloud coverage, relative humidity, wind speed, and wind direction (Figure 5c), were obtained from the Veracruz airport [43].

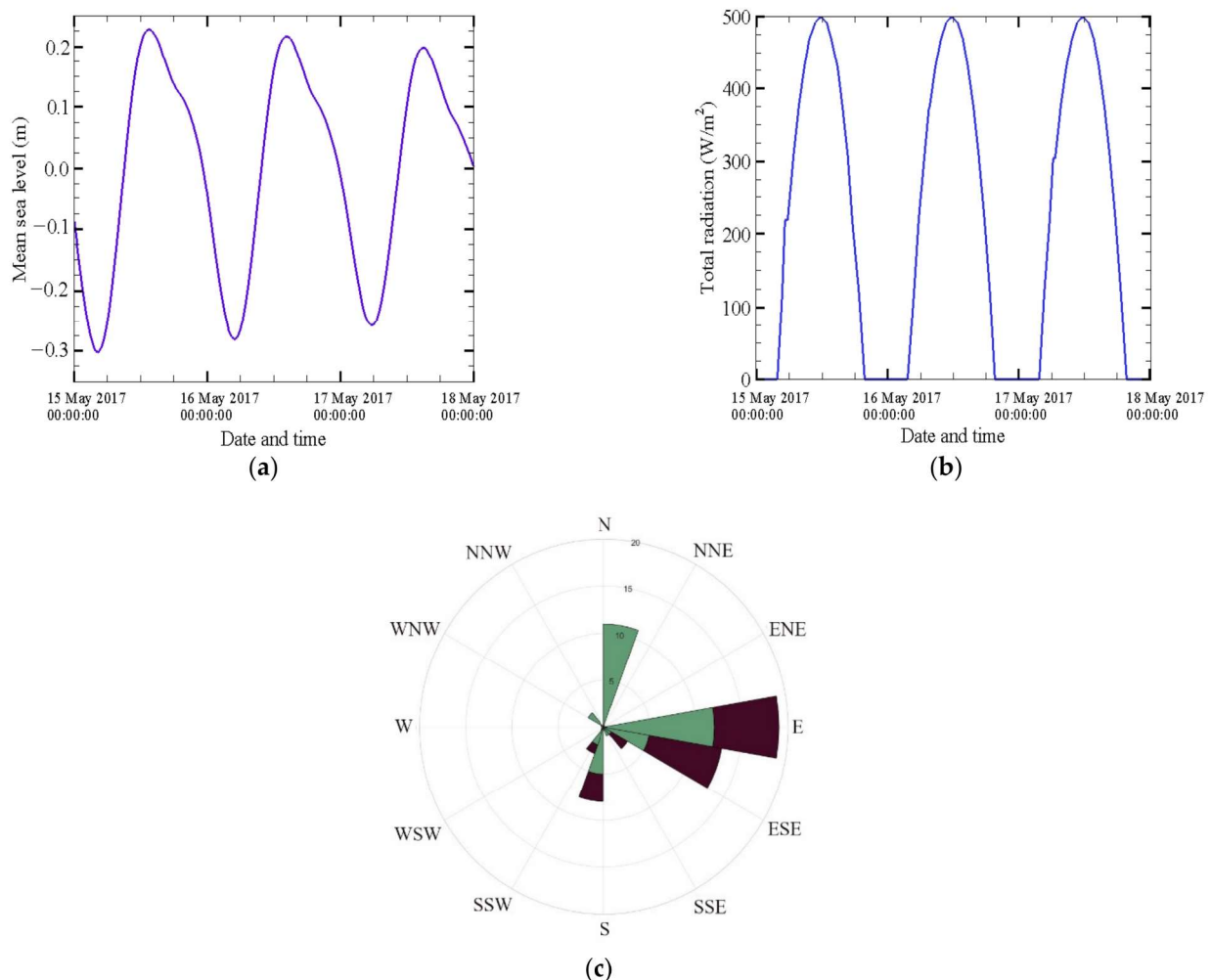


Figure 5. Metocean data: (a) tidal variation; (b) total solar radiation; (c) wind rose for the simulation period (wind speed in m/s).

The El Viejon river discharge was estimated by hydrological analysis, using a return period of two years, for a peak flow of 5.18 m³/s. Operation data for the LVNPP as a discharge channel and suction at the intake structure shown in Table 2 were taken

from [28]. Both the operation data and river discharge were assumed as constants over the whole simulation.

Table 2. LVNPP discharge and suction values used in the numerical simulations.

Boundary Condition	Value (m ³ /s)
Discharge channel	63
Intake structure (suction)	63

2.6. Remote Sensing Model

The Landsat 8 (L8) satellite is equipped with two sensors, the Operational Land Imager (OLI) and the Thermal Infrared Sensor (TIRS). TIRS has two bands in the thermal infrared region. The bands are delivered to a spatial resolution of 30 m. L8 covers the same area on the Earth every 16 days. Satellite data used in this study were the L1TP data obtained from the United States Geological Survey (USGS) [44]. The site of interest corresponds to Scene Path 24, Rows 46–47, and the satellite pass is around 11:00 h (local time), with a temporal resolution of 16 days. To avoid errors of interpretation, the selected images had clear-sky conditions with a maximum of 10% cloudiness. TIRS Band 10 (10.60 μm–11.19 μm) was used because the literature reports that it has fewer alterations due to water vapor content and sensitivity to errors in atmospheric profiles [45,46]. The data was converted from digital number to spectral radiance ($L_{t,10}$) using radiance scaling factors provided in the metadata file [47]. The SST was calculated by the following modified Plank equation [48]:

$$SST = \frac{K_2}{\ln\left[\frac{\epsilon_{NB}K_1}{R_c} + 1\right]}, \tag{11}$$

where ϵ_{NB} is the narrow band emissivity, corresponding to the emissivity within the band range of the satellite thermal sensor; R_c is the thermal radiance, corrected from the surface using the spectral radiance from thermal band 10 of L8 ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$); constants K_1 and K_2 are 774.8853 and 1321.0789 $W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$, respectively.

Radiance R_c is calculated with [49]

$$R_c = \frac{L_{t,10} - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \epsilon_{NB})R_{sky}, \tag{12}$$

where $L_{t,10}$ is the spectral radiance of Band 10 of L8 ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$); R_p is the path radiance in the 10.6–11.19 μm band; R_{sky} is the narrow band transmissivity downward thermal radiation for a clear sky ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$); τ_{NB} is the narrow-band transmissivity of air (10.64–11.19 μm).

In the absence of an atmospheric correction model, the parameters $R_p = 0.91$, $\tau_{NB} = 0.86$, and $R_{sky} = 1.32$ were considered [48]. According to [50], sea surface emissivity depends on water temperature and salinity in the infrared spectral region. In the present work, $\epsilon_{NB} = 0.969$ is used, which is within the interval established in [50].

3. Results and Discussion

3.1. Remote Sensing Analysis

3.1.1. Validation

Temperature patterns obtained by RS were compared against a wide area of field measurements of the Secretaría de Marina (SEMAR) of Mexico. Field testing was performed from 9 to 12 May 2018. Figure 6 shows the location of the measurement points. Comparisons were made with four L8 TIRS images: two taken on 4 May and two taken on 20 May 2018. It should be stated that it was impossible to match the testing dates with the satellite overpass time; however, given the spatial self-correlation [51], the proximity between those dates is considered acceptable, given the typical pattern of the seawater temperature in the zone. Notice that the field measurements were taken in a very extended

area, compared with the computational domain of numerical simulations, which is why numerical simulations were not validated with such field measurements. In this case, RS fields were a feasible alternative for the validation of numerical simulations once the RS data were properly validated.

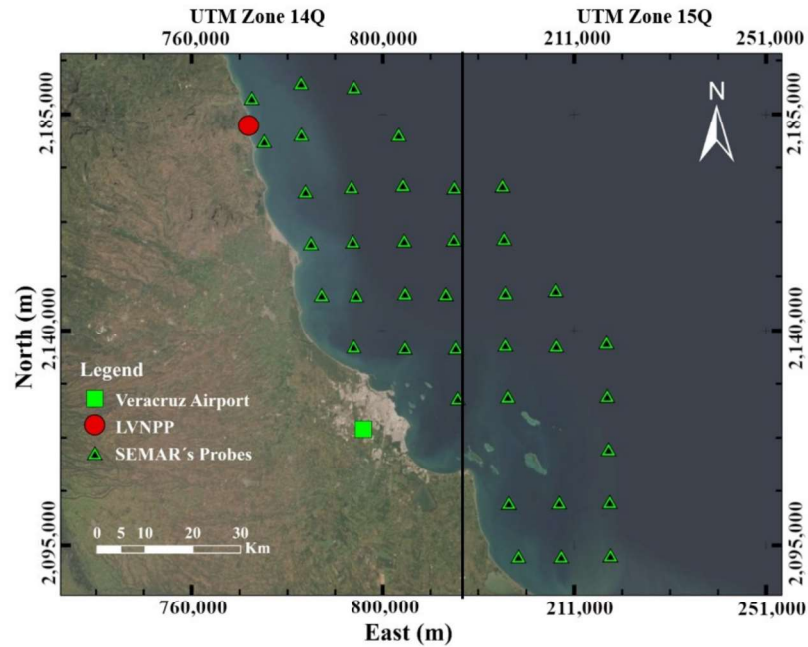


Figure 6. SEMAR's temperature measurement locations.

Figure 7 shows the correlation between field measurements and RS temperatures, where the solid line represents a perfect match. To quantify the error, the RMSE and the corresponding bias B were computed for the NT quantity of data (Table 3). According to the correlations of Figure 7, it can be stated that the proposed scheme reproduces a regional spatial distribution pattern of temperature with good agreement, despite the difference between the dates of field measurements and the L8 TIRS images.

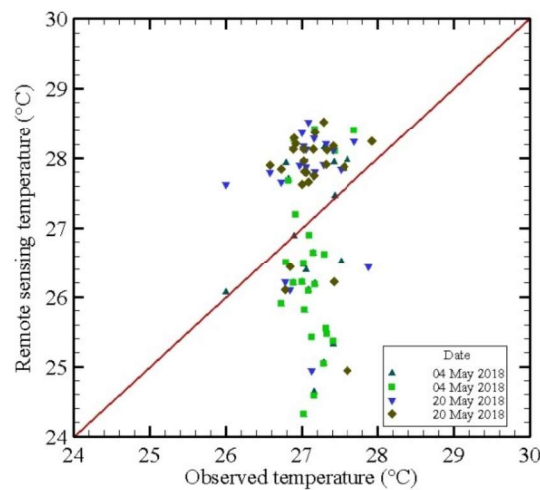


Figure 7. Linear regression of the four images used for the validation process.

Table 3. Errors of the temperature fields obtained from RS data.

Images	Path	Row	RMSE	B	NT
4 May 2018	24	46	1.41	−1.15	17
4 May 2018	24	47	1.32	−0.62	32
20 May 2018	24	46	0.95	0.85	16
20 May 2018	24	47	0.81	0.87	31
General			1.18	0.01	96

3.1.2. Remote Sensing Temperature Fields

Figure 8 shows the temperature fields obtained by RS for different scenarios: winter, spring, summer, and fall seasons. For winter (Figure 8a), the thermal plume is dispersed out to sea, and no issues with recirculating hot water are observed at the intake structure. The same behavior is observed for summer (Figure 8c). With a large area of influence, the plume is dispersed out to sea, which is required to avoid the recirculation of hot water to the power plant. The thermal plume of the fall season (Figure 8d) shows a clear dispersion towards the southeast with a large area of influence as well, but far away from the intake structure. Again, this is a favorable scenario for the power plant performance. Issues are observed for the spring season (Figure 8b), where the thermal plume tends to recirculate towards the intake structure of the plant. This scenario is an unfavorable scenario, since the operation of the cooling system is compromised because hot water is captured from its own discharge.

Table 4 shows the characteristics of the plumes regarding influence area, the direction of propagation, and the higher temperature. The influence area of the thermal plume during summer is the largest one, followed by the influence areas estimated for winter and fall. The condition in which the thermal plume tends towards the intake structure, in the spring season, is the one with the smallest influence area estimated, compared with the rest of the seasons. However, this plume emits the highest temperature into the sea with a peak of 35 °C. Thus, the thermal plume in the spring scenario not only tends towards the intake structure but also brings water with high temperatures back to the power plant.

3.2. Numerical Modeling

3.2.1. Calibration and Validation

To expand the analysis of the thermal plume emitted by the LVNPP, numerical simulations were calibrated and validated with the aid of RS temperature fields. For this purpose, only the scenario of Figure 8b was simulated, as it is a nonfavorable scenario for the performance of the power plant, as mentioned above. To match the scenario of RS for the spring season on 17 May 2017, the simulation period was configured from 15 May 2017 at 00:00 h to 17 May 2017 at 11:00 h, leaving two previous days for warm-up. The initial and boundary conditions are detailed in Section 2.5. The scenario was reproduced with the AEM and the $k-L$ and $k-\epsilon$ turbulence closure models, activating and deactivating the HLES scheme of Delft3D-FLOW, to carry out a discussion on the performance of each model. For simulations performed with HLES, the default sub-grid scale model setup parameters were considered. The temperature at the discharge was fixed to 35 °C, whereas the temperature of the suction at the intake structure was 29.4 °C, according to the RS temperature fields. Regarding the El Viejon river, a constant temperature of 30 °C was imposed.

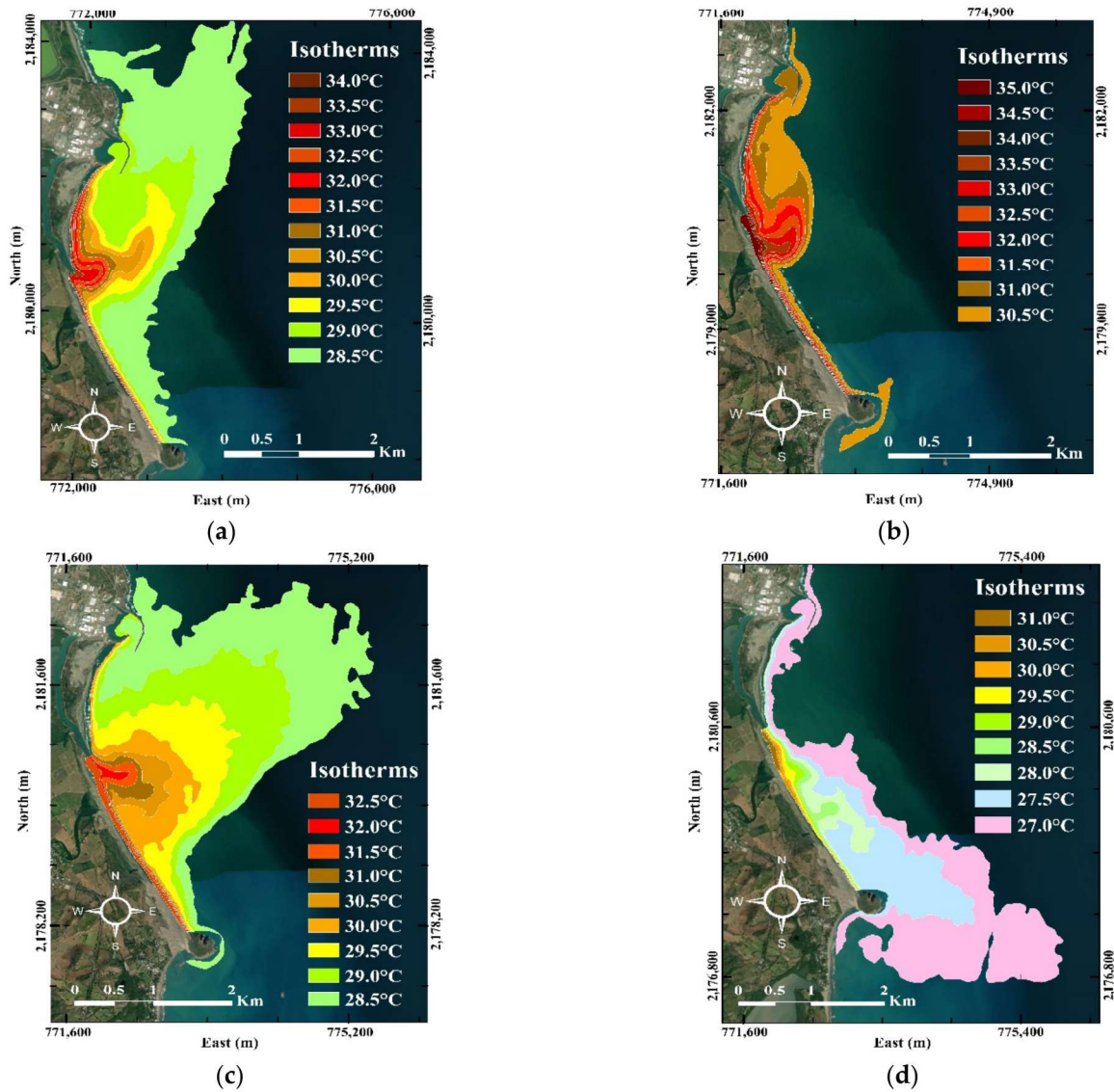


Figure 8. Isotherms obtained from RS: (a) winter, 25 January 2017; (b) spring, 17 May 2017; (c) summer, 19 September 2016; (d) fall, 8 October 2017.

Table 4. Characteristics of the thermal plumes obtained from RS data.

Date	Influence Area (km ²)	Direction	Maximum Temperature (°C)
25 January 2017 (winter)	7.43	Northeast	34.0
17 May 2017 (spring)	2.45	North	35.0
19 September 2016 (summer)	9.73	Northeast	32.5
8 October 2017 (fall)	7.09	Southeast	31.0

A trial and error process that involved increasing and decreasing the parameters v_H^{back} , v_V^{back} , D_H^{back} , and D_V^{back} was applied for satisfactory agreement with the RS data, based on the following three metrics:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [T_{RS}(i) - T_{sim}(i)]^2}{n}}, \tag{13}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [T_{RS}(i) - T_{sim}(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [T_{RS}(i) - \bar{T}]^2}, \tag{14}$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n |T_{RS}(i) - T_{sim}(i)|}{\sum_{i=1}^n T_{RS}(i)}, \tag{15}$$

where *RMSE* is the root mean square error; *m* is the mass balance error; T_{RS} and T_{sim} are the RS and simulated temperatures, respectively; \bar{T} is the mean of T_{RS} ; *n* is the number of monitoring points. Table 5 shows the final values used for the simulations. The background parameters are determinant to the variation in the results and are required to compute ν_H , ν_V , D_H , and D_V , as described by Equations (4), (5), (7) and (8), respectively.

Table 5. Background calibration parameters for simulations.

Parameter	Value Range (m ² /s)	Final Value (m ² /s)
ν_H^{back}	10 ⁻⁵ -10 ²	0.002
ν_V^{back}	10 ⁻⁵ -10 ²	0.02
D_H^{back}	10 ⁻⁵ -10 ²	2
D_V^{back}	10 ⁻⁵ -10 ²	0.6

Figure 9 illustrates the temperature decay curves following the monitoring points, from P7, closest to the discharge, to P1, furthest from the discharge and closest to the intake structure (Figure 2). These results correspond to the date 17 May 2017 at 10:45 h, which is the time that matches the RS data of the same date (Figure 8b). The solid red line shows the temperature decay curve of the RS data, while the rest of the lines depict the simulated decay curves with the different turbulence closure models.

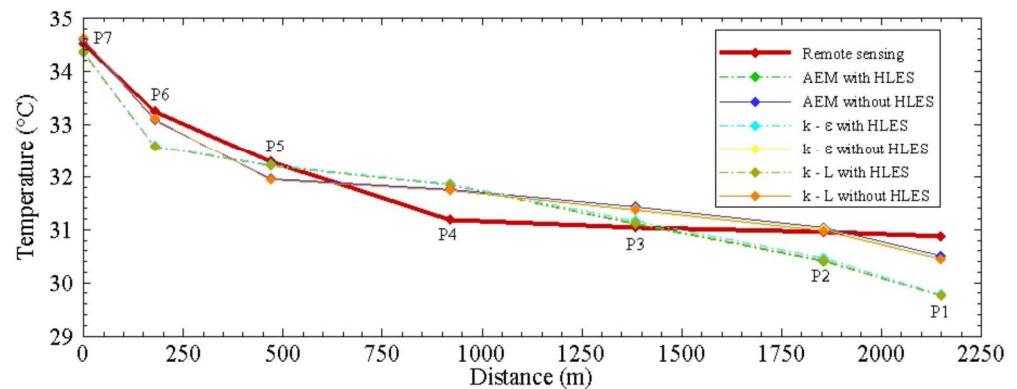


Figure 9. Simulated decay temperature curves following the monitoring points P1 to P7, after the calibration and validation process with the RS data.

Figure 10 shows the dispersion of RS temperatures versus simulated temperatures obtained with the different turbulence closure models at each monitor point. It is evident that more data dispersion exists when using turbulence models with HLES (Figure 10a) compared with the ones without HLES (Figure 10b). Table 6 shows the corresponding errors of each simulation against the RS data. The values of the RMSE for the three turbulence closure models with HLES are around 0.59, whereas these values are lower without HLES, around 0.33. For the NS, the values with HLES for the three models are around 0.79, whereas they are around 0.93 without HLES. For the *m* criterion, calculations with HLES yield values of around 0.014, whereas these are around 0.009 without HLES. In general, better agreement is observed for the simulations without HLES, and, considering the calculated bias, the simulation with the *k* – ϵ turbulence model correlates best with the RS data.

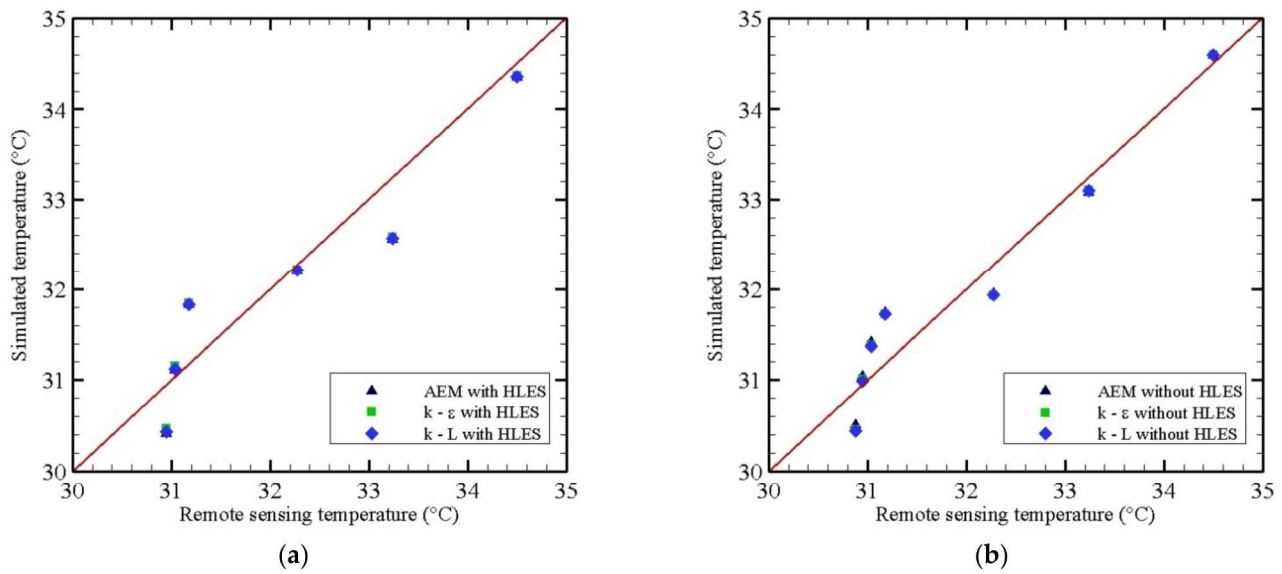


Figure 10. Data dispersion between RS temperatures and simulated temperatures at monitor points for different turbulence closure models: (a) with HLES; (b) without HLES.

Table 6. Error criteria for each turbulence model.

Metric	With HLES			Without HLES		
	AEM	<i>k-L</i>	<i>k-ε</i>	AEM	<i>k-L</i>	<i>k-ε</i>
RMSE	0.598	0.594	0.585	0.334	0.334	0.333
NS	0.788	0.791	0.797	0.934	0.934	0.934
<i>m</i>	0.014	0.014	0.014	0.009	0.009	0.009
B	0.248	0.239	0.218	-0.048	-0.022	-0.032

In terms of the RMSE efficiency criterion, it may appear that some of the simulations are poorly consistent with the RS data; however, there are countless variables arising from different sources in the coastal zone, such as hydrological, meteorological, climatic, and oceanographic variables, which introduce complexity. The diversity in the temporal and spatial scales of these variables also generates a level of uncertainty. The study is therefore far from being a controlled experiment, so the RMSE correlation is acceptable in this case. On the other hand, for the NS efficiency criterion, good agreement is found with the RS data. According to [52], an NS efficiency score greater than 0.5 indicates acceptable numerical modeling performance. Regarding the *m* criterion, the values from both models (i.e., with and without HLES) are close to zero (0.014 and 0.009, respectively), indicating good approximation.

Figure 11 shows the simulated surface thermal fields of the above comparisons of the three turbulence closure models considered, with and without HLES. In general, the patterns of the simulated thermal plumes are in good agreement with those derived from the RS data (Figure 8b). The numerical simulations closely describe the dissipation of the plume towards the intake structure, the critical scenario for the performance of the power plant cooling system. Although the overall thermal fields are similar in all cases, the results without HLES yield greater temperature values in the intake structure, as represented by the isotherms. This means that, when activating the HLES model, the heat dissipates at a higher rate, compared with the simulations without HLES. In fact, the potential core of the thermal discharge reproduced with HLES simulations covers a smaller area than the one reproduced by simulations without HLES. Finally, from the temperature fields of each turbulence closure model, AEM, *k-L*, and *k-ε*, no differences were observed among them.

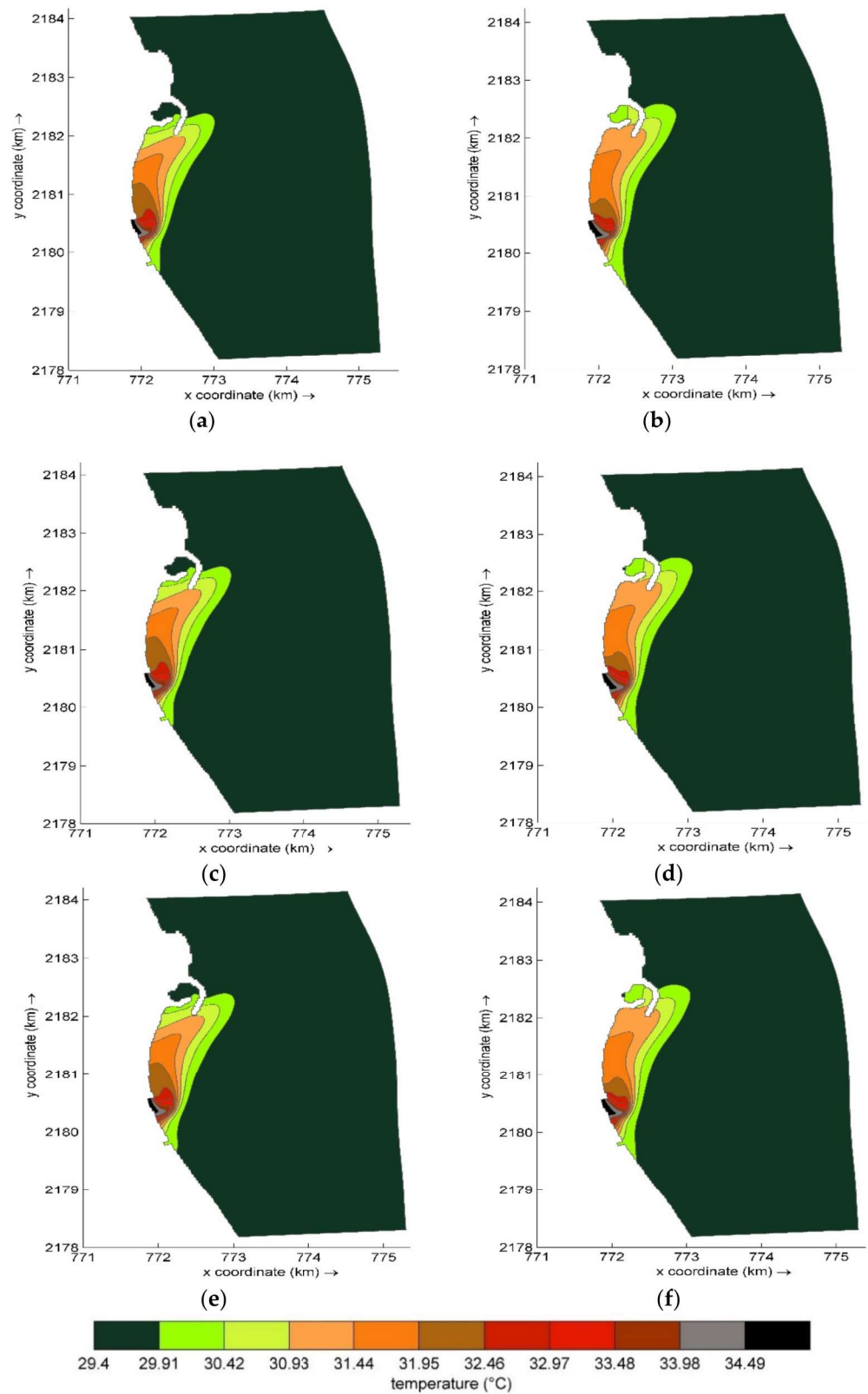


Figure 11. Comparison of the free surface temperature at 10:45:00 on 17 May 2017 with several turbulence closure models: (a) AEM with HLES; (b) AEM without HLES; (c) $k-\epsilon$ with HLES; (d) $k-\epsilon$ without HLES; (e) $k-L$ with HLES; (f) $k-L$ without HLES.

3.2.2. Thermal Plume Dispersion Analysis

The results shown in Section 3.2.1 are further discussed based on a behavioral analysis of several dimensionless numbers and variables. Table 7 shows the definition of each one, where W_D and W_C are the discharge channel depth and width at the outlet, respectively (m); β is the volumetric expansion coefficient ($1/^\circ\text{C}$); T_∞ is the ambient temperature set to 29.4°C ; Pr is the Prandtl number, equal to 0.9; ρ_0 is the standard seawater density, considered 1024 kg/m^3 ; X_p is the distance from P7 to the other monitoring points (m). The parameters k_{max} (m^2/s^2), ϵ_{max} (m^2/s^3), $\nu_{3D_{max}}$ (m^2/s), T_{max} ($^\circ\text{C}$), and U_{max} (m/s) are the maximum values calculated at the monitoring points.

Table 7. Definitions of dimensionless variables.

Variable	Formula
Dimensionless distance	$X^* = \frac{X_p}{W_C}$
Dimensionless horizontal velocity	$U^* = \frac{U}{U_{max}}$
Dimensionless temperature	$T^* = \frac{T}{T_{max}}$
Dimensionless vertical eddy viscosity	$\nu_t^* = \frac{\nu_{3D}}{\nu_{3D_{max}}}$
Dimensionless turbulent energy	$k^* = \frac{k}{k_{max}}$
Dimensionless energy dissipation	$\epsilon^* = \frac{\epsilon}{\epsilon_{max}}$
Reynold’s number	$Re = \frac{UW_D}{\nu_{mol}}$
Densimetric Froude number	$F_{rd} = \frac{U}{\sqrt{gW_D\left(\frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}\right)}}$
Grashof number	$G_r = \frac{g\beta(T_p - T_\infty)W_D^3}{\nu_{mol}^2}$
Peclet number	$Pe = RePr$
Richardson’s number	$Ri = \frac{G_r}{Re^2}$

The analyses are based on the results obtained for the monitoring points shown in Figure 2, and their coordinates can be found in Table 1.

Figure 12 shows the evolution of the dynamic field from P7 to P1, following the plume trajectory. Figure 12a illustrates the evolution of U^* , whereas Figure 12b–d show the dimensionless turbulent parameters k^* , ϵ^* , and ν_t^* , respectively. One of the advantages provided by the $k - \epsilon$ model is that the transport of kinetic energy and its dissipation are calculated. The $k - L$ model does solve the kinetic energy transport equation; however, it does not solve the turbulent dissipation transport equation. To have an approximation of the turbulent dissipation when using the $k - L$ model, the semi-empirical relationship of Kolmogorov–Prandtl, Equation (9), was applied, although, as observed in Figure 12c,d, the results do not show coherence with those obtained from the $k - \epsilon$ model. The turbulent variables from the results of the AEM model were not calculated, since such a model does not even estimate the transport of kinetic energy. From the evolution of U^* , it was observed that, between P7 and P6, the thermal transport was dominated by advective processes arising from the momentum introduced by the discharge channel, whereas, between P5 and P1, it was dominated by diffusive processes, which govern the transport of the plume due to the force induced by surface wind shear and the inertia of the coastal marine currents. Regarding Figure 12b–d, between P7 and P6, the decrease in the turbulence parameters is dominated by the momentum induced by the flow in the channel discharge. This is the area in which the turbulence, and consequently the dissipation, is highest. Between P6 and P1, the evolution of the turbulence parameters is dominated by diffusive processes induced by both the velocities and the temperature in the far field. There are differences between the calculations with and without HLES in the same way as there are in the mean flow.

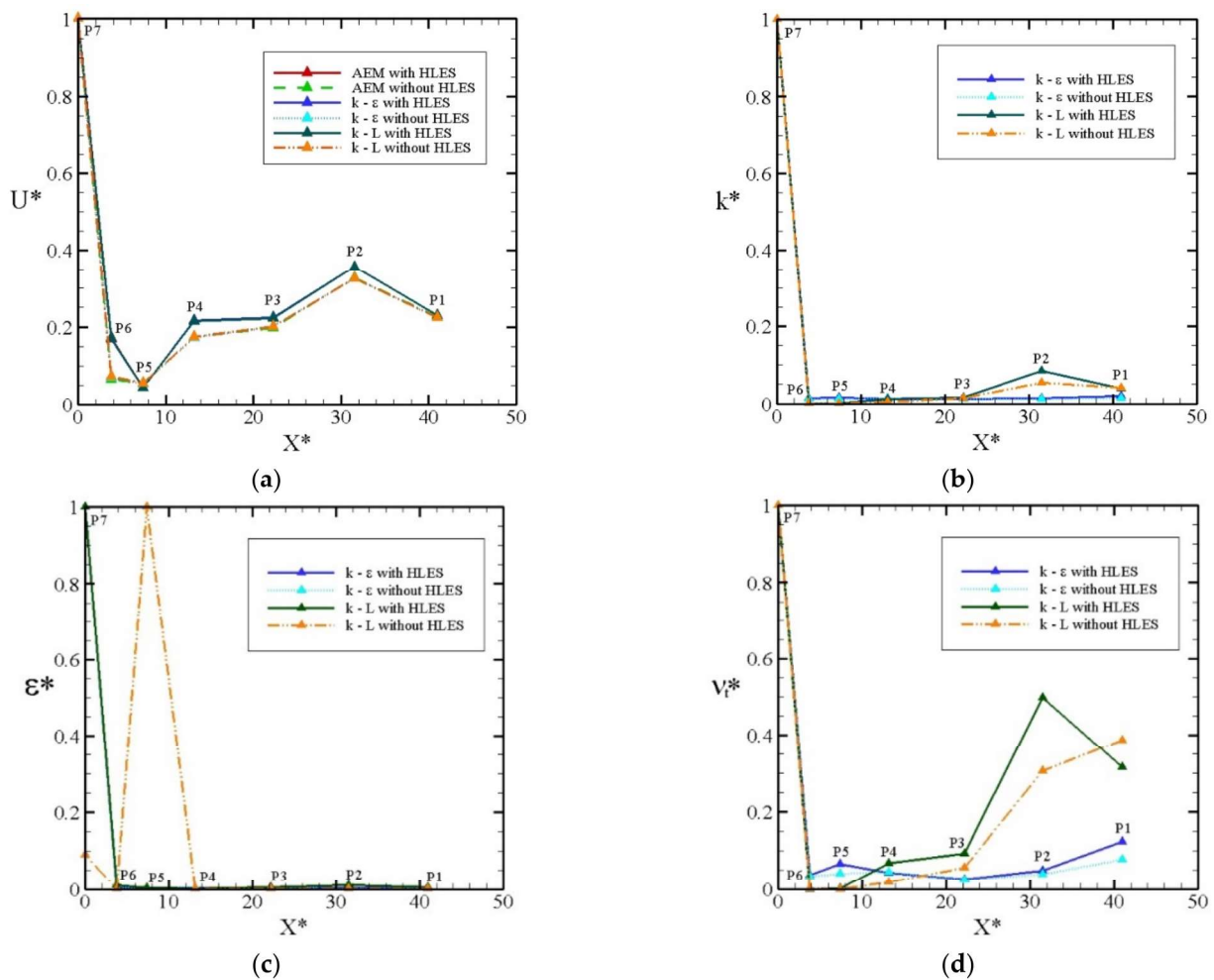


Figure 12. Evolution from P7 to P1 of (a) U^* ; (b) k^* ; (c) ϵ^* ; (d) ν_t^* .

Figure 13 shows the evolution and impact of the thermal plume, including a comparison of dimensionless numbers that relate inertial and viscous force effects, natural and forced convection, heat transfer and thermal diffusion, and finally density and buoyancy effects [53]. Overall, the values from the models with HLES are higher than those without HLES, since an additional eddy viscosity is introduced by ν_{SGS} . The variation of Re with X^* is shown in Figure 13a. In general, inertial forces predominate over viscous ones. It is worth mentioning that, from P7 to P6, higher values of Re are observed; this is expected, since the highest velocities are found near the discharge. The evolution of F_{rd} with X^* is shown in Figure 13b. Near the discharge, inertial forces predominate over buoyancy ones up to P5. After this point, an equilibrium is observed between these two forces, with buoyancy forces slightly predominating over inertial ones, since the values of F_{rd} are lower than one. Figure 13c shows a plot of G_r versus X^* . The highest temperature gradients are found between P7 and P6, and, as expected, the highest values for G_r are observed at these points. From P6 to P1, the values of G_r are smoothly reduced as the thermal plume approaches the intake structure. Overall, buoyancy forces dominate over viscous ones. The variation of Pe is shown in Figure 13d. Between P7 and P6, a predominance of convective forces over diffusive ones is observed, due to the momentum introduced by the discharge channel. Although the Pe curves drop down significantly at the remaining points, the process remains dominated by convective forces since the diffusive ones are not strong enough to counteract them. Figure 13e illustrates the relationship between F_{rd} and T^* . Between P7 and P5, inertial forces predominate over viscous and buoyancy forces. From

P5 to P1, an increase in the buoyancy forces tends to counteract the inertial forces, since the curves tend towards $Fr_d = 1$.

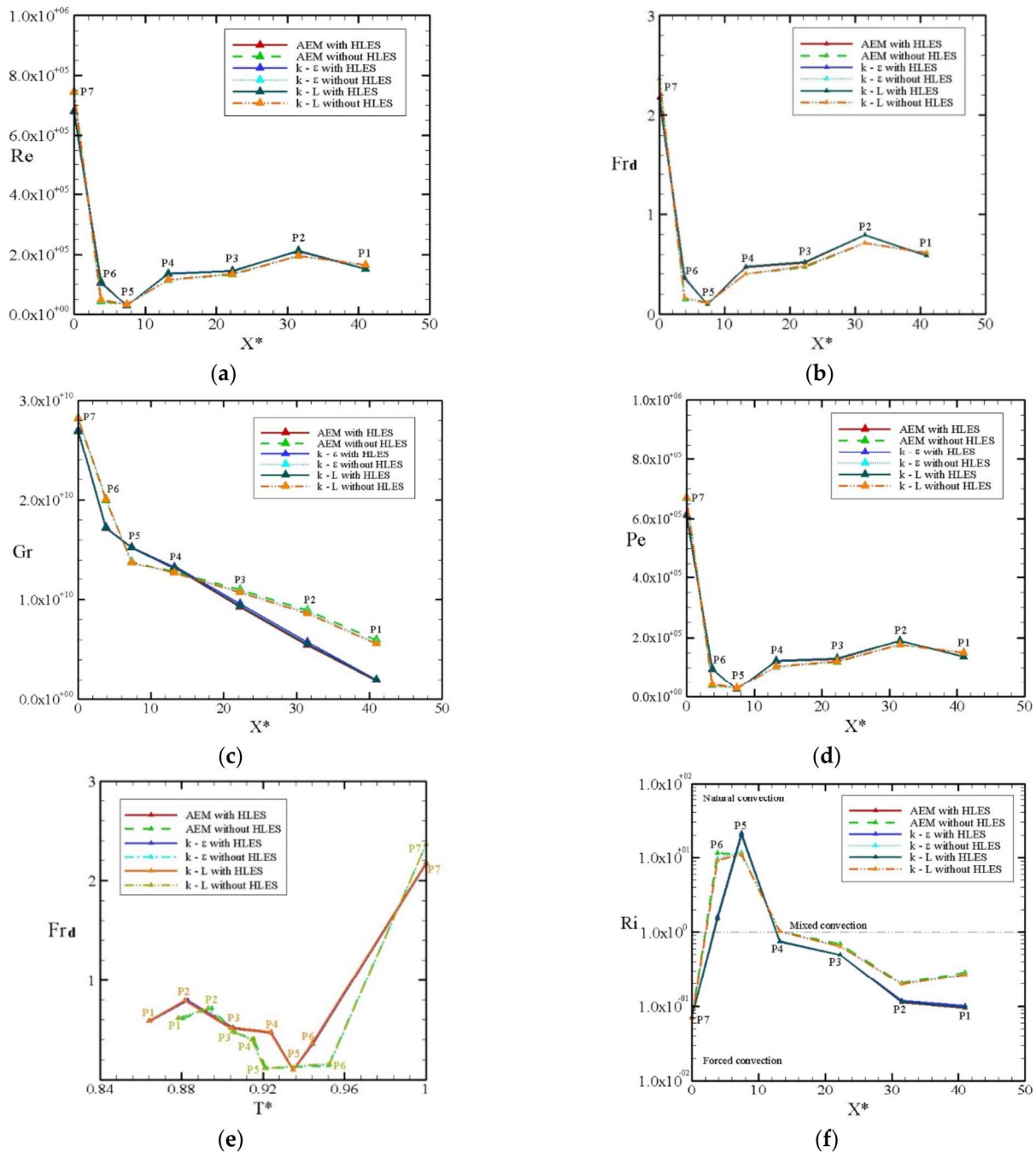


Figure 13. Evolution from P7 to P1 of the dimensionless numbers computed at the free surface for the turbulence closure models considered: (a) Re ; (b) Fr_d ; (c) Gr ; (d) Pe ; (e) Fr_d vs. T^* ; (f) Ri .

Figure 13f shows an analysis of the forced and natural convection. The following criterion is used to classify the convective heat transfer mode of the flow [54]. If $Ri \gg 1$, natural convection effects dominate; if $Ri \ll 1$, buoyancy forces are negligible, and forced convection must be considered; when $Ri \approx 1$, the flow is referred to as a mixed convection. Due to the influence of the discharge, in P7, $Ri < 1$, but not to the degree at which forced convection dominates over natural convection. Between P6 and P4, $Ri > 1$, but again, not to the degree at which natural convection dominates over forced convection. Because of the influence at the intake structure, Ri tends towards values lower than 1 at monitors

P4 to P1, but still, in a regime where it is difficult to infer, forced convection dominates the process. Thus, given the behavior of R_i , a mixed convection regime can be implied on all the monitor points, because the values of R_i are not much higher or much lower than 1, a condition that evidences the predominance of forced or natural convection in the thermal process.

To determine the mode that dominates the heat transfer in the thermal plume dispersion, forced or natural convection, along the monitoring points, a dimensionless quantity was introduced as

$$F_{D(T)} = \beta \rho_0 \frac{\Delta T}{\Delta \rho} \tag{16}$$

This factor is a metric of density variations because it reflects the dimensionless density bias due to linear dilatation with respect to the reference density ρ_0 . In cases such as the one analyzed here, where the density variations due to temperature (dilatation) are small, this relationship helps to represent such variations in orders of magnitude close to 1. With this, whether force convection or natural convection dominates over the other in the thermal process can be observed.

Figure 14 shows the behavior of $F_{D(T)}$ regarding U^* and T^* . Figure 14a tries to illustrate the limits of forced and natural convection along the monitoring points, by comparing $F_{D(T)}$ versus U^* . From P7 to P6, in the near discharge area, $F_{D(T)}$ depends on the velocity variation, which means that gradients of $F_{D(T)}$ over velocity gradients yield values of the order of magnitude close to 1. This region can be inferred as dominated by forced convection. From monitor points P5 to P1, the behavior is different, because the process is not dependent on the velocity variation, which means that gradients of $F_{D(T)}$ over velocity gradients would yield very small values, a much lower order of magnitude than 1. Thus, this region is dominated by mixed convection. Figure 14b illustrates the relationship $F_{D(T)}$ versus T^* , in which the behavior is almost linear. The curve shows that, as T^* decreases from P7 to P1, $F_{D(T)}$ also decreases, which means that, as the temperature becomes colder, the density bias decreases. This only evidences the good agreement of the behavior of $F_{D(T)}$ with the behavior of the thermodynamic state of the system.

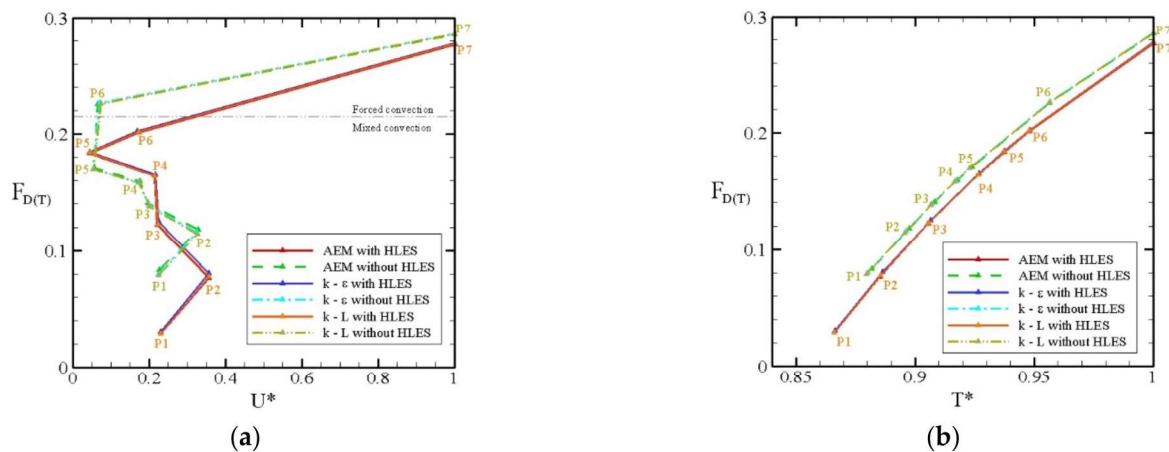


Figure 14. Behavior of the dimensionless parameter $F_{D(T)}$ computed at the free surface for the different turbulence closure models considered: (a) $F_{D(T)}$ vs. U^* ; (b) $F_{D(T)}$ vs. T^* .

4. Conclusions

This work focused on studying the marine dispersion of a thermal plume from a nuclear power plant. Firstly, an RS analysis was conducted, and a numerical simulation analysis of a particular case was then carried out. Based on the numerical simulation results, the work ends with a comparison of three turbulence closure models and with an analysis of nondimensional parameters to explain the thermal dispersion process. The case study was a complex dynamic scenario driven by tides and winds.

The RS analysis was conducted for different scenarios: winter, spring, summer, and fall seasons. This technique was calibrated and validated with the aid of field measurements of a wide spatial region. Results showed that, though the plume disperses far away from the intake structure, temperature disturbances at the intake caused by the discharge are still observed. This fact is highly undesirable because the power plant's performance is compromised.

Numerical simulations were carried out to reproduce the behavior of the thermal plume for the scenario shown in Figure 8b, in which the plume disperses towards the intake of the power plant. The RS results served to calibrate the numerical model because of the lack of field measurements in the plume influence area. The calibration results showed good agreement with the RS data based on the applied metrics (Table 5). After model calibration, the results of three different turbulence closure models—AEM and the $k-L$ and $k-\varepsilon$ models—were compared. In general, the results of the three turbulence closure models applied showed similar values of the dimensionless parameters compared. For quantities such as ν_t^* and ε^* , the results of the $k-L$ model were not satisfactory, since it overpredicts the turbulence quantities, compared with the $k-\varepsilon$ model. In addition, the three error criteria showed the least error when using the $k-\varepsilon$ model; thus, according to these two findings, the $k-\varepsilon$ model can be considered to have performed best among the three turbulence closure models applied for the case study. On the other hand, while using the HLES scheme, the compared dimensionless parameters showed different patterns. The area covered by thermal plumes estimated with HLES is smaller than the ones estimated by simulations without HLES. These differences can be attributed to the HLES theoretical background, which is specific for 2D simulations.

The results from analysis of both the hydrodynamic and thermal variables were consistent. For the hydrodynamic variables, it was observed that, at the outset, the plume is dominated by inertial processes due to the momentum induced in the discharge channel, and that it is later dominated by diffusive processes that are associated with the properties and characteristics of the coastal zone (Figure 13). The dimensionless number $F_{D(T)}$ showed that, close to the discharge, the thermal transport is dominated by forced convection induced by the discharge. In the far field, the thermal transport is dominated by mixed convection associated with the properties and characteristics of the sea in the coastal zone.

Finally, the combination of different techniques to analyze the behavior of thermal plume dispersion into the sea, RS and numerical simulation in this case, provides a better understanding of the phenomenon, regarding spatial effects from the perspective of power plant performance and low environmental impacts. With a lack of local field measurements, the use of RS calibrated with field measurements of an extended area was a good alternative to calibrate and validate numerical simulations in the local influence area of the thermal plume.

Author Contributions: Conceptualization, H.R.-L. and R.B.-P.; methodology, H.B.-P.; software, L.L.-Z. and H.B.-P.; validation, H.R.-L. and R.B.-P.; formal analysis, L.L.-Z. and R.G.-D.; investigation, L.L.-Z. and R.G.-D.; resources, H.B.-P.; data curation, L.L.-Z. and R.G.-D.; writing—original draft preparation, L.L.-Z.; writing—review and editing, L.L.-Z., H.B.-P. and R.B.-P.; visualization, H.R.-L.; supervision, H.R.-L.; project administration, L.L.-Z. and H.B.-P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Please see cited articles and web pages.

Conflicts of Interest: The authors declare that there are no conflict of interest.

References

- Kirillin, G.; Shatwell, T.; Kasprzak, P. Consequences of Thermal Pollution from a Nuclear Plant on Lake Temperature and Mixing Regime. *J. Hydrol.* **2013**, *496*, 47–56. [[CrossRef](#)]
- Li, X.Y.; Li, B.; Sun, X.L. Effects of a Coastal Power Plant Thermal Discharge on Phytoplankton Community Structure in Zhanjiang Bay, China. *Mar. Pollut. Bull.* **2014**, *81*, 210–217. [[CrossRef](#)]
- Azmi, S.; Agarwadkar, Y.; Bhattacharya, M.; Apte, M.; Inamdar, A.B. Monitoring and Trend Mapping of Sea Surface Temperature (SST) from MODIS Data: A Case Study of Mumbai Coast. *Environ. Monit. Assess.* **2015**, *187*, 165. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Jan, S.; Chen, C.T.A.; Tu, Y.Y.; Tsai, H.S. Physical Properties of Thermal Plumes from a Nuclear Power Plant in the Southernmost Taiwan. *J. Mar. Sci. Technol.* **2004**, *12*, 433–441. [[CrossRef](#)]
- Colinvaux, P. Life at low Reynold's number. *Nature* **1979**, *277*, 353–354. [[CrossRef](#)]
- Li, N.; Mao, Z.; Zhang, Q.; Wang, D.; Bai, Y.; Pan, D. The Numerical Simulation and Remote Sensing of the Thermal Discharge from the Qinshan Nuclear Power Station. In Proceedings of the SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Noumea, New Caledonia, 17–21 November 2008; Volume 7150. [[CrossRef](#)]
- Zoran, M.A.; Savastru, R.S.; Savastru, D.M.; Miclos, S.I.; Tautan, M.N.; Baschir, L.V. Thermal Pollution Assessment in Nuclear Power Plant Environment by Satellite Remote Sensing Data. In Proceedings of the SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Edinburgh, UK, 8–12 November 2012; Volume 8531, p. 853120. [[CrossRef](#)]
- Zhang, Z.; He, G.; Wang, M.; Long, T.; Wang, G.; Zhang, X.; Jiao, W. Towards an Operational Method for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Data. *Remote Sens. Lett.* **2016**, *7*, 279–288. [[CrossRef](#)]
- Bonansea, M.; Ferrero, S.; Ferral, A.; Ledesma, M.; German, A.; Carreño, J.; Rodriguez, C.; Pinotti, L. Assessing Water Surface Temperature from Landsat Imagery and Its Relationship with a Nuclear Power Plant. *Hydrol. Sci. J.* **2021**, *66*, 50–58. [[CrossRef](#)]
- Issakhov, A. Mathematical Modeling of the Discharged Heat Water Effect on the Aquatic Environment from Thermal Power Plant under Various Operational Capacities. *Appl. Math. Model.* **2016**, *40*, 1082–1096. [[CrossRef](#)]
- Jia, H.L.; Zheng, S.; Xie, J.; Ying, X.m.; Zhang, C.p. Influence of Geographic Setting on Thermal Discharge from Coastal Power Plants. *Mar. Pollut. Bull.* **2016**, *111*, 106–114. [[CrossRef](#)]
- Shah, V.; Dekhatwala, A.; Banerjee, J.; Patra, A.K. Analysis of Dispersion of Heated Effluent from Power Plant: A Case Study. *Sadhana Acad. Proc. Eng. Sci.* **2017**, *42*, 557–574. [[CrossRef](#)]
- Deabes, E.A.M. The Impact of Thermal Power Stations on Coastline and Benthic Fauna: Case Study of El-Burullus Power Plant in Egypt. *Results Eng.* **2020**, *7*, 100128. [[CrossRef](#)]
- Gaeta, M.G.; Samaras, A.G.; Archetti, R. Numerical Investigation of Thermal Discharge to Coastal Areas: A Case Study in South Italy. *Environ. Model. Softw.* **2020**, *124*, 104596. [[CrossRef](#)]
- Yu, L.; Yu, J. Numerical Research on Flow and Thermal Transport in Cooling Pool of Electrical Power Station Using Three Depth-Averaged Turbulence Models. *Water Sci. Eng.* **2009**, *2*, 1–12. [[CrossRef](#)]
- Lunis, M.; Mamchuk, V.; Movchan, V.; Romanyuk, L.; Shkvar, E. Algebraic Models of Turbulent Viscosity and Heat Transfer in Analysis of Near-Wall Turbulent Flows. *Int. J. Fluid Mech. Res.* **2004**, *31*, 60–74. [[CrossRef](#)]
- Furue, R.; Jia, Y.; McCreary, J.P.; Schneider, N.; Richards, K.J.; Müller, P.; Cornuelle, B.D.; Avellaneda, N.M.; Stammer, D.; Liu, C.; et al. Impacts of Regional Mixing on the Temperature Structure of the Equatorial Pacific Ocean. Part 1: Vertically Uniform Vertical Diffusion. *Ocean Model.* **2015**, *91*, 91–111. [[CrossRef](#)]
- Ali, J.; Fieldhouse, J.; Talbot, C. Turbulent Cooling Water Discharge into Still Body of Water. *Nucl. Eng. Des.* **2011**, *241*, 2006–2012. [[CrossRef](#)]
- Kumar, R.; Dewan, A. Computational Models for Turbulent Thermal Plumes: Recent Advances and Challenges. *Heat Transf. Eng.* **2014**, *35*, 367–383. [[CrossRef](#)]
- Verma, M.K.; Kumar, A.; Pandey, A. Phenomenology of Buoyancy-Driven Turbulence: Recent Results. *New J. Phys.* **2017**, *19*, 025012. [[CrossRef](#)]
- Burchard, H.; Craig, P.D.; Gemmrich, J.R.; van Haren, H.; Mathieu, P.P.; Meier, H.E.M.; Smith, W.A.M.N.; Prandke, H.; Rippeth, T.P.; Skyllingstad, E.D.; et al. Observational and Numerical Modeling Methods for Quantifying Coastal Ocean Turbulence and Mixing. *Prog. Oceanogr.* **2008**, *76*, 399–442. [[CrossRef](#)]
- James, I.D. Modelling Pollution Dispersion, the Ecosystem and Water Quality in Coastal Waters: A Review. *Environ. Model. Softw.* **2002**, *17*, 363–385. [[CrossRef](#)]
- Chen, Q.; Xu, W. A Zero-Equation Turbulence Model for Indoor Airflow Simulation. *Energy Build.* **1998**, *28*, 137–144. [[CrossRef](#)]
- Rodi, W. Turbulence Modeling and Simulation in Hydraulics: A Historical Review. *J. Hydraul. Eng.* **2017**, *143*, 1–20. [[CrossRef](#)]
- Hinterberger, C.; Froehlich, J.; Rodi, W. Three-dimensional and depth-averaged Large-Eddy Simulations of Some Shallow Water Flows. *J. Hydraul. Eng.* **2007**, *133*, 857–872. [[CrossRef](#)]
- Silva, H.A.; Botello, A.V. Evaluación del Impacto ambiental de la central Nucleoeléctrica Laguna Verde. In *Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*; EPOMEX: Campeche, Mexico, 1996.
- Botello, A.V.; Rendón, J. Evaluación del Impacto ambiental de la central Nucleoeléctrica Laguna Verde a 15 años de operación. In *Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*; EPOMEX: Campeche, Mexico, 2005.
- Ramírez-León, H.; Couder-Castañeda, C.; Herrera-Díaz, I.E.; Barrios-Piña, H.A. Modelación Numérica de La Descarga Térmica de La Central Nucleoeléctrica Laguna Verde. *Rev. Int. Metod. Numer. Calc. Disen. Ing.* **2013**, *29*, 114–121. [[CrossRef](#)]

29. Roelvink, J.A.; Van Banning, G.K.F.M. Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics. In *Hydroinformatics*; Verwey, A., Minns, A.W., Babovic, V., Maksimovic, C., Eds.; Balkema: Rotterdam, The Netherlands, 1994; pp. 451–456.
30. Lesser, G.R.; Roelvink, J.A.; van Kester, J.A.T.M.; Stelling, G.S. Development and Validation of a Three-Dimensional Morphological Model. *Coast. Eng.* **2004**, *51*, 883–915. [[CrossRef](#)]
31. Gerritsen, H.; de Goede, E.D.; Platzek, F.W.; Genseberger, M.; van Kester, J.A.T.M.; Uittenbogaard, R.E. *Validation Document Delft3D-FLOW: A Software System for 3D Flow Simulations*; Deltares: Delft, The Netherlands, 2007; p. 266.
32. De Graaff, R.; Lindfors, A.; De Goede, E.; Rasmus, K.; Morelissen, R. Modelling of a Thermal Discharge in an Ice-Covered Estuary in Finland. In Proceedings of the OTC Arctic Technology Conference, Copenhagen, Denmark, 23–25 March 2015; pp. 488–506. [[CrossRef](#)]
33. Sana, A. Hydrodynamic and Thermal Dispersion Modelling of the Effluent in a Coastal Channel. In *Recent Progress in Desalination, Environmental and Marine Outfall Systems*, 1st ed.; Baawain, M., Choudri, B., Ahmed, M., Purnama, A., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2015; pp. 269–283. [[CrossRef](#)]
34. Vroom, J.; van der Wegen, M.; Martyr-Koller, R.C.; Lucas, L.V. What Determines Water Temperature Dynamics in the San Francisco Bay-Delta System? *Water Resour. Res.* **2017**, *53*, 9901–9921. [[CrossRef](#)]
35. Deltares. *Delft3D-FLOW User Manual*, 3.15 ed.; Deltares: Delft, The Netherlands, 2020.
36. Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations. I: The basic experiment. *Mon. Weather Rev.* **1963**, *91*, 99–164. [[CrossRef](#)]
37. Uittenbogaard, R.; vanVossen, B. Subgrid-scale model for quasi-2D turbulence in shallow water. In *Shallow Flows*; Jirka, G., Uijttewaai, W., Eds.; Taylor & Francis Group: London, UK, 2004; pp. 575–582.
38. García, R. Análisis de Dispersión de la Pluma Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde Mediante Teledetección. Master's Thesis, Universidad Autónoma del Estado de México, Mexico City, Mexico, 16 December 2020. [[CrossRef](#)]
39. Ramírez-León, H.; Barrios-Piña, H.; Torres-Bejarano, F.; Cuevas-Otero, A.; Rodríguez-Cuevas, C. Numerical Modelling of the Laguna Verde Nuclear Power Station Thermal Plume Discharge to the Sea. In *High Performance Computer Applications*, 1st ed.; Gliter, I., Klapp, J., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016; pp. 495–507. [[CrossRef](#)]
40. Stelling, G.; Leendertse, J. Approximation of convective processes by cyclic AOI methods. In *Estuarine and Coastal Modeling*; Spaulding, M., Bedford, K., Blumberg, A., Eds.; American Society of Civil Engineers: Tampa, FL, USA, 1992; pp. 771–782.
41. Ghani, A.A.; Zakaria, N.A.; Kiat, C.C.; Ariffin, J.; Hasan, Z.A.; Abdul Ghaffar, A.B. Revised Equations for Manning's Coefficient for Sand-Bed Rivers. *Int. J. River Basin Manag.* **2007**, *5*, 329–346. [[CrossRef](#)]
42. Durán-Colmenares, A.; Barrios-Piña, H.; Ramírez-León, H. Numerical Modeling of Water Thermal Plumes Emitted by Thermal Power Plants. *Water* **2016**, *8*, 482. [[CrossRef](#)]
43. Archivo de Tiempo en Veracruz (Aeropuerto), METAR. Available online: [https://rp5.ru/Archivo_de_tiempo_en_Veracruz_\(aeropuerto\),_METAR](https://rp5.ru/Archivo_de_tiempo_en_Veracruz_(aeropuerto),_METAR) (accessed on 13 October 2020).
44. USGS EarthExplorer. Available online: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed on 20 July 2020).
45. Yu, X.; Guo, X.; Wu, Z. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sens.* **2014**, *6*, 9829–9852. [[CrossRef](#)]
46. Snyder, J.; Boss, E.; Weatherbee, R.; Thomas, A.C.; Brady, D.; Newell, C. Oyster Aquaculture Site Selection Using Landsat 8-Derived Sea Surface Temperature, Turbidity, and Chlorophyll A. *Front. Mar. Sci.* **2017**, *4*, 190. [[CrossRef](#)]
47. USGS. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*; Version 5; Department of the Interior, U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2019.
48. Allen, R.G.; Tasumi, M.; Morse, A.; Trezza, R.; Wright, J.L.; Bastiaanssen, W.; Kramber, W.; Lorite, I.; Robison, C.W. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2007**, *133*, 395–406. [[CrossRef](#)]
49. Wukelic, G.E.; Gibbons, D.E.; Martucci, L.M.; Foote, H.P. Radiometric Calibration of Landsat Thematic Mapper Thermal Band. *Remote Sens. Environ.* **1989**, *28*, 339–347. [[CrossRef](#)]
50. Newman, S.M.; Smith, J.A.; Glew, M.D.; Rogers, S.M.; Taylor, J.P. Temperature and Salinity Dependence of Sea Surface Emissivity in the Thermal Infrared. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2005**, *131*, 2539–2557. [[CrossRef](#)]
51. Telford, R.J.; Birks, H.J.B. The Secret Assumption of Transfer Functions: Problems with Spatial Autocorrelation in Evaluating Model Performance. *Quat. Sci. Rev.* **2005**, *24*, 2173–2179. [[CrossRef](#)]
52. Knoben, W.J.M.; Freer, J.E.; Woods, R.A. Technical Note: Inherent Benchmark or Not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta Efficiency Scores. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2019**, *23*, 4323–4331. [[CrossRef](#)]
53. Bezuglyi, B.A.; Ivanova, N.A.; Sizova, L.V. Transport Phenomena and Dimensionless Numbers: Towards a New Methodological Approach. *Eur. J. Phys.* **2017**, *38*, 033001. [[CrossRef](#)]
54. Çengel, Y.; Cimbala, J.; Turner, R. *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*, 5th ed.; McGraw Hill Education: New York, NY, USA, 2017; pp. 828–829.

Apéndice C

Compilación del código fuente del Delft3D-FLOW








Compilación del modelo hidrodinámico:

Delft3D Open Source

Sistema operativo: Microsoft Windows

El presente documento presenta una guía para la instalación de la revisión 9180 para la Graphical User Interface (GUI) versión 4.04.02.

El Software necesario para lo anterior y su versión es el a continuación mostrado.

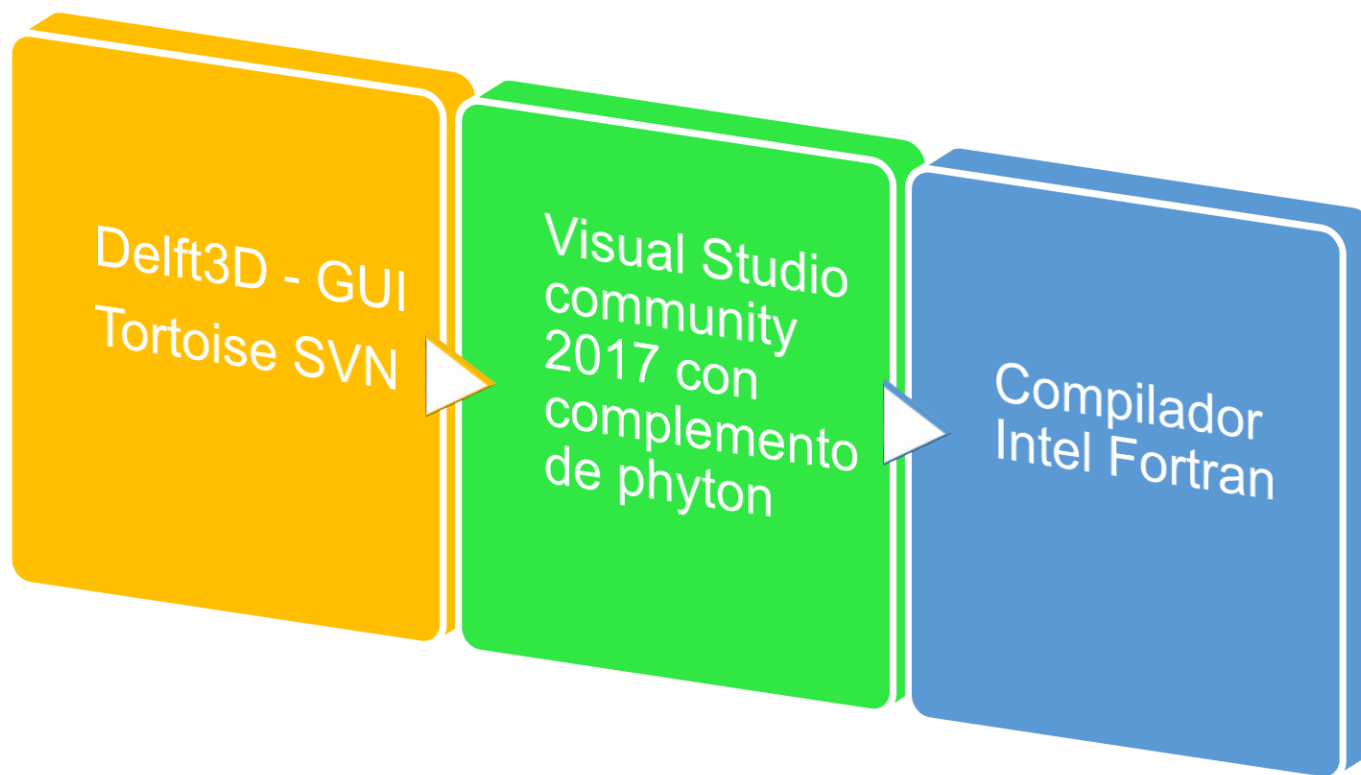
	GUI versión 4.04.02 (x64)
	Código fuente revisión 9180 (más reciente)
 Visual Studio 2017	Tortoise SVN versión 1.14.0 (x64 - más reciente)
	Microsoft Visual studio community 2017 x86 versión 15.9.56
 PYTHON	Intel Fortran Compiler: Intel parallel studio XE 2018 update 8
	Phyton version 3.6.6 (x64)

REQUISITOS

Software	Libre	Comercial	Comentario
Phyton 3.6.6	X		Esta versión se puede descargar como complemento del visual studio.
Microsoft visual studio community 2017 version 15.9.56*	X		Se recomienda utilizar la versión profesional que es comercial. Existe un periodo de prueba por 30 días
Intel parallel studio XE 2018 update 8*		X	Se recomienda utilizar la versión profesional. Sin embargo, es posible solicitar una licencia para estudiante o investigador de forma gratuita por medio del correo institucional para cluster.
Tortoise SVN version 1.14	X		
GUI 4.04.02	X	X	La versión utilizada en este documento es la libre. Debe solicitarse una licencia gratuita a Deltares y es proporcionada por un año. Se puede renovar libre de costo al siguiente año.
Código Fuente	X		Es preferible descargar una versión estable.

*La versión profesional (comercial) puede evitar errores al momento de la compilación.

ORDEN INSTALACIÓN DE SOFTWARE



Etapa 0 – Obtención de software

Paso1. Descarga de GUI: <https://download.deltares.nl/en/download/delft3d-4-gui-open-source/>

Pre-compiled GUI package available on request

As long as the Delft3D graphical user interface (GUI) is not available in open source, we are happy to offer you a pre-compiled version **free of charge**.

The package consists of Installer, GUI, pre- and post-processing tools plus manuals and tutorials.

Installation instructions

To be able to use this pre-compiled distribution

- you have to install the DS_Flex License Manager
- you need a license file (you will get this with the GUI package)
- you (still) need to manually download and compile the source code of the Open Source FLOW, MOR and WAVE, and/or Water Quality modules.
- Delft3D 4.04.00 (and higher) only works in combination with source code revision 8037 (and higher)
Delft3D 4.03.99 (and lower) only works in combination with source code revision 8036 (and lower)
See also the [Delft3D-FLOW release notes](#)

How to obtain a GUI package

To receive this GUI package and a license file valid for one year, please fill out this [GUI request form](#).

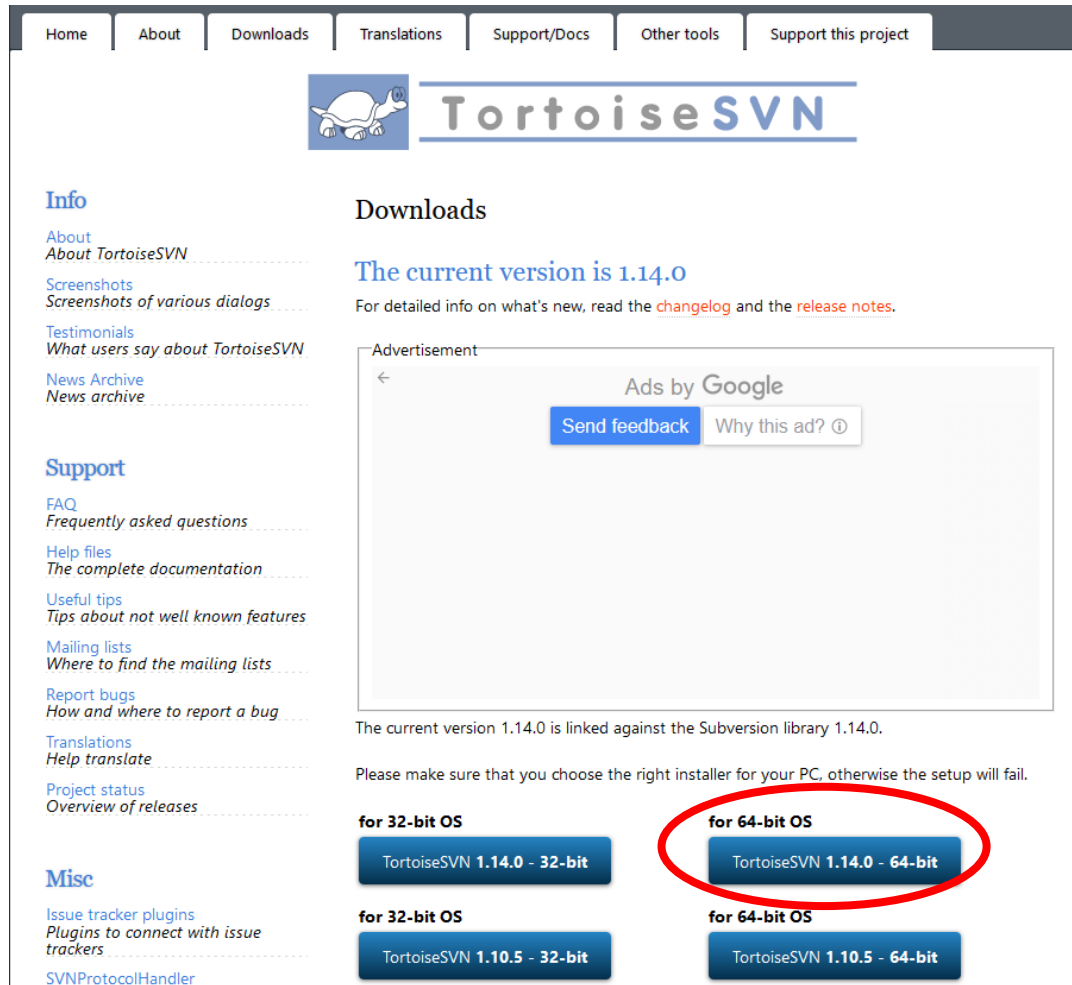
Your request will be handled within 5 working days.

Available Download Files	
Delft3D GUI Installers 4.04.02 Windows.zip	<input type="password" value="Password"/> DOWNLOAD

Solicitar una licencia al llenar el formulario.

Introducir password cuando hay respuesta por parte de Deltares (adjuntan la licencia gratuita) y descargar.

Paso 2. Descarga de tortoise SVN: <https://tortoisesvn.net/>



The screenshot shows the TortoiseSVN website homepage. At the top, there is a navigation bar with links: Home, About, Downloads, Translations, Support/Docs, Other tools, and Support this project. Below the navigation bar is the TortoiseSVN logo, which features a cartoon turtle and the text "TortoiseSVN".

On the left side, there are two main sections: "Info" and "Support".

- Info**
 - About
 - About TortoiseSVN
 - Screenshots
 - Screenshots of various dialogs
 - Testimonials
 - What users say about TortoiseSVN
 - News Archive
 - News archive
- Support**
 - FAQ
 - Frequently asked questions
 - Help files
 - The complete documentation
 - Useful tips
 - Tips about not well known features
 - Mailing lists
 - Where to find the mailing lists
 - Report bugs
 - How and where to report a bug
 - Translations
 - Help translate
 - Project status
 - Overview of releases
- Misc**
 - Issue tracker plugins
 - Plugins to connect with issue trackers
 - SVNProtocolHandler

The main content area is titled "Downloads". It states: "The current version is 1.14.0". Below this, it says: "For detailed info on what's new, read the [changelog](#) and the [release notes](#)."

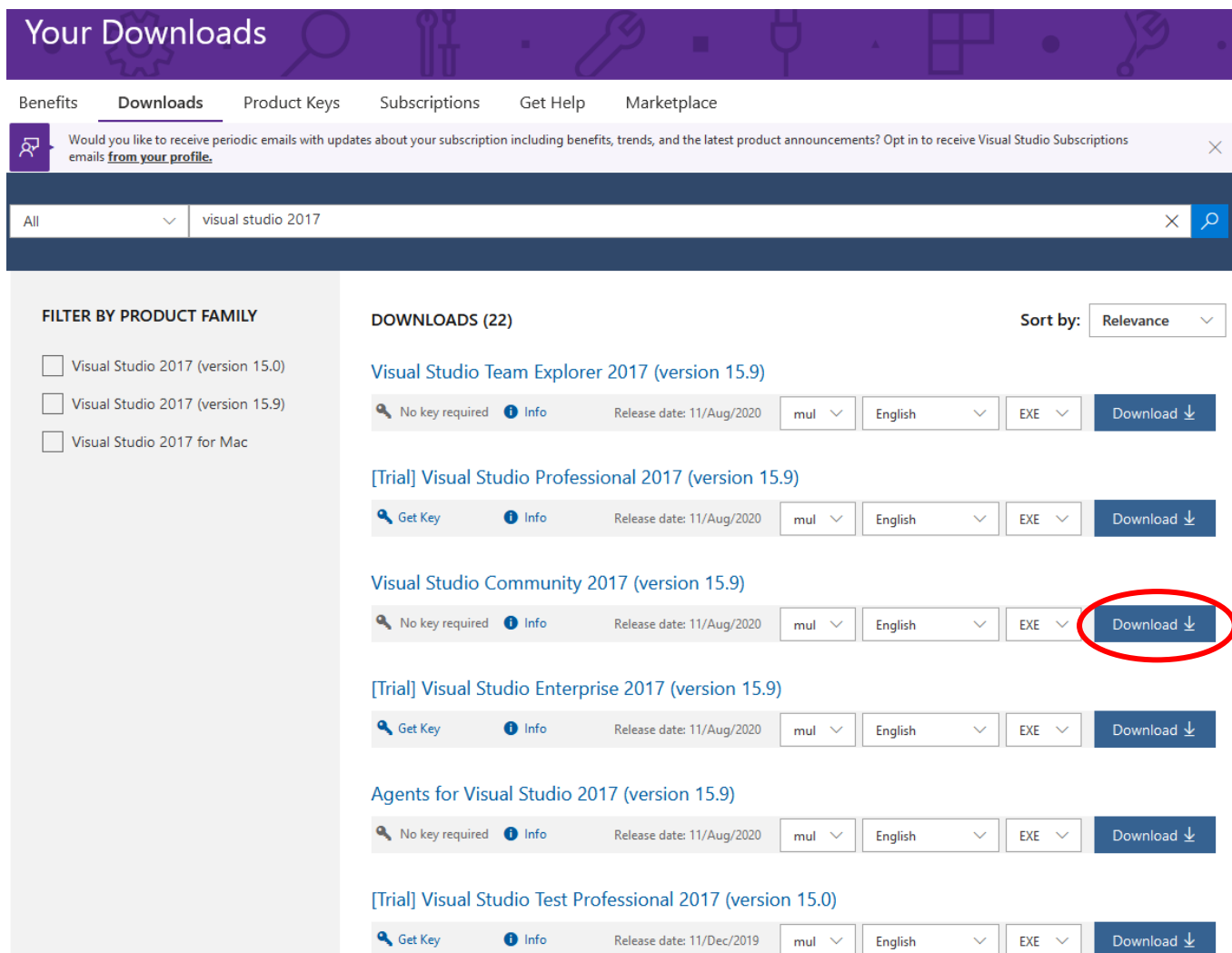
There is an advertisement for Google with buttons for "Send feedback" and "Why this ad?".

Below the advertisement, it says: "The current version 1.14.0 is linked against the Subversion library 1.14.0. Please make sure that you choose the right installer for your PC, otherwise the setup will fail."

There are four download buttons arranged in a 2x2 grid:

- for 32-bit OS: TortoiseSVN 1.14.0 - 32-bit
- for 64-bit OS: TortoiseSVN 1.14.0 - 64-bit (This button is circled in red in the image)
- for 32-bit OS: TortoiseSVN 1.10.5 - 32-bit
- for 64-bit OS: TortoiseSVN 1.10.5 - 64-bit

Paso 3. Descarga de visual studio: <https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/older-downloads/>



The screenshot shows the 'Your Downloads' page on the Visual Studio website. The page has a purple header with the title 'Your Downloads' and navigation links for Benefits, Downloads, Product Keys, Subscriptions, Get Help, and Marketplace. A search bar contains 'visual studio 2017'. On the left, there is a 'FILTER BY PRODUCT FAMILY' section with three checkboxes: 'Visual Studio 2017 (version 15.0)', 'Visual Studio 2017 (version 15.9)', and 'Visual Studio 2017 for Mac'. The main content area is titled 'DOWNLOADS (22)' and is sorted by 'Relevance'. It lists several download items, each with a search icon, a key requirement (e.g., 'No key required' or 'Get Key'), an 'Info' icon, a release date, language and architecture dropdowns, and a 'Download' button. The 'Download' button for 'Visual Studio Community 2017 (version 15.9)' is circled in red.

Product Name	Key Requirement	Info	Release Date	Language	Architecture	Action
Visual Studio Team Explorer 2017 (version 15.9)	No key required	Info	11/Aug/2020	mul	EXE	Download ↓
[Trial] Visual Studio Professional 2017 (version 15.9)	Get Key	Info	11/Aug/2020	mul	EXE	Download ↓
Visual Studio Community 2017 (version 15.9)	No key required	Info	11/Aug/2020	mul	EXE	Download ↓
[Trial] Visual Studio Enterprise 2017 (version 15.9)	Get Key	Info	11/Aug/2020	mul	EXE	Download ↓
Agents for Visual Studio 2017 (version 15.9)	No key required	Info	11/Aug/2020	mul	EXE	Download ↓
[Trial] Visual Studio Test Professional 2017 (version 15.0)	Get Key	Info	11/Dec/2019	mul	EXE	Download ↓

Cargas de trabajo

Componentes individuales

Paquetes de idioma

Ubicaciones de instalación

Windows (3)

**Desarrollo de escritorio de .NET**

Compile WPF, Windows Forms y aplicaciones de consola con C#, Visual Basic y F#.

**Desarrollo para el escritorio con C++**

Compila aplicaciones de escritorio de Windows con el conjunto de herramientas de Microsoft C++, ATL o MFC.

**Desarrollo de la plataforma universal de Windows**

Cree aplicaciones para la Plataforma universal de Windows con C#, VB, JavaScript y, opcionalmente, C++.



Web y nube (7)

**Desarrollo de ASP.NET y web**

Compila aplicaciones web con ASP.NET, ASP.NET Core, HTML/JavaScript y Containers, además de ofrecer...

**Desarrollo de Azure**

SDK de Azure, herramientas y proyectos para desarrollar aplicaciones en la nube, crear recursos y compilar...

**Desarrollo de Python**

Edición, depuración, desarrollo interactivo y control de código fuente de Python.

**Desarrollo de Node.js**

Compila aplicaciones de red escalables con Node.js, un entorno de ejecución JavaScript controlado por eventos...

**** Instalar con complemento de Python.**

Paso 4. Descarga de compilador: <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/tools/parallel-studio-xe.html> (Hay que registrarse con correo institucional para la versión gratuita)



Get Your Free Software



Students

Intel supports the next generation of scientists and engineers with Parallel Studio XE.

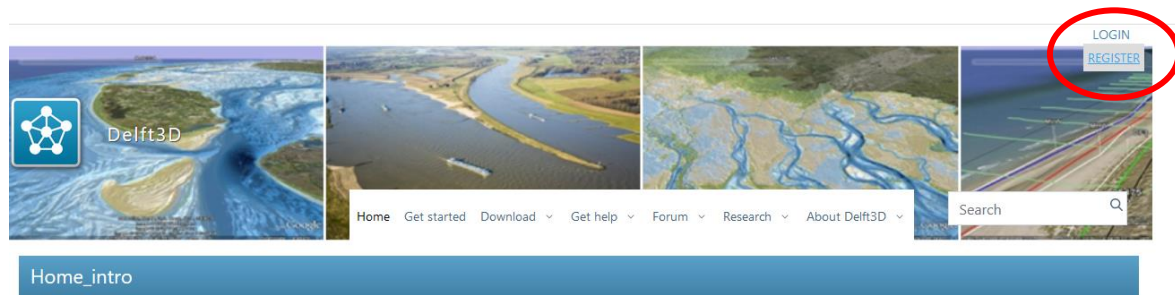
Qualifications



Etapa 1 – Registro en Deltares y ubicación del código fuente

Paso 1. Es necesario registrarse para poder acceder al repositorio donde se encuentra el código fuente

<https://oss.deltares.nl/web/delft3d>



Delft3D Open Source Community

This webportal facilitates the Delft3D Community to come together to share knowledge, brainstorm on new features and build working relationships.

Delft3D is **Open Source Software**. To enhance collaboration, to combine the unique expertise of researchers worldwide and to further expand the modelling suite, the source code of **Delft3D 4 Suite** can be downloaded. The following modules are available: FLOW + MOR + WAVE + WAQ (DELWAQ) + PART. Click [here](#) to get started.



27.000+ joined the Deltares

Open Source Community

5.400+ joined the Delft3D

LinkedIn group

8.500+ Delft3D publications

The launch of the **Delft3D Flexible Mesh Suite** (Delft3D FM) took place during the Delft Software Days (DSD-INT 2015). Since November 2015, Delft3D FM is available to all users with a [Delft3D Service Package](#) in place. Unique applications have been demonstrated at the 4-day Delft3D User Days during the DSD-INT 2019.



Our development team is working hard to make all components of Delft3D FM available in open source, both computational engines and Graphical User Interface components (GUI). For now, only DELWAQ, RTC-TOOLS and SWAN are available in open source, which are the computational engines of D-Water Quality, D-Real Time Control and D-Waves, respectively. The key component of Delft3D FM is the D-Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) engine for hydrodynamical simulations on unstructured grids in 1D-2D-3D. As long as the 1D-2D-3D architecture of D-Flow FM is subject to change, the access to the D-Flow FM code will be limited to a small group of Partners in Development. We anticipate having D-Flow FM in open source for everyone in 2020, but it could become 2021.

Paso 2. Una vez registrado, ingresar con sus credenciales al repositorio por medio de la siguiente liga:
<https://svn.oss.deltares.nl/>



Open Source Repositories

[Delft3D](#)

[Delft-FEWS](#)

[iMOD](#)

[OpenDA](#)

[Open Earth Tools](#)

[Open Earth Models](#)

[Open Earth Raw Data](#)

[RTC-Tools](#)

[Serious Gaming](#)

[XBeach](#)

El servidor svn.oss.deltares.nl solicita tu nombre de usuario y contraseña.

Ese servidor también informa: "OSS Subversion Server".

*Entrar con username (Se encuentra dentro del perfil de la cuenta registrada)

Paso 3. Se mostrará la carpeta trunk

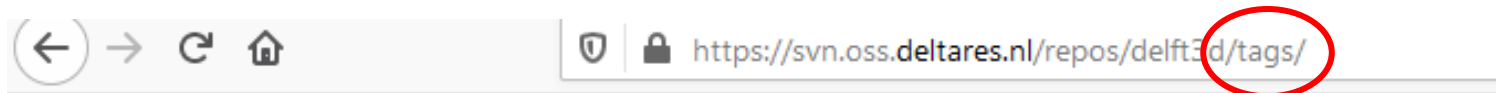


← → ↻ 🏠   https://svn.oss.deltares.nl/repos/delft3d/trunk/

delft3d - Revision 67502: /trunk

- ..
- [agpl-3.0.txt](#)
- [doc/](#)
- [examples/](#)
- [gpl-3.0.txt](#)
- [lgpl-2.1.txt](#)
- [src/](#)
- [tsvn-auto-props](#)

Paso 4. Se deberá reemplazar en la URL la palabra trunk por tags, así se mostrará la siguiente carpeta:



delft3d - Revision 67502: /tags

- ..
- [delft3d4/](#)
- [delft3dfm/](#) ← Revisión 9180

La revisión 9180 del código fuente se encuentra dentro del apartado delft3dfm

- [67136/](#)
- [67184/](#)
- [67222/](#)
- [67253/](#)
- [67278/](#)
- [67311/](#)
- [67427/](#)
- [67460/](#)
- [67485/](#)
- [8163/](#)
- [8266/](#)
- [8290/](#)
- [8375/](#)
- [8427/](#)
- [8477/](#)
- [8549/](#)
- [8628/](#)
- [8659/](#)
- [8687/](#)
- [8703/](#)
- [8798/](#)
- [8889/](#)
- [8923/](#)
- [8951/](#)
- [9069/](#)
- [9152/](#)
- [9180/](#)
- [archive/](#)

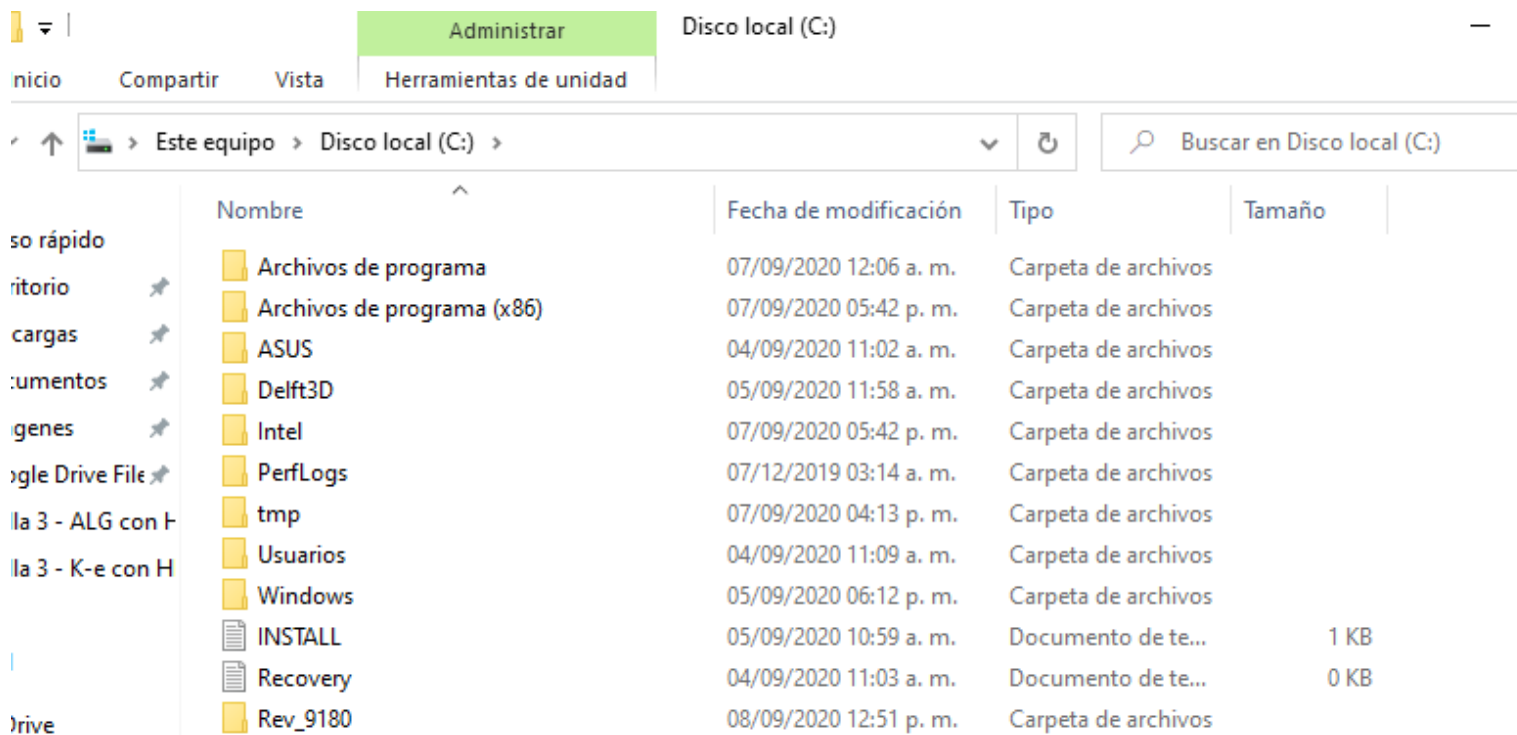
La revisión 9180 se encuentra al final del listado. Simplemente hay que desplazar hasta abajo para encontrarla.



Paso 5. Finalmente, dar click para abrir la carpeta y visualizar su contenido. Posteriormente, copiar la dirección mostrada en la barra de direcciones: <https://svn.oss.deltares.nl/repos/delft3d/tags/delft3dfm/9180/>

Etapa 2 – Descarga del código fuente (revisión)

Paso 1. Generar una carpeta donde se descargará el código fuente. Se recomienda en la unidad C. La carpeta tendrá nombre Rev_9180.



Administrar Disco local (C:)

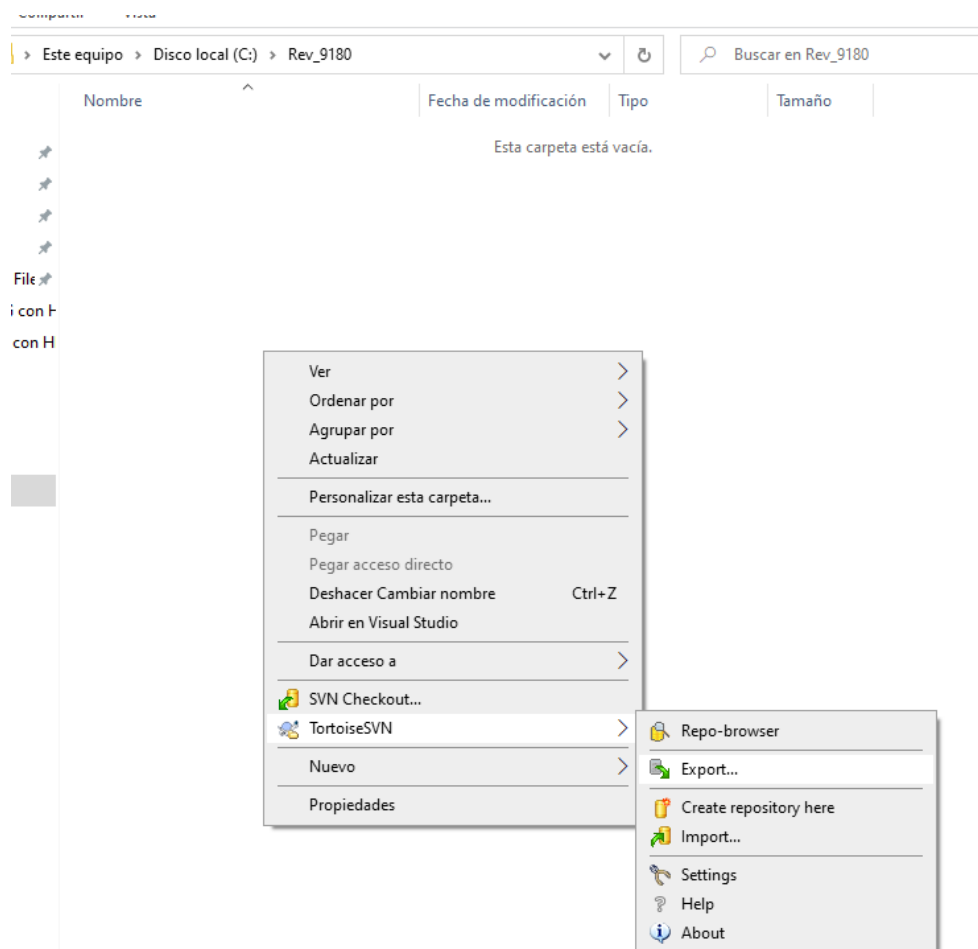
Inicio Compartir Vista Herramientas de unidad

Este equipo > Disco local (C:) >

Buscar en Disco local (C:)

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Archivos de programa	07/09/2020 12:06 a. m.	Carpeta de archivos	
Archivos de programa (x86)	07/09/2020 05:42 p. m.	Carpeta de archivos	
ASUS	04/09/2020 11:02 a. m.	Carpeta de archivos	
Delft3D	05/09/2020 11:58 a. m.	Carpeta de archivos	
Intel	07/09/2020 05:42 p. m.	Carpeta de archivos	
PerfLogs	07/12/2019 03:14 a. m.	Carpeta de archivos	
tmp	07/09/2020 04:13 p. m.	Carpeta de archivos	
Usuarios	04/09/2020 11:09 a. m.	Carpeta de archivos	
Windows	05/09/2020 06:12 p. m.	Carpeta de archivos	
INSTALL	05/09/2020 10:59 a. m.	Documento de te...	1 KB
Recovery	04/09/2020 11:03 a. m.	Documento de te...	0 KB
Rev_9180	08/09/2020 12:51 p. m.	Carpeta de archivos	

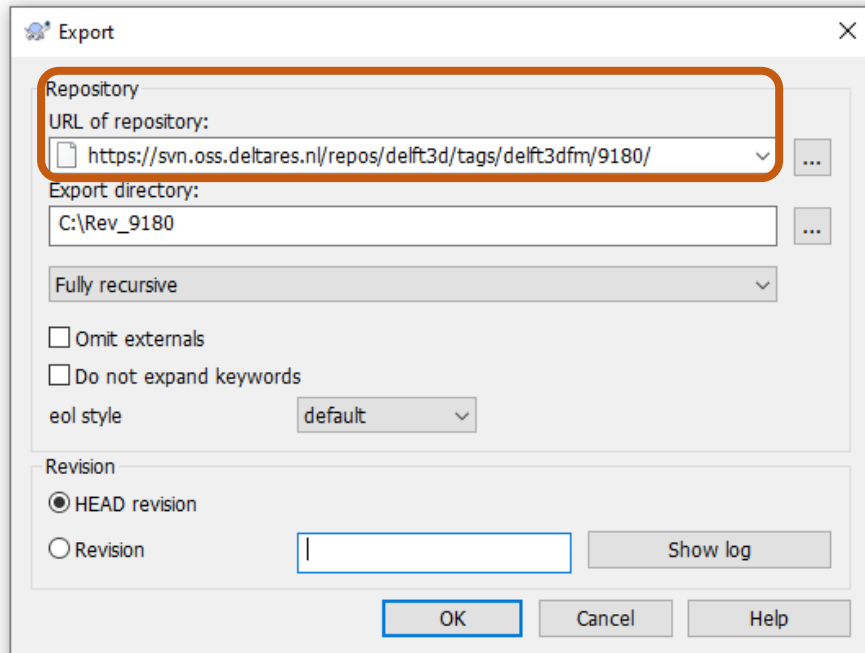
Paso 2. Dentro de la carpeta Rev_9180, dar click derecho del mouse e ir a la opción **TortoiseSVN** y en el submenú elegir la opción **export**.



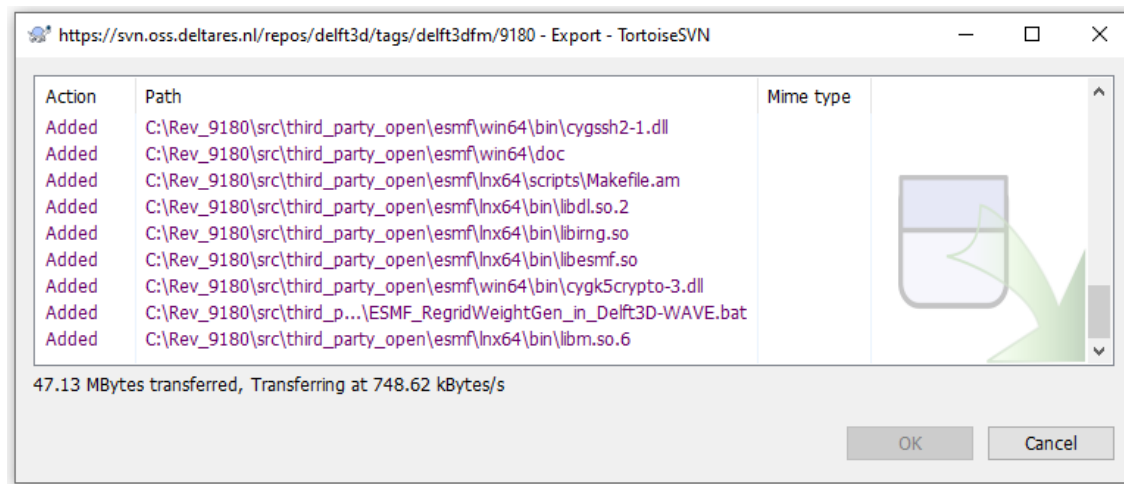
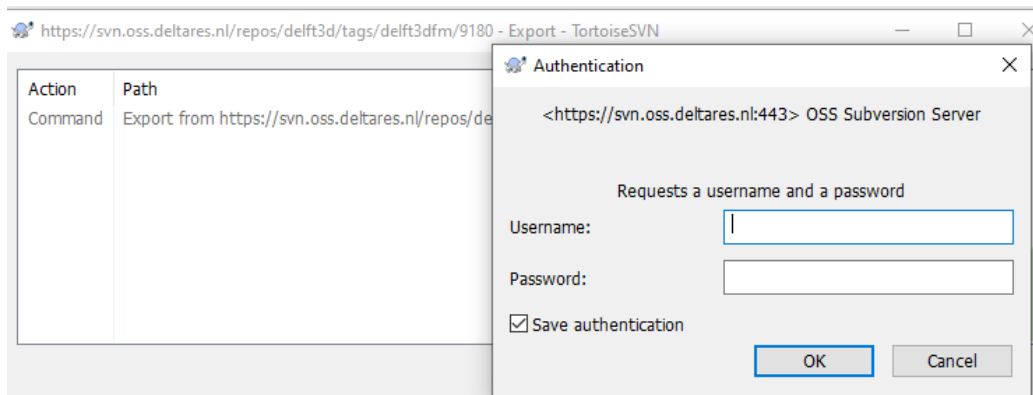
Paso 3. Se muestra la ventana export. En el campo **URL of repository** introducir la dirección web donde se ubica la revisión 9180. Después dar click en ok.

> Disco local (C:) > Rev_9180

	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
e			



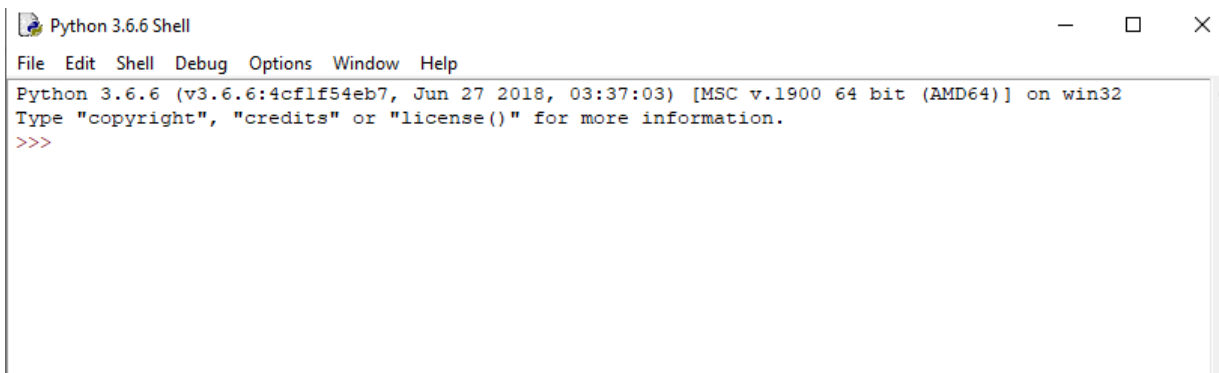
Paso 4. Se volverán a pedir el username y password, son los mismos para ingresar al repositorio de Delft3D. Por ultimo. hay que esperar a que TortoiseSVN indique que la revisión se ha descargado por completo (La revisión tiene un tamaño aproximado de 1 Gb).



Etapa 3 – Generación de archivos necesarios para compilación

Visual studio necesita el archivo (delft3d_open.sln) para compilarlo. Phyton ayudara a su creación.

Paso 1. Primeramente, abrir la IDLE de Phyton 3.6.6



```
Python 3.6.6 Shell
File Edit Shell Debug Options Window Help
Python 3.6.6 (v3.6.6:4cflf54eb7, Jun 27 2018, 03:37:03) [MSC v.1900 64 bit (AMD64)] on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
```

Paso 2. Una vez abierto el workspace, es necesario cambiar su ubicación a donde se encuentra descargada el archivo **prepare_sln.py** de la revisión 9180. Dicho archivo se localiza dentro de la subcarpeta **src**.

Paso 3. Se necesita la librería **import os** para cambiar de directorio.

Paso 4. La instrucción **os.getcwd()** permite visualizar el directorio actual del workspace

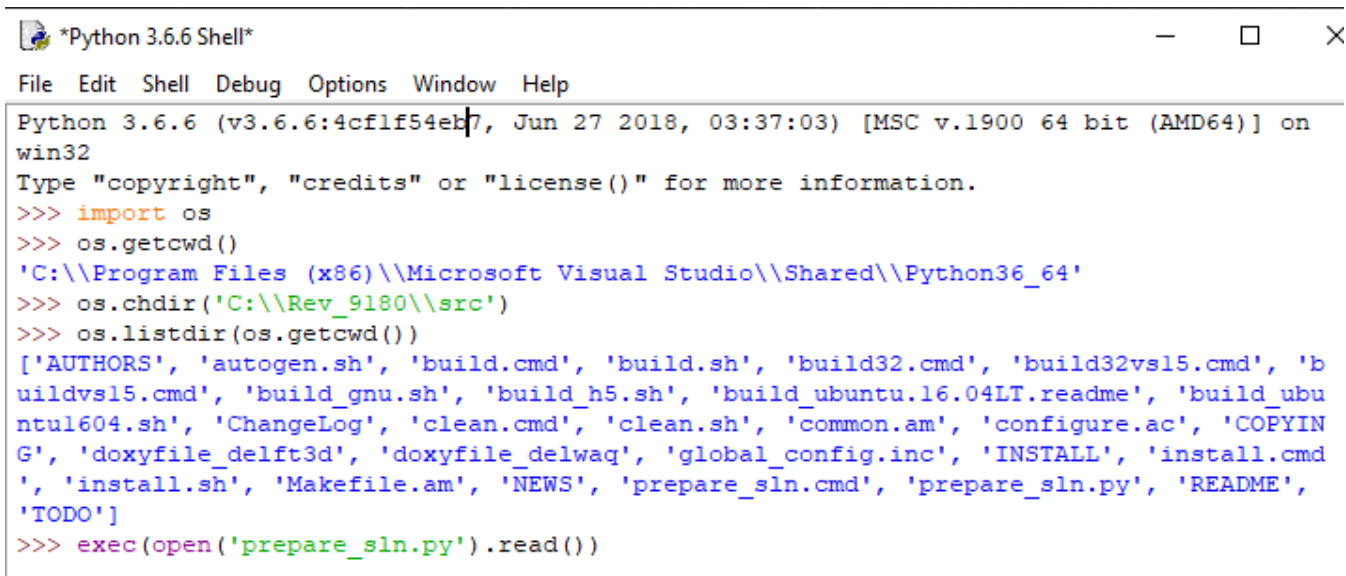
Paso 5. La instrucción **os.chdir()** permite el cambio de directorio. Utilizar la siguiente sintaxis:

```
os.chdir('C:\\Rev_9180\\src')
```

Paso 6. La instrucción **os.listdir(os.getcwd())** permite visualizar el contenido de la carpeta. El archivo de interés es el de nombre **'prepare_sln.py'**. Al cambiar el directorio, dicho archivo deberá mostrarse en el listado.

Paso 7. Utilizar la instrucción **exec(open('prepare_sln.py').read())**

Se mostrará la ventana de selección del Integrated Development Environment (IDE) y compilador.



```
*Python 3.6.6 Shell*
File Edit Shell Debug Options Window Help
Python 3.6.6 (v3.6.6:4cflf54eb7, Jun 27 2018, 03:37:03) [MSC v.1900 64 bit (AMD64)] on
win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> import os
>>> os.getcwd()
'C:\\Program Files (x86)\\Microsoft Visual Studio\\Shared\\Python36_64'
>>> os.chdir('C:\\Rev_9180\\src')
>>> os.listdir(os.getcwd())
['AUTHORS', 'autogen.sh', 'build.cmd', 'build.sh', 'build32.cmd', 'build32vs15.cmd', 'b
uildvs15.cmd', 'build_gnu.sh', 'build_h5.sh', 'build_ubuntu.16.04LT.readme', 'build_ubu
ntu1604.sh', 'ChangeLog', 'clean.cmd', 'clean.sh', 'common.am', 'configure.ac', 'COPYIN
G', 'doxyfile_delft3d', 'doxyfile_delwaq', 'global_config.inc', 'INSTALL', 'install.cmd
', 'install.sh', 'Makefile.am', 'NEWS', 'prepare_sln.cmd', 'prepare_sln.py', 'README',
'TODO']
>>> exec(open('prepare_sln.py').read())
```

Paso 8. Seleccionar las opciones **VS 2017** y **IFORT18** ya que son las versiones previamente instaladas. La **.Net Framework Version** deberá elegirse acorde a la instalada en el equipo. Dar click en Apply.

choose IDE and compiler

Visual Studio Version:	.Net Framework Version:	IFORT Version:
<input checked="" type="radio"/> VS 2017 (not tested yet)	<input checked="" type="radio"/> .Net Framework 4.8	<input checked="" type="radio"/> IFORT18: (not tested yet)
<input type="radio"/> VS 2015, Update 3	<input type="radio"/> .Net Framework 4.7	<input type="radio"/> IFORT17: (NOT Recommended)
<input type="radio"/> VS 2013	<input type="radio"/> .Net Framework 4.6	<input type="radio"/> IFORT16: Intel Parallel Studio XE 2016 Update 4
<input type="radio"/> VS 2012	<input type="radio"/> .Net Framework 4.5	<input type="radio"/> IFORT15: Intel Parallel Studio XE 2015 Update 6
<input type="radio"/> VS 2010	<input type="radio"/> .Net Framework 4.4	<input type="radio"/> IFORT14: Intel Visual Fortran Composer XE 2014
	<input type="radio"/> .Net Framework 4.3	<input type="radio"/> IFORT13: Intel Visual Fortran Composer XE 2013
	<input type="radio"/> .Net Framework 4.2	<input type="radio"/> IFORT12: Intel Visual Fortran Composer XE 2011

Choose your Visual Studio version, .Net Framework version and IFORT version and click 'Apply'

Apply Exit

Paso 9. Al proceder en la creación, Phyton encontrara un error en la **línea 206**. El error mostrado es: *NameError: name '__file__' is not defined.*

```
>>> exec(open('prepare_sln.py').read())
Visual Studio Version : 2017
.Net Framework Version : 48
Intel Fortran Version : 18
Trying to execute: "C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio\2017\Community\VC\Auxiliary\Build\vcvarsall.bat" amd64
ucrt_dir found:*****
** Visual Studio 2017 Developer Command Prompt v15.0.26228.102
** Copyright (c) 2017 Microsoft Corporation
*****
[vcvarsall.bat] Environment initialized for: 'x64'
UniversalCRTSdkDir=C:\Program Files (x86)\Windows Kits\10
No versions found, using default version:10.0.10586.0
Creating file delft3d_open.sln ...
Exception in Tkinter callback
Traceback (most recent call last):
  File "C:\Users\lagun\AppData\Local\Programs\Python\Python38-32\lib\tkinter\__init__.py", line 1883, in __call__
    return self.func(*args)
  File "<string>", line 550, in do_work
  File "<string>", line 206, in process_solution_file
NameError: name '__file__' is not defined
```


Paso 10. Para corregir el error, hay que ir al archivo **'prepare_sln.py'** y modificar su **línea 206**. Hay que localizar el archivo y es posible editarlo con el mismo python o con bloc de notas.

```
process a VisualStudio Solution File (and underlying projects)
Pass only file names, no full path names. It assumed that both
files are in fixed locations (see below).
ef process_solution_file(sln, slntemplate):
    global vs
    global fw
    global ifort
    global libdir
    global redistdir
    global toolsversion
    global frameworkversion
    global platformtoolset

    # Copy the solution template file to the solution file
    sys.stdout.write("Creating file " + sln + " ...\n")
    scriptdir = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
    topdir = scriptdir

    # target file:
    sln = os.path.join(topdir, sln)

    # source template file:
    slntemplate = os.path.join(topdir, slntemplate)

    shutil.copyfile(slntemplate, sln)

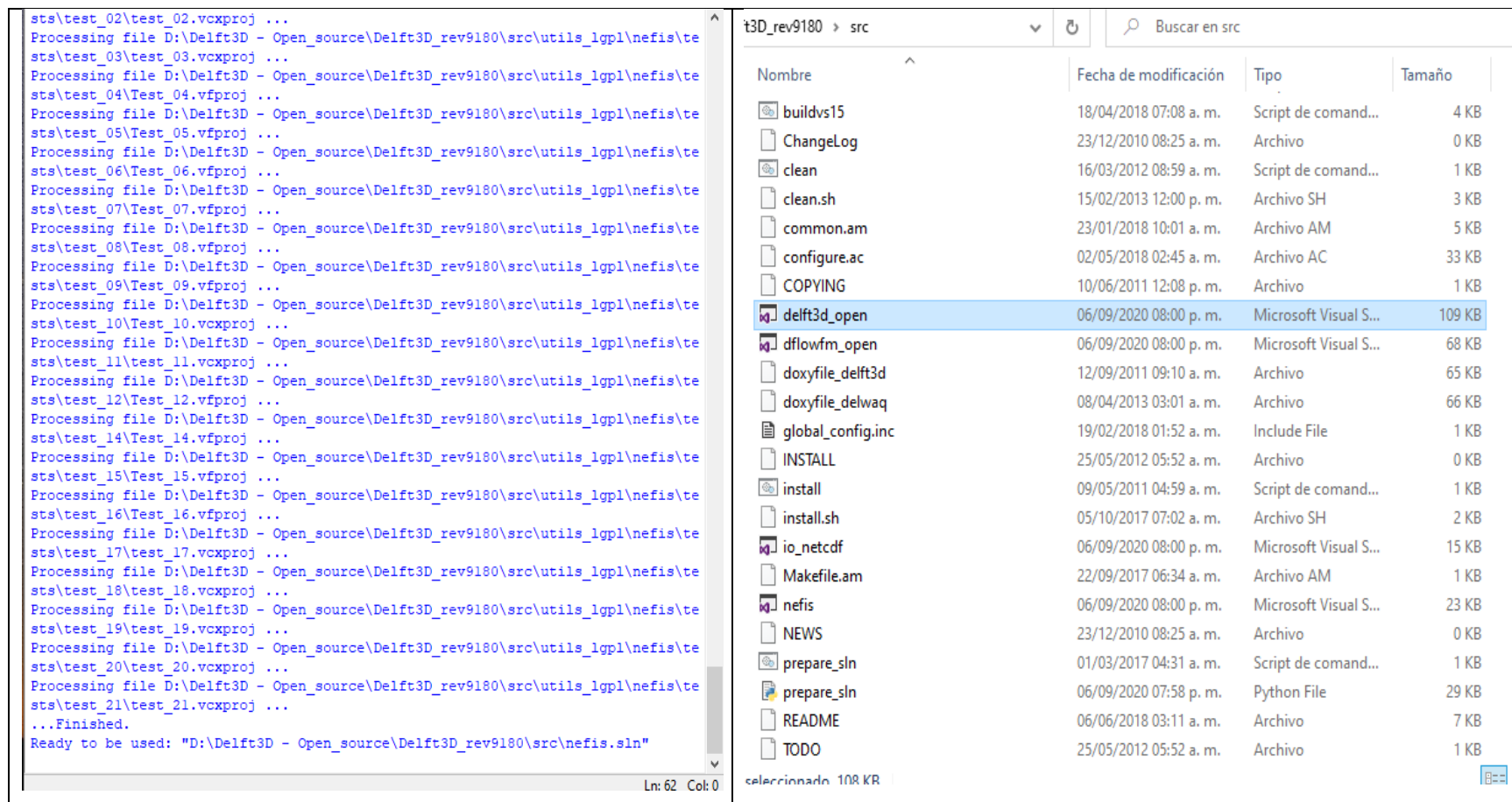
    # Collect the project files referenced in the solution file
    projectfiles = []
    # Read sln file:
    # Put the full file contents in filin_contents
    with open(sln, "r", encoding='utf-8') as filinhandle:
        filin_contents = filinhandle.readlines()

    # Scan the contents and rewrite the full solution file
    with open(sln, "w", encoding='utf-8') as filouthandle:
        for line in filin_contents:
            # Search for project file references
            pp = line.split('"')
            for subline in pp:
                if max(subline.find(".vfproj"), subline.find(".vcxproj"), sublin
```

Ln: 206 Col: 4

Paso 11. Sustituir '`__file__`' por '`prepare_sln.py`' y guardar los cambios.

Paso 12. Repetir el proceso desde el Paso 7. En esta ocasión, Phyton creará el archivo `delft3d_open.sln` necesario para la compilación y lo guardará dentro de la carpeta `src`.



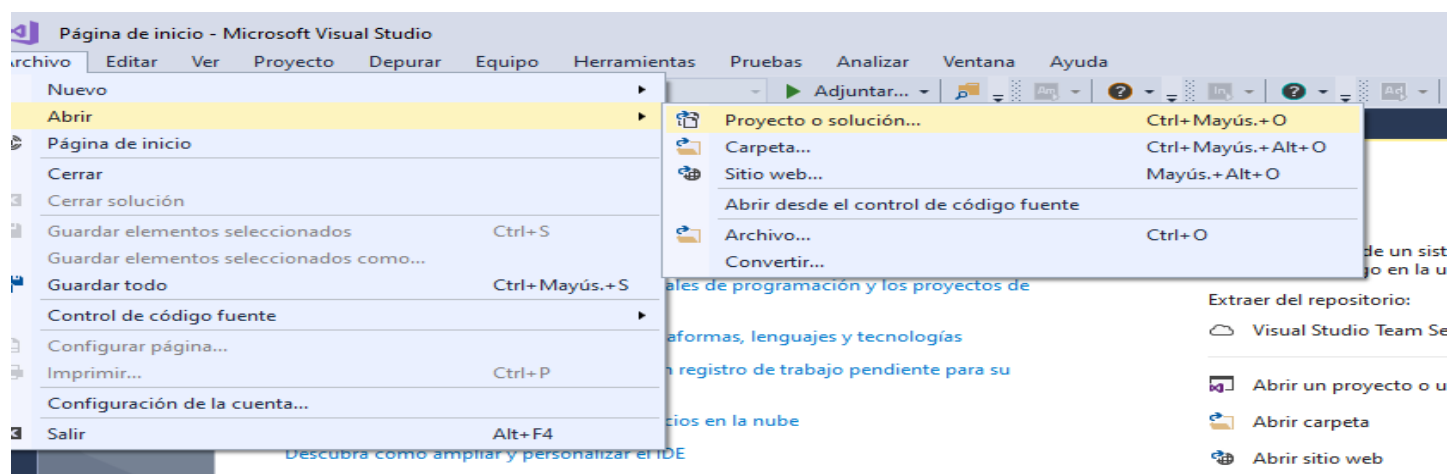
The screenshot shows a terminal window on the left and a file explorer on the right. The terminal displays the output of a series of 'Processing file' commands, indicating the successful compilation of various test files. The file explorer shows the contents of the 'src' directory, with the file 'delft3d_open' highlighted, showing it was created on 06/09/2020 at 08:00 p.m. and has a size of 109 KB.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
buildvs15	18/04/2018 07:08 a. m.	Script de comand...	4 KB
ChangeLog	23/12/2010 08:25 a. m.	Archivo	0 KB
clean	16/03/2012 08:59 a. m.	Script de comand...	1 KB
clean.sh	15/02/2013 12:00 p. m.	Archivo SH	3 KB
common.am	23/01/2018 10:01 a. m.	Archivo AM	5 KB
configure.ac	02/05/2018 02:45 a. m.	Archivo AC	33 KB
COPYING	10/06/2011 12:08 p. m.	Archivo	1 KB
delft3d_open	06/09/2020 08:00 p. m.	Microsoft Visual S...	109 KB
dflowfm_open	06/09/2020 08:00 p. m.	Microsoft Visual S...	68 KB
doxyfile_delft3d	12/09/2011 09:10 a. m.	Archivo	65 KB
doxyfile_delwaq	08/04/2013 03:01 a. m.	Archivo	66 KB
global_config.inc	19/02/2018 01:52 a. m.	Include File	1 KB
INSTALL	25/05/2012 05:52 a. m.	Archivo	0 KB
install	09/05/2011 04:59 a. m.	Script de comand...	1 KB
install.sh	05/10/2017 07:02 a. m.	Archivo SH	2 KB
io_netcdf	06/09/2020 08:00 p. m.	Microsoft Visual S...	15 KB
Makefile.am	22/09/2017 06:34 a. m.	Archivo AM	1 KB
nefis	06/09/2020 08:00 p. m.	Microsoft Visual S...	23 KB
NEWS	23/12/2010 08:25 a. m.	Archivo	0 KB
prepare_sln	01/03/2017 04:31 a. m.	Script de comand...	1 KB
prepare_sln	06/09/2020 07:58 p. m.	Python File	29 KB
README	06/06/2018 03:11 a. m.	Archivo	7 KB
TODO	25/05/2012 05:52 a. m.	Archivo	1 KB

Etapa 4 – Compilación del código fuente

Con Visual studio, se generan los archivos que necesita la GUI para ejecutar simulaciones.

Paso 1. Dentro de visual studio, abrir el archivo **delft3d_open.sn1**. Menú archivo – abrir – proyecto o solución.



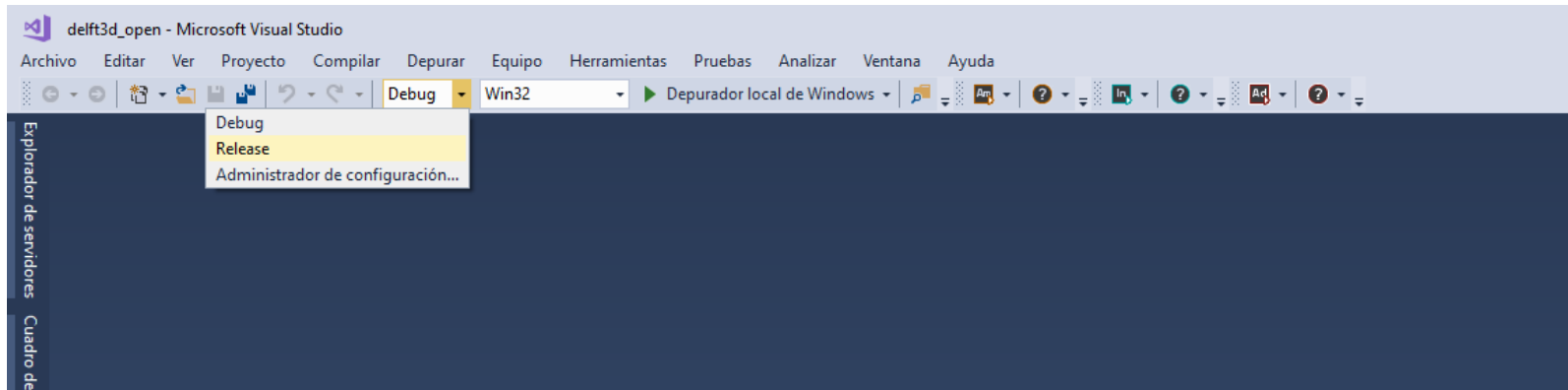
Paso 2. Localizar y cargar el archivo **delft3d_open.sn1**.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
engines_gpl	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
logs	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
m4	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
plugins_lgpl	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
scripts_lgpl	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
third_party	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
third_party_open	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
tools_gpl	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
tools_lgpl	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
utils_gpl	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
utils_lgpl	06/09/2020 03:29 p. m.	Carpeta de archivos	
delft3d_open	06/09/2020 08:00 p. m.	Microsoft Visual S...	109 KB
dflowfm_open	06/09/2020 08:00 p. m.	Microsoft Visual S...	68 KB
io_netcdf	06/09/2020 08:00 p. m.	Microsoft Visual S...	15 KB
nefis	06/09/2020 08:00 p. m.	Microsoft Visual S...	23 KB

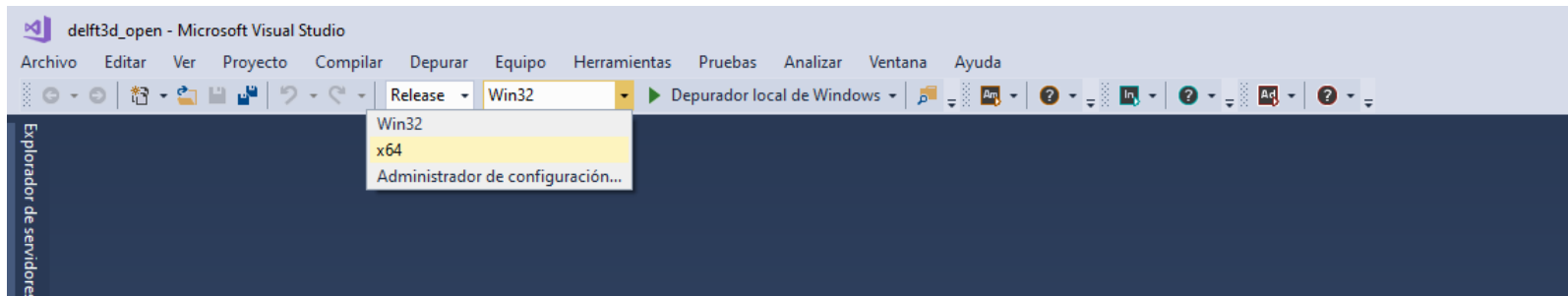
Nombre de archivo: Todos los archivos de proyecto

Paso 3. Esperar a que cargue por completo el archivo.

Paso 4. En la barra de compilación, cambiar Debug por Release.



Paso 5. En la barra de compilación, cambiar Win32 por x64.



Paso 8. Terminada la compilación, los archivos que se generaron estarán dentro de la carpeta **x64** contenida en una nueva carpeta llamada **bin** localizada dentro de **src**.

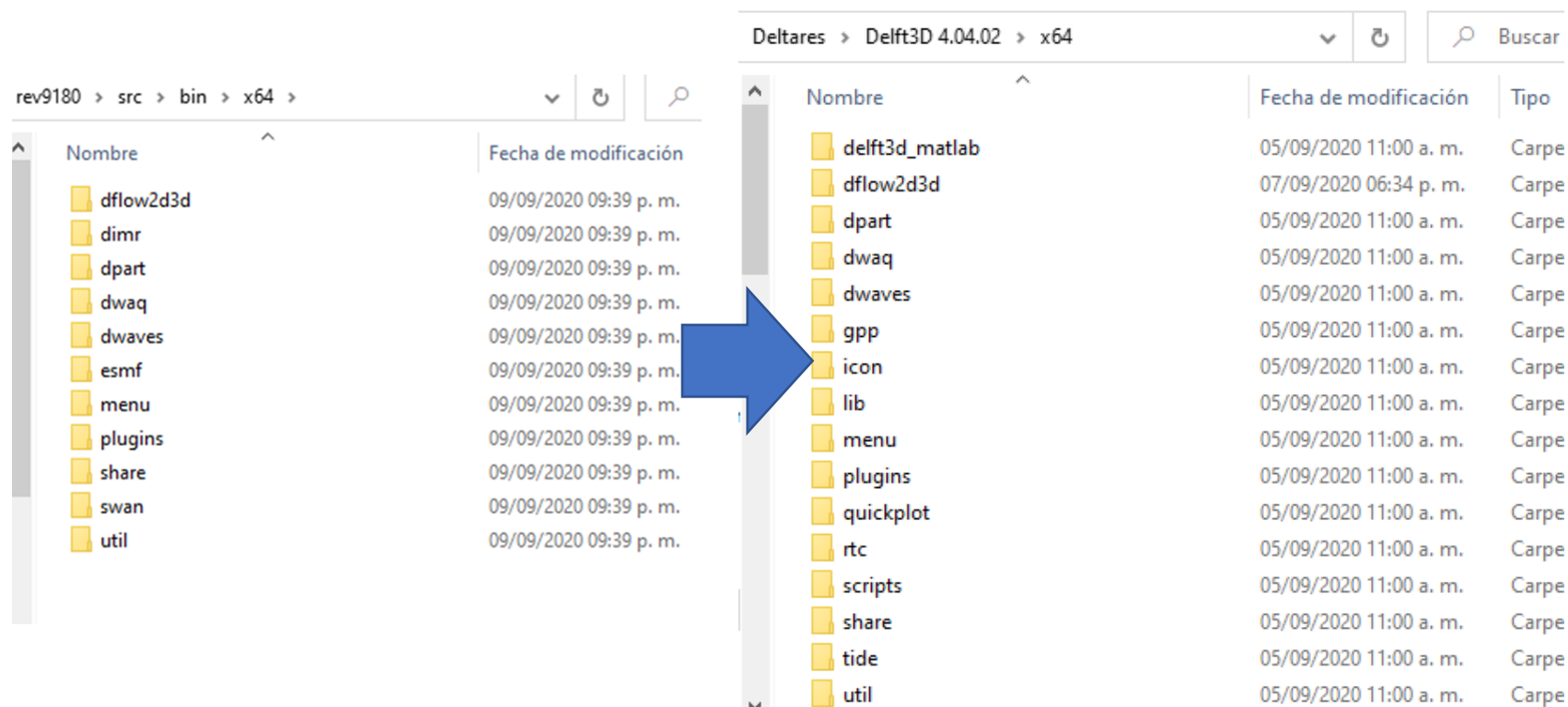
rev9180 > src > bin > x64 >

Buscar en x64

Nombre	Fecha de modificación	Tipo
dflow2d3d	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos
dimr	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos
dpart	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos
dwaq	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos
dwaves	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos
esmf	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos
menu	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos
plugins	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos
share	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos
swan	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos
util	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpeta de archivos

Etapa 5 – Transferir los archivos compilados a la GUI

Transferir los archivos y carpetas generadas (Kernels) a su ubicación similar dentro del directorio donde está instalada la GUI. En todo caso, sobrescribir los archivos de la GUI con los generados por la compilación y añadir al directorio **x64** aquellas carpetas que no existían originalmente

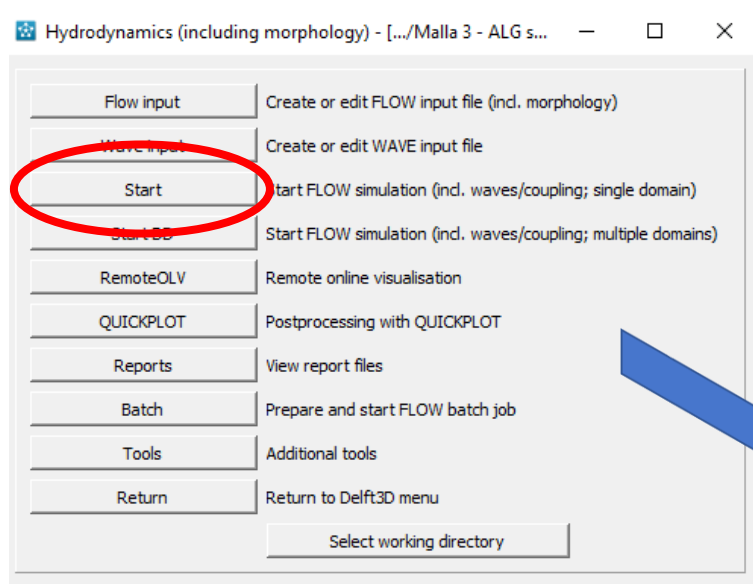


Nombre	Fecha de modificación	Tipo
dflow2d3d	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe
dimr	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe
dpart	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe
dwaq	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe
dwaves	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe
esmf	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe
menu	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe
plugins	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe
share	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe
swan	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe
util	09/09/2020 09:39 p. m.	Carpe

Nombre	Fecha de modificación	Tipo
delft3d_matlab	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
dflow2d3d	07/09/2020 06:34 p. m.	Carpe
dpart	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
dwaq	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
dwaves	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
gpp	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
icon	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
lib	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
menu	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
plugins	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
quickplot	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
rtc	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
scripts	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
share	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
tide	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe
util	05/09/2020 11:00 a. m.	Carpe

Etapa 6 – Probar una simulación

Finalmente, en la GUI ejecutar una simulación.



```
-----
Command: run Delft3D-FLOW
Starting Delft3D-FLOW computation ...
-----
```

```
-----
Deltares, FLOW2D3D Version 6.03.00.000000, Sep 7 2020, 18:24:01
flow2d3d.dll entry Flow2D3D::Run
-----
```

```
Part I - Initialisation Time Dep. Data module...
        runid : test3
*** full scale free slip calculation for HLES
Part II - Creating intermediate files...
Part III - Initialisation of the Execution module...
Part IV - Reading complete MD-file...
*** HLES subgrid viscosity model activated
*** full scale free slip calculation for HLES
Part V - Initialisation & checking input...
Part VI - Initialisation & checking second part...
Part VII - Initialisation output...
Part VIII - Start Simulation...
```

```
Time to finish 0s, 0.0% completed, time steps left 864000
Time to finish 1d 17h, 0.0% completed, time steps left 863999
Time to finish 1d 8h, 0.0% completed, time steps left 863998
Time to finish 1d 6h, 0.0% completed, time steps left 863997
Time to finish 1d 6h, 0.0% completed, time steps left 863996
Time to finish 1d 5h, 0.0% completed, time steps left 863995
Time to finish 1d 4h, 0.0% completed, time steps left 863994
Time to finish 1d 4h, 0.0% completed, time steps left 863993
Time to finish 1d 4h, 0.0% completed, time steps left 863992
```

Reconocimientos

Este documento se elaboró siguiendo los lineamientos e instrucciones de:

Equipo Deltares

- <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/source-code>

Presentación del Dr. Gabriel Ruiz

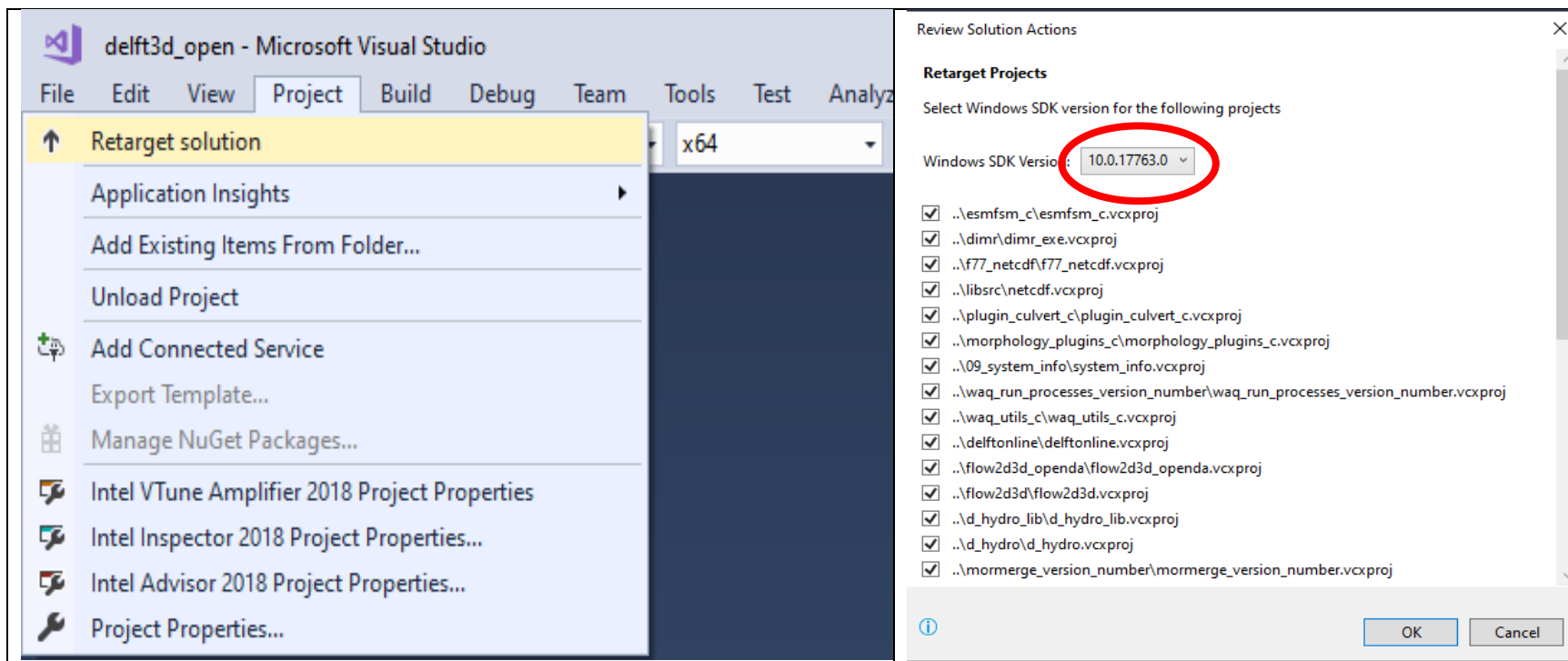
- <https://www.researchgate.net/publication/323275871> Compilacion del Sistema de Modelado Numerico DELFT 3D Open Source para Microsoft Windows

Anexo – Posibles errores

Durante la compilación, el autor experimentó los siguientes errores:

1 C1083 visual studio unable to find **assert.h**

Solución: Ya cargado el archivo **delft3d_open.sn1**, ir al menú Project, después Retarget solution y dar click. En la ventana que aparece seleccionar la Windows SDK versión 10.0.17633.0 y dar click en OK. Finalmente, esperar a que visual studio actualice y volver a compilar el proyecto.



2 RC1015 cannot open include file **afxres.h**

Solución: Abrir el Visual Studio Installer. Ir a la pestaña componentes individuales e instalar **ATL de Visual C++ para x86 y x64** además de **MFC de Visual C++ para x86 y x64**.

