

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DEL NIVEL ACTUAL DE CONTAMINACIÓN Y MODELO DE SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA BAHÍA DE LA HABANA

4.1 GENERALIDADES

4.1.1 ANÁLISIS DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN

El deterioro de la calidad del agua de la Bahía de La Habana es debido al nivel de contaminantes recibido de los ríos, de los receptores de aguas albañales y desagües urbanos que se vierten en la bahía o a través de vertederos ubicados a lo largo de la costa de la bahía. Los niveles de contaminación generados atraviesan un proceso de transformación durante el tratamiento previo a su descarga así como durante su transportación entre el punto de generación y el punto de desagüe a la bahía. Las cargas de contaminantes vertidas en la bahía atraviesan una transformación posterior dentro de la misma a través de varios procesos físicos y bioquímicos y la dilución por el intercambio de las mareas con el mar abierto. La comprensión del mecanismo que comienza en las fuentes de generación de cargas contaminantes a la bahía y su transformación dentro de ésta, es un requerimiento básico para llevar a cabo cualquier medida eficiente para el control de la contaminación.

4.1.2 MODELO DE SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA BAHÍA DE LA HABANA

La calidad del agua de la Bahía de La Habana está influenciada por procesos complejos dentro de la misma y, por lo tanto, el comportamiento de la calidad del agua de ésta es también complejo. El modelo de simulación del agua, utilizado para describir estos procesos complejos, es una herramienta efectiva que permite caracterizar la contaminación del agua de la bahía y evaluar las medidas de control de la contaminación, así como la reducción de la carga de contaminantes a la misma, a través del mejoramiento del sistema de desagües. La elaboración de un modelo de simulación de la calidad del agua puede utilizarse como una herramienta de administración para la toma de decisiones en el futuro.

El modelo de simulación de la calidad del agua, basada en MIKE3, ha sido desarrollada y será transferida a WASP6/DYNHYD5. La descripción del desarrollo del modelo en el presente capítulo, esta basada en informaciones disponibles. El modelo esta siendo actualizado con los resultados de las actuales mediciones y muestreos de la calidad del agua llevados a cabo en este estudio.

4.2 CARGAS DE CONTAMINANTES

4.2.1 METODOLOGÍA

Fuentes de contaminantes: La generación de las cargas de contaminantes es clasificada como el resultado de las aguas albañales generadas por las actividades domesticas, institucionales e industriales.

Cargas de contaminantes: La carga de contaminantes es estimada en el punto de generación y en el punto del desagüe hacia la bahía. Los estimados de la generación de la carga de contaminantes son realizados basándose en la unidad de carga contaminante. El desagüe de la carga de contaminantes hacia la bahía es estimado basándose en los datos del monitoreo tomados al final de la corriente de los drenajes y de los ríos que desaguan en la bahía. Las industrias a lo largo de la periferia de que desaguan directamente son también estimadas, basándose en los datos del monitoreo. La tabla 2.1 muestra nueve de las cuencas que

constituyen la cuenca de la Bahía de La Habana y los estimados de las cargas son realizados para cada una de las nueve cuencas para el año 1996 y 2000.

La relación entre la generación de la carga de contaminantes y del desagüe de la carga de contaminantes, en cada una de las cuencas, serán utilizadas para estimar las futuras cargas de contaminantes vertidas en la bahía.

Unidad de Carga Contaminante: Los resultados de la investigación realizada sobre la generación de origen doméstico indican que la unidad de generación de BOD (5) per cápita era de 43 gpcd (ref. 1) en 1978, y de 29.3 gpcd en 1996 (ref. 2), investigado respectivamente para una escuela de entrenamiento vocacional y para una pequeña comunidad en las afueras de la Ciudad de La Habana. El decrecimiento fue explicado debido al declive económico durante el “período especial”. No hay investigaciones recientes sobre la unidad de la carga de contaminante y el estimado se hace en 40 gpcd a modo de reflejar las condiciones actuales.

4.2.2 CARGA DE CONTAMINACIÓN GENERADA

Los estimados se hacen para el año 1996 y el año 2000. La tabla 4.1 muestra el estimado de la población de la cuenca para los años 1996 y 2000. La tabla 4.2 muestra la carga de contaminación doméstica generada, basada en la unidad de las cargas de contaminantes. La tabla 4.3 muestra la generación de contaminantes de origen doméstico, industrial e institucional en términos de BOD (5). Las cargas de contaminantes de origen institucional es estimada como un porciento del total de la carga de contaminantes generados de origen doméstico en proporción al consumo de agua doméstico e institucional. El total de la carga institucional será distribuida entre las cuencas siguiendo la identificación de los ‘grandes consumidores’ (más de 900 m3 del consumo promedio mensual de agua). La carga industrial esta basada en los datos del monitoreo de CIMAB.

Tabla 4.1 Población dentro de la Cuenca de la Bahía de La Habana, Año 1996 & 2000

| Cuenca | Area,ha | Población 1996, GEF/ DPPFA | Densidad Población 1996, persona/ha | Población 2000 | Densidad Población 2000, persona/ha |
|----------------------|---------|----------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Habana Vieja | 257 | 110,641 | 430 | 101,015 | 392 |
| Dren Arroyo Matadero | 679 | 128,160 | 189 | 120,189 | 177 |
| Dren Agua Dulce | 648 | 148,581 | 229 | 139,185 | 215 |
| Rio Luyano | 2,995 | 252,223 | 84 | 241,927 | 81 |
| Rio Martin Perez | 1,309 | 72,797 | 56 | 72,916 | 56 |
| Rio Tadeo | 256 | 14,059 | 55 | 13,966 | 55 |
| Area Refinería | 342 | 21,946 | 64 | 22,793 | 67 |
| Casa Blanca | 259 | 12,991 | 50 | 14,231 | 55 |
| Cabaña | 44 | 639 | 15 | 671 | 15 |
| Total | 6,790 | 762,037* | 106 | 726,893 | 107 |

Nota: Estimados de Población revisados basado en los limites de la cuenca de la Bahía de La Habana

Tabla 4.2 Generación de la Carga Contaminante Doméstica, Año 1996 & 2000

| Cuenca | Año 1996 | | | Año 2000 | | |
|----------------------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| | DBO ₅ | T-N | T-P | DBO ₅ | T-N | T-P |
| | kg/d | Kg/d | kg/d | kg/d | kg/d | kg/d |
| Habana Vieja | 4,426 | 819 | 210 | 4,041 | 748 | 192 |
| Dren Arroyo Matadero | 5,126 | 948 | 244 | 4,808 | 889 | 228 |
| Dren Agua Dulce | 5,943 | 1,099 | 282 | 5,567 | 1,030 | 264 |
| Rio Luyano | 10,089 | 1,866 | 479 | 9,677 | 1,790 | 460 |
| Rio Martin Perez | 2,912 | 539 | 138 | 2,917 | 540 | 139 |
| Rio Tadeo | 562 | 104 | 27 | 559 | 103 | 27 |
| Area Refinería | 878 | 162 | 42 | 912 | 169 | 43 |
| Casa Blanca | 520 | 96 | 25 | 569 | 105 | 27 |
| Cabaña | 26 | 5 | 1 | 27 | 5 | 1 |
| Total | 30,481 | 5,639 | 1,448 | 29,076 | 5,379 | 1,381 |

Nota: Las cargas por unidad de contaminantes para BOD₅, T-N y T-P son estimadas en 40, 7.4 y 1.9 gpcd.

Tabla 4.3 Total de Generación de Carga DBO₅, Año 1996 & 2000 (Preliminar)

| Cuenca | Año 1996 | | | | Año 2000 | | | |
|----------------------|---------------|-----------|------------|--------|---------------|-----------|------------|--------|
| | Domestic a | Inst./com | Industrial | Total | Domestic a | Inst./com | Industrial | Total |
| | kg/d | kg/d | kg/d | kg/d | kg/d | kg/d | kg/d | kg/d |
| Habana Vieja | 4,426 | | 29 | 4,455 | 4,041 | | 29 | 4,070 |
| Dren Arroyo Matadero | 5,126 | | 0 | 5,126 | 4,808 | | 0 | 4,808 |
| Dren Agua Dulce | 5,943 | | 0 | 5,943 | 5,567 | | 0 | 5,567 |
| Rio Luyano | 10,089 | | 26,505 | 36,594 | 9,677 | | 3,010 | 12,688 |
| Rio Martin Perez | 2,912 | | 273 | 3,185 | 2,917 | | 820 | 3,737 |
| Rio Tadeo | 562 | | 1,719 | 2,281 | 559 | | 340 | 899 |
| Area Refinería | 878 | | 22,823 | 23,701 | 912 | | 21,723 | 22,634 |
| Casa Blanca | 520 | | 23 | 542 | 569 | | 23 | 592 |
| Cabaña | 26 | | 0 | 26 | 27 | | 0 | 27 |
| Total | 30,481 | 15,241 | 51,372 | 81,853 | 29,076 | 14,538 | 25,946 | 55,021 |

Nota: Las cargas Institucionales y comerciales son preliminares y serán distribuidas entre las cuencas tras el análisis del consumo de agua y la información sobre la locación..

4.2.3 CARGAS DE CONTAMINACIÓN VERTIDAS

La tabla 4.4 muestra la carga de contaminantes vertidos directamente a la bahía a través de los ríos y tragantes.

La tabla 4.5 muestra el total de la carga de contaminantes vertidos en la bahía, que incluye la carga de contaminantes vertidos por las industrias ubicadas en la periferia.

Tabla 4.4 Cargas de Contaminantes a través de los Ríos y Drenajes en el Año 1996/97 & 2002

| Cuenca | 1996/97 | | | | 2002 | | | |
|----------------------|-------------------|------------------|---------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|--------------|
| | Flujo | DBO ₅ | T-N | T-P | Flujo | DBO ₅ | T-N | T-P |
| | m ³ /d | kg/d | kg/d | kg/d | m ³ /d | kg/d | kg/d | kg/d |
| Habana Vieja | 7,516 | 801 | 16 | 13 | 8,554 | 1,291 | 144 | 77.5 |
| Dren Arroyo Matadero | 78,126 | 20,015 | 3,918 | 1,326 | 77,760 | 8,942 | 610 | 1,053 |
| Dren Agua Dulce | 46,152 | 5,630 | 1,099 | 356 | 43,226 | 6,770 | 529 | 1,171 |
| Rio Luyano | 120,960 | 28,500 | 4,800 | N/A | 114,860 | 9,476 | 1,068 | N/A |
| Rio Martin Perez | 35,597 | 356 | 320 | 180 | 62,105 | 1,245 | 239 | 49 |
| Rio Tadeo | 8,004 | 1,537 | 99 | 41 | 8004 | 1,537 | 99 | 41 |
| Area Refinería | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Casa Blanca | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cabaña | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total | 296,355 | 56,839 | 10,252 | 4,616 | 314,509 | 29,261 | 4,622 | 2,391 |

Nota: La carga total incluye aquella vertida directamente a la bahía por las industrias. La información sobre las industrias directamente vertiendo no esta disponible para todas las grandes industrias en 1996/97 y la información para 2002 está asumida. La información mostrada como 610 indica un desbalance en la concentración de nitrógeno y fósforo. N/A indica que la información no está disponible. El total es obtenido asumiendo proporciones similares de BOD:N como la información sobre el Rio Martin Perez es N/A. Los valores desbalanceados son ajustados con la información del 96/97. Los totales subrayados 4,616 son valores ajustados para los valores desbalanceados y N/A.

Tabla 4.5 Total de Cargas Contaminantes Vertidas a la Bahía en el Año 1996/97 & 2002

| Cuenca | 1996/97 | | | | 2002 | | | |
|----------------------|-------------------|------------------|---------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|--------------|
| | Flujo | DBO ₅ | T-N | T-P | Flujo | DBO ₅ | T-N | T-P |
| | m ³ /d | kg/d | kg/d | kg/d | m ³ /d | kg/d | kg/d | kg/d |
| Habana Vieja | 7,619 | 830 | 86 | 15 | 8,657 | 1,320 | 214 | 79 |
| Dren Arroyo Matadero | 78,126 | 20,015 | 3,918 | 1,326 | 77,760 | 8,942 | 610 | 1,053 |
| Dren Aqua Dulce | 46,152 | 5,630 | 1,099 | 356 | 43,226 | 6,770 | 529 | 1,171 |
| Rio Luyano | 121,955 | 29,803 | 6,738 | N/A | 115,417 | 9,784 | 1,627 | N/A |
| Rio Martin Perez | 36,070 | 629 | 838 | 186 | 62,578 | 1,518 | 245 | 55 |
| Rio Tadeo | 8,585 | 3,256 | 2,396 | 156 | 8,517 | 1,812 | 595 | 46 |
| Area Refinería | 6,406 | 22,823 | 54 | 1 | 475 | 21,723 | 54 | 1 |
| Casa Blanca | 80 | 23 | 54 | 1 | 80 | 23 | 54 | 1 |
| Cabaña | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 304,993 | 83,009 | 15,184 | 4,820 | 316,710 | 51,892 | 3,928 | 2,406 |

Note: La Carga total incluye la que ha sido vertida directamente a la Bahía por las industrias. La información sobre los vertimientos directos de las industrias no están disponible en todos los casos para 1996/97 y la información para 2002 es calculada.

4.2.4 TRABAJO ULTERIOR

La tabla 4.6 muestra los resultados preliminares de la relación entre la generación y el vertimiento del BOD(5). Se proyecta recolectar las muestras de las cargas de contaminación generadas en las cuencas de La Habana Vieja, Dren Arroyo Matadero y en la Dren Agua Dulce por el colector principal y vertidas fuera de la bahía, en las cercanías de la Playa del Chivo. Sin

embargo, debido a las conexiones ilegales a los desagües de las aguas de lluvias y las interconexiones/inundaciones entre el colector principal y los desagües de las aguas de lluvias, las cargas de contaminación generadas en dichas áreas son vertidas en la bahía a través de los desagües para las aguas de lluvias. Además, el colector Paralelo Orengo (Figura 5.1) le da servicio a las áreas fuera de la cuenca de la Bahía de La Habana y conectado al colector principal, desde donde parte de las aguas albañales es vertida a la bahía a través de los drenajes de las aguas de lluvias. Serán necesarias investigaciones posteriores para cuantificar el vertimiento de las aguas albañales desde los colectores hacia los drenajes de las aguas de lluvia en estas áreas. Asimismo, la generación estimada de cargas contaminantes es menor que las cargas vertidas para Arroyo Tadeo, el que también necesita ulterior investigación.

Tabla 4.6 Relación entre la Generación y Vertimiento (Preliminar)

| Cuenca | Generación estimada de BOD ₅ , kg/d | | Vertimiento planificado a la Bahía | Vertimiento actual de BOD ₅ , kg/d | | Observaciones |
|----------------------|--|--------|------------------------------------|---|--------|---|
| | 1996 | 2000 | | 1996/97 | 2002 | |
| Habana Vieja | 4,455 | 4,070 | 0 | 830 | 1,320 | Se presume que las aguas albañales sean colectadas por el Colector Principal. |
| Dren Arroyo Matadero | 5,126 | 4,808 | 0 | 20,015 | 8,942 | |
| Dren Agua Dulce | 5,943 | 5,567 | 0 | 5,630 | 6,770 | |
| Rio Luyano | 36,594 | 12,688 | | 29,803 | 9,784 | |
| Rio Martin Perez | 3,185 | 3,737 | | 629 | 1,518 | |
| Rio Tadeo | 2,281 | 899 | | 3,256 | 1,807 | Requiere investigación |
| Area Refinería | 23,701 | 22,634 | | 22,823 | 21,723 | |
| Casa Blanca | 542 | 592 | | 23 | 23 | |
| Cabaña | 26 | 27 | | 0 | 0 | |
| Total | 81,853 | 55,021 | | 83,009 | 51,888 | |

4.3 MODELO DE SIMULACION DE LA CALIDAD DEL AGUA

4.3.1 METODOLOGÍA

La Figura 4.1 muestra la diagrama del flujo de la simulación de la calidad del agua para la Bahía de La Habana. La simulación de la calidad del agua esta dividida en dos fases: una de las cuales es el establecimiento del modelo y el otro es la predicción del futuro de la calidad del agua. En la fase del establecimiento del modelo, se identifica y analiza el fenómeno hidráulico más importante y las características de la contaminación del agua de la bahía, es llevado a cabo antes de la construcción del hidrodinámico (en lo adelante mencionado como HD) y la calidad del agua (en lo adelante mencionado como WQ) respectivamente. En la calibración de los modelos, los parámetros se identifican para reproducir las condiciones medidas para el período de calibración. Con la aplicación de los modelos calibrados, se estiman las posibles cargas que pueden llegar al medio acuático. Finalmente, la futura calidad del agua de la bahía responde a las alternativas, serán predecidas y evaluadas.

4.3.2 SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA BAHÍA DE LA HABANA

(1) Montaje del Modelo

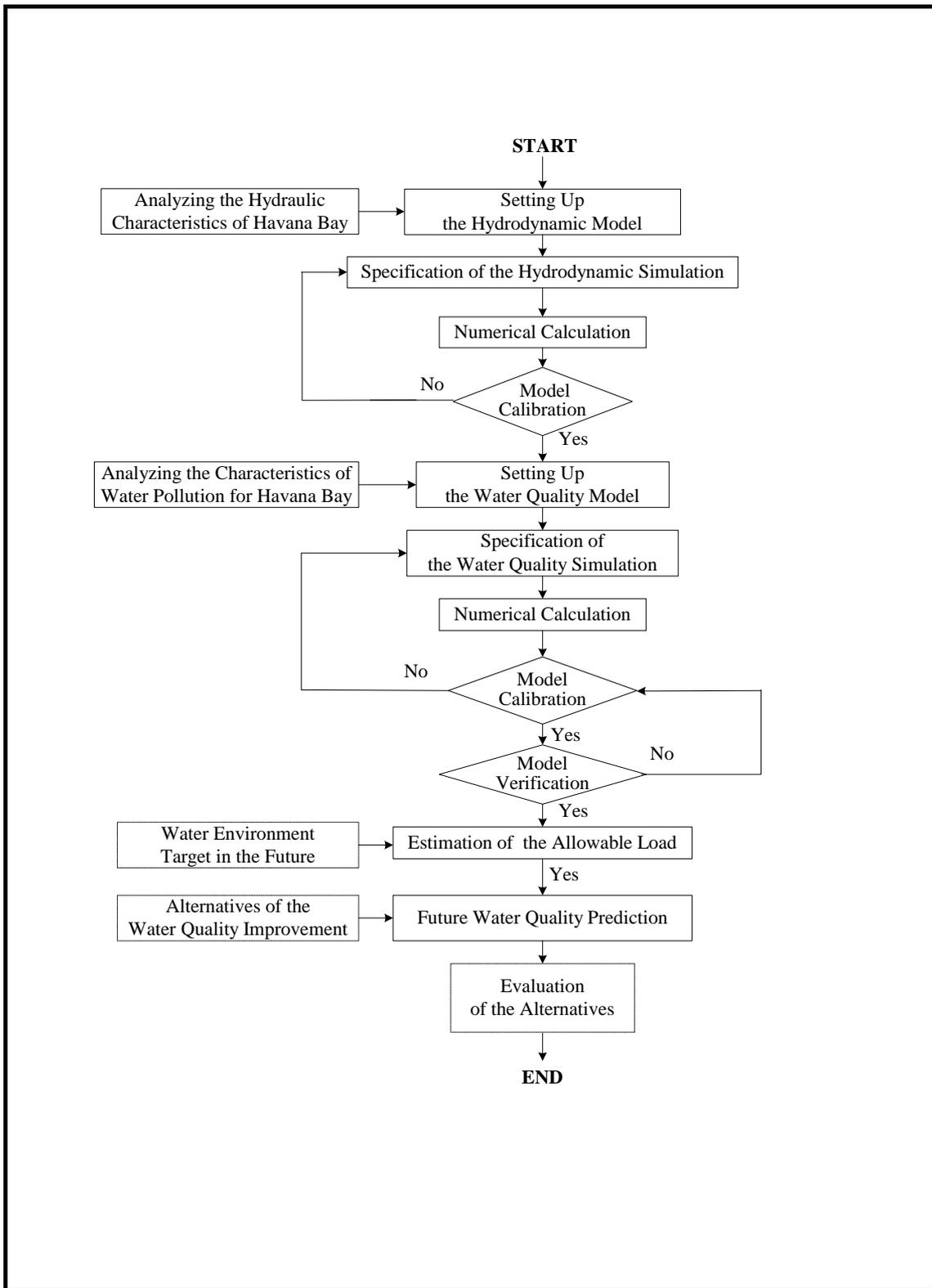
Antes del montaje de los modelos hidrodinámicos, es necesario identificar el fenómeno hidráulico más importante y los factores que afectan el transporte de contaminantes en la bahía. Generalmente, la corriente en los estuarios y las regiones costeras, consisten en corrientes de

mareas, flujos de residuales de las mareas, corrientes de arrastre (corrientes generadas por el viento), flujo de corrientes de densidad, corrientes de inclinaciones y oleaje, etc. Entre estas corrientes, el flujo de mareas y de densidad, juegan un papel importante en el transporte de contaminantes en las aguas de mar de la bahía. Especialmente en las aguas bajas de la bahía, el influjo de agua dulce de los ríos y de otras fuentes, usualmente causan la ocurrencia de un destacado flujo de densidad, que promueve la resuspensión y liberación de sedimentos contaminantes. Acorde con los resultados de investigaciones hechas en el pasado, importantes características hidráulicas de la Bahía de La Habana, pueden ser resumidas en la siguiente forma:

- Las corrientes de las mareas dentro de la bahía son relativamente pequeñas, debido a su entrada estrecha (270 m de ancho) y la baja amplitud de las mareas (0.29m promedio).
- El tiempo de retención del agua dulce en la bahía es aproximadamente de 4 meses y el intercambio de aguas entre la bahía y el mar abierto es relativamente pequeño.
- La profundidad promedio y máxima de la bahía es de 9 y 17 metros respectivamente. Por lo tanto, la estratificación de la temperatura del agua sería fácilmente descompuesta por el viento o por las fuertes corrientes. Por otra parte, el flujo de densidad, tanto en dirección horizontal como vertical, podría ser fuerte en algunos estuarios, como Atares y Guasabacoa, debido al influjo de grandes cantidades de agua dulce provenientes de ríos y drenajes.
- El intercambio de calor entre el agua de mar y la atmósfera, pudiera ser uno de los factores que más inciden en la temperatura del agua dentro de la bahía.
- Las precipitaciones, especialmente en la temporada de lluvia, podría promover la generación de la corriente de densidad en la bahía.

Basándonos en las características hidráulicas antes mencionadas, un modelo hidrodinámico tridimensional es seleccionado en esta simulación. Tres principales componentes de corrientes, como la corriente de las mareas, las corrientes de arrastre y los flujos de densidad, son tomados en cuenta en el modelo. La Figura 4.2 muestra el esbozo del modelo aplicado en la simulación.

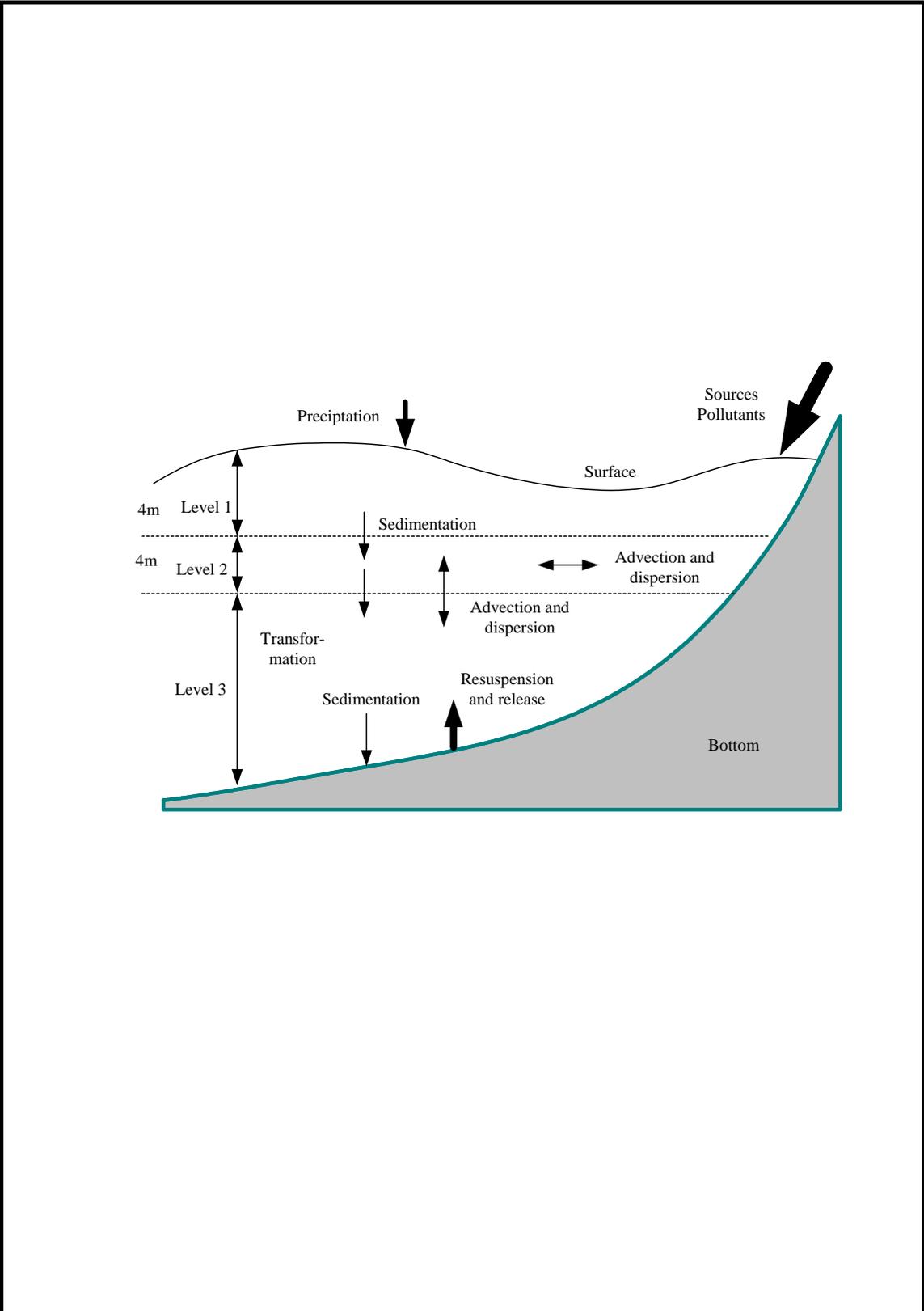
Las ecuaciones fundamentales aplicadas en el modelo hidrodinámico son mostradas en el apéndice, al final de este capítulo.



ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.1
Flujograma Para La Simulacion De La Calidad Del Agua De La Bahia De La Habana



ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

Figura 4.2 Esquema del Modelo Aplicado en la Simulación

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

(2) Condiciones de Cálculo para la Simulación Hidrodinámica

Las condiciones de calculo para la Simulación Hidrodinámica incluyen la batimetría, las fronteras, las condiciones iniciales, fuente así como el parámetro del modelo. Las especificaciones para cada condición serán descritas como sigue:

Batimetría: El área de cálculo para la simulación hidrodinámica es toda el área del la Bahía de La Habana. Referida al mapa de náutico del Puerto de La Habana (1), el área de cálculo es ilustrada en la Figura 4.3. El área de la bahía tiene 5.2 km² y el volumen es de 47 millones de m³. y la tamaño de la reja es de 30 x 30 m en dirección horizontal. En dirección vertical el área esta dividida en tres niveles, (capas) y cada nivel tiene 4m. La distribución de la profundidad del agua para el área es mostrada en la Figura 4.5. La profundidad promedio del agua para el área es de 9 m y el máximo es de 17 m.

Fronteras abiertos: Los fronteras abiertos son determinados considerando el objetivo de la simulación, las características actuales de la Bahía de La Habana, así como la ubicación de las estaciones de observación de las corrientes y de la calidad de agua. En las simulaciones del HD y el WQ, los fronteras se ubican en la boca de la bahía, como se muestra en la Figura 4.4.

Altura de la marea: La estación de las mareas de la Bahía de La Habana, está ubicada en Punta Santa Catalina, con la latitud de 23°08.6'N y una longitud de 82°20.3'N (Figura 4.2). La altura aproximada de la marea es utilizada como el nivel del agua de las fronteras(2).

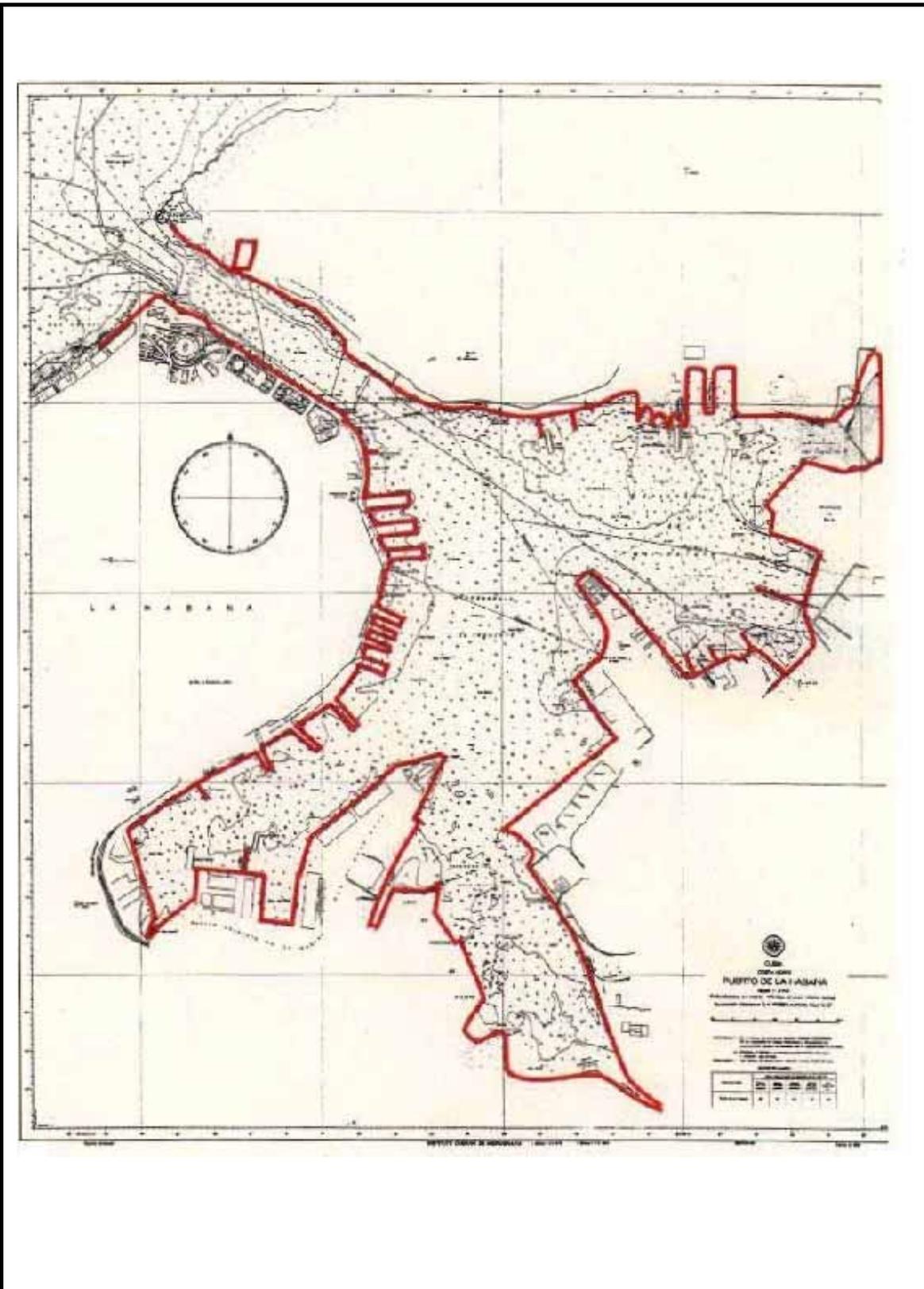
Condiciones meteorológicas: La temperatura del aire, las precipitaciones, velocidad y dirección del viento son especificadas mediante el uso de las informaciones de meteorológicas, brindadas por el Observatorio Meteorológico de La Habana. El promedio de la temperatura diaria, de las precipitaciones, así como de la velocidad y dirección del viento, son utilizados en la simulación hidrodinámica.

Condiciones iniciales: Antes de la simulación se necesita especificar el nivel inicial de las aguas, la temperatura y salinidad. Estas condiciones están especificadas de acuerdo con las informaciones de observaciones existentes. Los valores para estos parámetros son mostrados en la tabla 4.7

Tabla 4.7 Condiciones Iniciales para la Simulación Hidrodinámica

| Aspectos | Temporada Lluvias | Temporada Sequía |
|--------------------|-------------------|------------------|
| Nivel del agua (m) | 0.16 | 0.20 |
| Temperatura () | 28.5 | 26.8 |
| Salinidad (psu) | 33.3 | 33.1 |

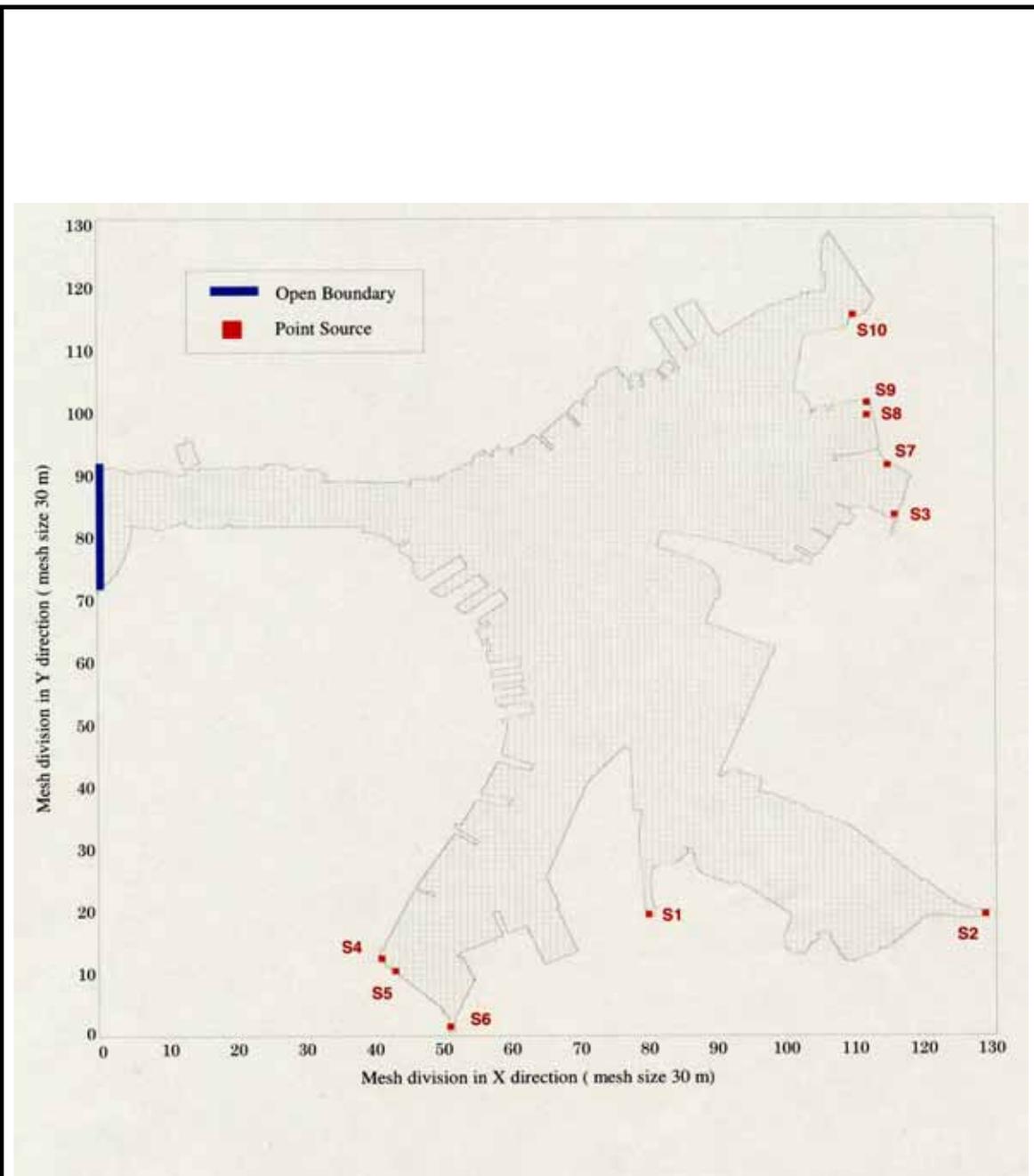
Fuente: Se han tomado en cuenta diez fuentes en la simulación hidrodinámica, de las cuales cuatro son aguas residuales de la industria, tres de ríos, así como tres de canales de desagües. La ubicación de las fuentes es mostrada en la Figura 4.4. Usualmente, las condiciones de las fuentes son especificadas basándose en las informaciones apropiadas de monitoreo, las cuales representan el típico estado de las fuentes. Debido a las limitaciones en el número de informaciones de las fuentes y gran variación en los resultados de las diferentes observaciones, es difícil establecer el reflujos de las características de las fuentes. Por lo tanto, los resultados de las últimas investigaciones son directamente utilizadas aquí para especificar la condición de la fuente, sin embargo, el periodo de observación es diferente del de la simulación. La tabla 4.8 muestra los resultados de la especificación de la fuente.



ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

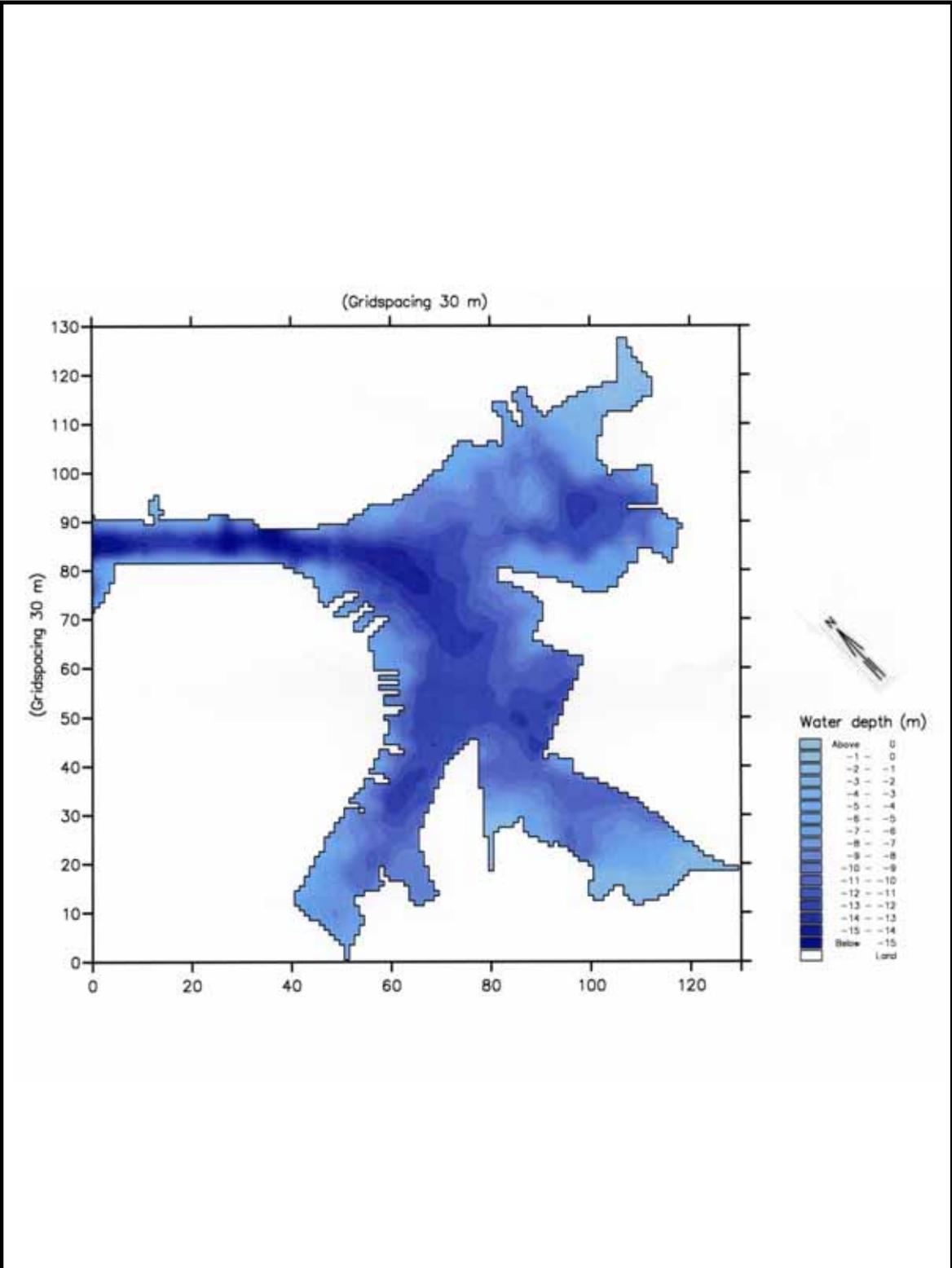
Figura 4.3
Area Objetivo para la Simulación Hidrodinámica y de la Calidad del Agua en la Bahía de La Habana



ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

Figura 4.4 Ubicación de las Fronteras Abiertas y Origen de Fuentes

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN



ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

Figura 4.5
Distribucion de las Profundidades del Agua de la Bahía de la Habana

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Tabla 4.8 Especificación de las Fuentes

| Classification | Sources | NO. | Inflow point | | | Flowrate (m3/s) | Temperature () | Salinity (‰) |
|-----------------------|-----------------------------------|-----|--------------|-----|---|-----------------|-----------------|--------------|
| | | | X | Y | Z | | | |
| Rivers | Luyano | S1 | 80 | 19 | 3 | 1.329 | 27 | 1 |
| | Martin Perez | S2 | 129 | 19 | 3 | 0.719 | 27 | 1 |
| | Tadeo | S3 | 116 | 82 | 3 | 0.093 | 27 | 1 |
| Drainage channels | San Nicolas | S4 | 41 | 12 | 3 | 0.099 | 27 | 1 |
| | Arroyo Matadero | S5 | 43 | 10 | 3 | 0.900 | 27 | 1 |
| | Agua Dulce | S6 | 51 | 1 | 3 | 0.500 | 27 | 1 |
| Industrial wastewater | Refinería de petróleo Níco López* | S7 | 115 | 91 | 3 | 0.010 | 27 | 1 |
| | | S8 | 112 | 99 | 3 | 0.037 | 27 | 1 |
| | | S9 | 112 | 101 | 3 | 0.037 | 27 | 1 |
| | | S10 | 110 | 115 | 3 | 0.010 | 27 | 1 |

* Net discharge of fresh water is take into accounted here.

Parámetros del modelo: Es necesario especificar los parámetros del modelo: viscosidad eddy, irregularidades del lecho, factores resbaladizos así como los factores de dispersión de la temperatura y la salinidad. La tabla 4.9 muestra los valores calibrados de los parámetros para el modelo hidrodinámico.

Tabla 4.9 Parámetros Calibrados del Modelo Hidrodinámico

| Parámetros | Valor | Parámetros | Valor |
|--|-------|---|-------|
| Viscosidad Eddy (m ² /s) | 3.0 | Constantes de la Ley de Dalton | 0.5 |
| Asperezas del lecho (m) | 0.05 | Coficiente del viento en la Ley de Dalton | 0.9 |
| Factores del deslizamiento de la superficie del agua | 1.0 | Humedad relativa (%) | 79 |
| Factores de deslizamiento del fondo marino | 1.0 | Coficiente de transparencia (%) | 0.7 |
| Factores de deslizamiento de las paredes | 1.0 | Beta en la Ley de Beer | 0.3 |
| Factores de dispersion de la temperatura | 0.1 | Coficiente de extinción de la luz | 1.5 |
| Factores de dispersion de la salinidad | 0.1 | | |

Condiciones de calculo numéricas: Teniendo en cuenta la estabilidad del calculo numérico, la precisión de los resultados y el tiempo utilizado en el calculo, el factor tiempo es establecido en 120 segundos. Los periodos de simulación durante la temporada de lluvias y sequía, son de dos meses respectivamente.

Las condiciones descritas anteriormente son resumidas en la tabla 4.10

Table 4.10 Resumen de las Condiciones de Calculo

| Clasificación | Aspectos | Valores especificados |
|-----------------------|---|---|
| Batimetría | Objetivo del area | Bahia de la Habana |
| | División de la reja (X x Y) | 130 x 130 |
| | Tamaño de la reja (X x Y) | 30 m |
| | Nivel(capas) en dirección vertical | 3 |
| | Altura de la capa | Primera capa (capa superficie) :4.0 m segunda capa: 4.0 m tercera capa: profundidad restante |
| Fronteras | Ubicación de las fronteras (X1 to X2):(Y1 to Y2): (Z1 to Z2) | (0,0):(72,91):(0,3) |
| | Altura de la marea | Pronosticada |
| | Salinidad | Información de Observación |
| | Temperatura del agua | Información de Observación |
| | Temperatura del aire | Información de Observación |
| | Precipitaciones | Información de Observación |
| | Velocidad y dirección del viento | Información de Observación |
| Condiciones iniciales | Nivel del agua | 0.16 m (Temporada Lluvia); 0.20 m (Temporada Seca) |
| | Salinidad | 33.3 psu (Temporada Lluvia); 33.1 psu (Temporada Seca) |
| | Temperatura del agua | 28.5°C(Temporada Lluvia); 26.8°C (Temporada Seca) |
| Otros | Periodo de simulación | 2 meses (Temporada Lluvia y Temporada Seca respectivamente) |
| | Paso del tiempo | 120 segundos |

(3) Calibración y Verificación del Modelo Hidrodinámico

Información utilizada en la calibración y la verificación: Serán utilizados dos tipos de información en la calibración y la verificación del modelo HD. Uno de ellos es la información existente antes de este estudio y la otra son los resultados de las investigaciones de este estudio.

Debido a que no se dispone de información actualizada sobre las corrientes la observación en años recientes, los resultados de las investigaciones realizadas por el PNUD-PNUMA-UNESCO en 1985, son utilizados en la calibración de las corrientes (4). La velocidad y la dirección de las corrientes de la Bahía de La Habana durante la marea baja son ilustradas en la Figura 4.6.

La temperatura y la salinidad son medidas por el CIMAB, en sus investigaciones regulares sobre la calidad del agua de la Bahía de La Habana (3). Sin embargo, la investigación se lleva a cabo sólo una vez durante la temporada de lluvias y de sequía respectivamente, es difícil llegar a tener una idea de las características de la entre la variación espacial y temporal de la temperatura y la salinidad. Por lo tanto, parte de los resultados informados por PNUD-PNUMA-UNESCO han sido utilizados aquí como información auxiliar de verificación (5). De la tabla 4.11 a la 4.14, se resume la información disponible sobre la temperatura y la salinidad.

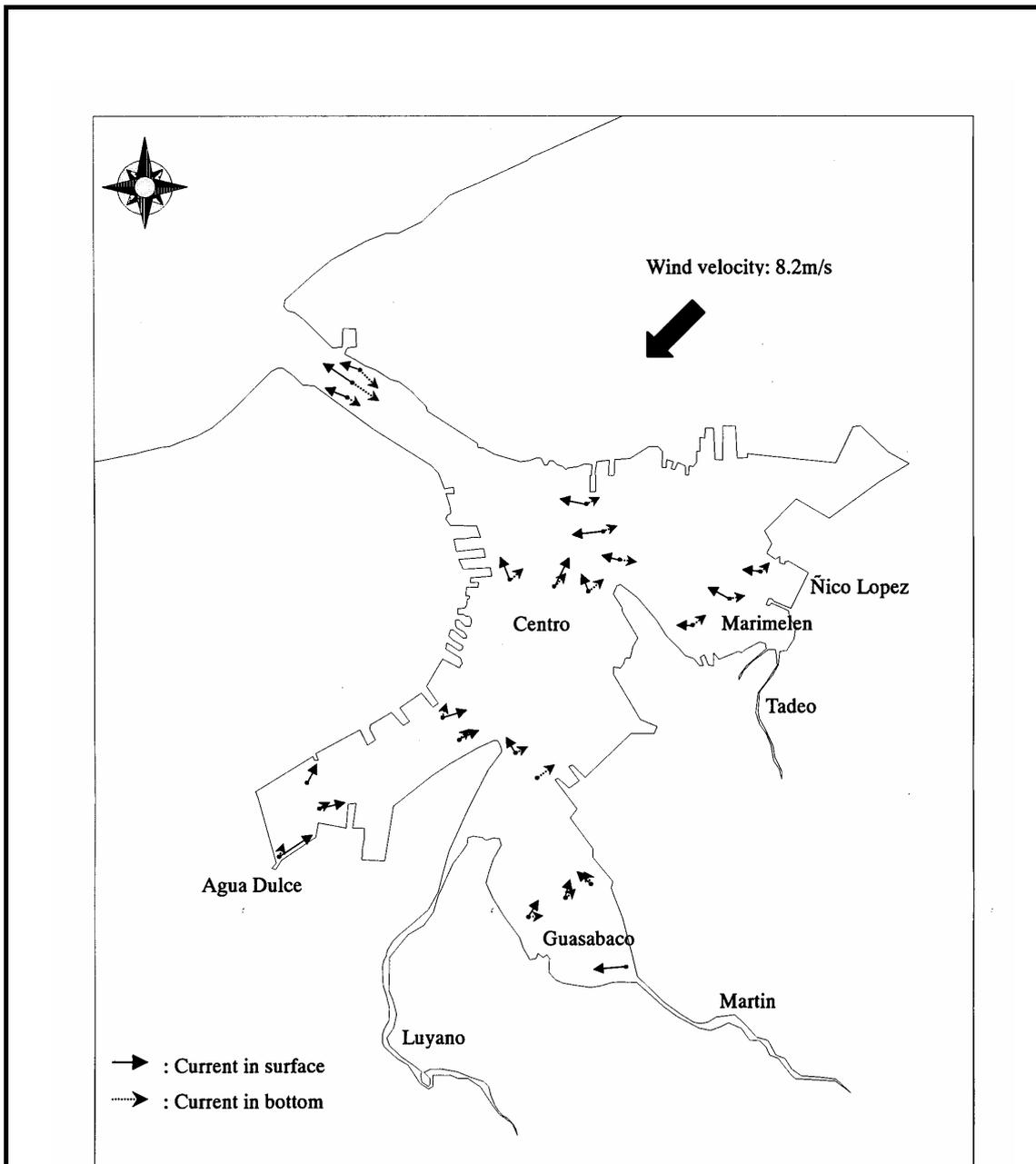


Figure 4.3.6 Observation results of currents in Havana bay

Source: Ref 4 - PNUD-PNUMA-UNESCO,1985

| | |
|--|---|
| <p>ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA</p> | <p>Figura 4.6 Resultados de las Observaciones sobre las Corrientes en la Bahía de La Habana</p> |
| <p>AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN</p> | |

Tabla 4.11 Resultados de las Observaciones sobre Temperatura y Salinidad

| Locations | Positions | 2001/6 | | High tide(2001/11) | | Low tide(2001/11) | |
|----------------------|-----------|--------------|--------------|--------------------|--------------|-------------------|--------------|
| | | Temp. () | Sali. (‰) | Temp. () | Sali. (‰) | Temp. () | Sali. (‰) |
| Canal de Entrada | surface | 28.3 | 33.37 | 27.0 | 35.46 | 26.2 | 34.53 |
| | middle | 28.2 | 35.33 | 26.8 | 36.27 | 27.0 | 36.41 |
| | bottom | 28.6 | 36.41 | 26.4 | 36.25 | 27.0 | 36.29 |
| Atares | surface | 28.3 | 29.93 | 27.0 | 27.11 | 26.4 | 21.37 |
| | middle | 28.6 | 35.86 | 27.0 | 36.09 | 26.8 | 36.33 |
| | bottom | 28.1 | 36.21 | 27.0 | 36.19 | 27.0 | 35.16 |
| Guasabacoa | surface | 28.1 | 34.12 | 27.2 | 36.03 | 27.0 | 35.57 |
| | middle | 28.6 | 36.00 | 27.0 | 36.19 | 26.8 | 35.52 |
| | bottom | 28.7 | 36.13 | 27.0 | 36.33 | 26.6 | 35.87 |
| Marimelena | surface | 28.3 | 35.15 | 27.0 | 36.15 | 26.8 | 35.77 |
| | middle | 28.4 | 35.55 | 27.0 | 36.22 | 27.0 | 36.00 |
| | bottom | 28.8 | 35.46 | 27.0 | 36.11 | 27.0 | 36.26 |
| Centro de la Bahía | surface | 28.7 | 33.57 | 27.0 | 35.02 | 26.8 | 34.87 |
| | middle | 28.9 | 33.99 | 26.8 | 36.00 | 27.0 | 35.97 |
| | bottom | 28.6 | 36.13 | 26.8 | 35.92 | 26.8 | 36.32 |
| P. del Chivo | surface | 28.3 | 35.56 | - | - | 27.0 | 35.46 |
| | middle | 28.4 | 33.09 | - | - | 26.8 | 36.35 |
| | bottom | 28.5 | 36.74 | - | - | 26.8 | 36.41 |
| Caleta de San Lázaro | surface | 28.3 | 36.00 | - | - | 27.0 | 36.10 |
| | middle | 28.6 | 36.41 | - | - | 27.0 | 36.33 |
| | bottom | 28.8 | 36.36 | - | - | 27.0 | 36.43 |

Tabla 4.12 Niveles de Temperatura y Salinidad para la Bahía de La Habana

| Posicion | Temperatura() | | | Salinidad(‰) | | |
|------------|----------------|-------------|-----------|--------------|-------------|-----------|
| | Maxima | Minima | Promedio* | Máximo | Minimo | Promedio* |
| Superficie | 32.2 (Sep.) | 24.6 (Ene.) | 28.2 | 34.3 (Dic.) | 27.4 (Ene.) | 32.4 |
| Fondo | 28.8 (Sep) | 24.3 (Feb.) | 26.5 | 36.4 (Abr.) | 34.4 (Sep.) | 35.7 |

*Nota: promedio anual.

Fuente de información: Informes UNESCO

Tabla 4.13 Distribución de la Temperatura en Dirección Vertical

| Zona de Profundidad del Agua | Atares | Guasabacoa | Marimelena | Centro | Canal | Litoral |
|------------------------------|--------|------------|------------|--------|-------|---------|
| 0-5 | 3.1 | 3.3 | 2.9 | 2.5 | 2.1 | 0.6 |
| 5-fondo | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 0.2 |
| 0-fondo | 3.7 | 3.8 | 3.7 | 3.3 | 2.7 | 0.8 |

Fuente de información: Informes UNESCO

Tabla 4.14 Distribución de la Salinidad en Dirección Vertical

| Zona de Profundidad del zAgua | Atares | Guasabacoa | Marimelena | Centro | Canal | Litoral |
|-------------------------------|--------|------------|------------|--------|-------|---------|
| 0-5 | 12.9 | 13.3 | 3.3 | 4.9 | 3.8 | 0.9 |
| 5-fondo | 1.1 | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 0.7 | 0.1 |
| 0-fondo | 14.0 | 14.2 | 4.1 | 5.8 | 4.5 | 1.0 |

Fuente de Información : Informes UNESCO

Calibración del modelo HD: La simulación hidrodinámica de la Bahía de La Habana es llevada a cabo con los insumos disponibles y los parámetros de calibración presentados en la tabla 4.9. Los resultados de la simulación de las corrientes aparecen ilustrados en los figuras 4.7 y 4.8. De acuerdo al comportamiento reproductivo de las corrientes, la efectividad del modelo hidrodinámico es evaluado como sigue.

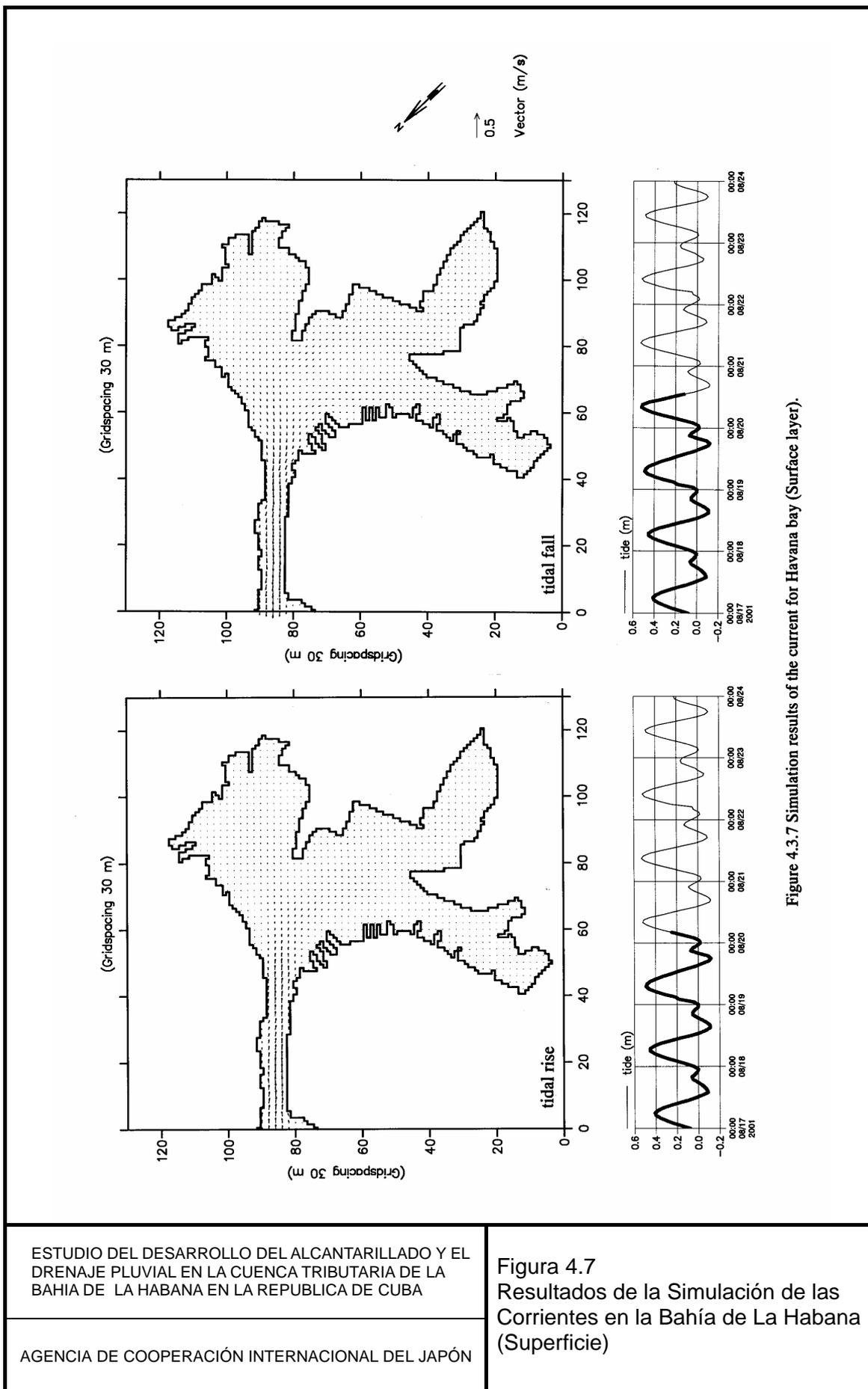
- Con una comparación de las corrientes calculadas, con los resultados observados (figura 4.6) se puede apreciar que el modelo calibrado brinda un buen resultado para reproducir la velocidad y dirección de las corrientes, ambas en la entrada y dentro de la bahía.
- La dirección de las corrientes varía periódicamente junto con la variación de la altura de la marea en la bahía. Ambos cálculos y resultados de observación muestran que la dirección de las corrientes es hacia la bahía durante la marea alta y un flujo reverso ocurre durante la marea baja.
- En el Canal de Entrada y Centro de la Bahía, la velocidad y dirección de la corriente de superficie son aproximadamente las mismas, según la observación. Durante el periodo de la marea alta y baja, ocurren corrientes de aproximadamente 0.05 a 0.15 m/s con una dirección de SE y NW, respectivamente. Las corrientes en la capa media (segunda capa) es reversa a la superficie y la velocidad es ligeramente menor comparadas con la superficie.
- Sobre la velocidad de la corriente cercana al estuario del río de Luyano, existen varias discrepancias entre los resultados de calculo y las observaciones. Una de las principales razones de dicha discrepancia podría ser atribuida a la velocidad específica del influjo del río. La velocidad de influjo de los ríos será analizada en este estudio y el comportamiento reproductivo para estas áreas será mejorada con la aplicación de los resultados de este análisis.

La temperatura y salinidad de las aguas en la Bahía dependen de muchos factores, tales como el agua dulce vertida de las fuentes, temperatura del aire, las precipitaciones, temperatura/salinidad de las fronteras (mar abierto), etc. Se considera que la temperatura y la salinidad varían junto con el paso del tiempo. Debido a que la información detallada sobre temperatura y la salinidad esta solo disponible durante el mes de junio, en la temporada de lluvia, mostrado en la tabla 4.11, mientras que el resultado de la simulación es para agosto y septiembre. Por otra parte, en los datos de observación mostrados desde las tablas 4.12 hasta la 4.14, es posible ver a grosso modo las características de la variación espacial y temporal de la temperatura y salinidad. Por lo tanto, la capacidad de reproducción del modelo, para la temperatura y salinidad es indirectamente evaluada basándose en la comparación del resultado de los resultados de la simulación, tanto con la información detallada (tabla 4.11) y resultados resumidos (tabla 4.12 – 4.14).

Los resultados de los cálculos sobre la temperatura y salinidad durante la marea alta y baja aparecen ilustrados en las Figuras 4.9 hasta la 4.12. Las tendencias reproductivas en tiempo y gradientes de espacio para la temperatura y salinidad son mostrados como sigue:

- La tendencia de la temperatura y variación de salinidad en direcciones horizontales y verticales esta aproximadamente de acuerdo con la información proveniente de las observaciones.
- Los resultados de los depósitos de superficie (figura 4.9), áreas de aguas bajas como Marimelena (el este de la bahía) y Guasabacoa (el sur de la bahía) muestran temperaturas más altas que en otras. Por el contrario, el área cercana a los límites y el centro de la bahía muestran una temperatura menor. En el área de aguas bajas, la temperatura es más fácilmente influenciada por el intercambio de calor con la atmósfera, y la temperatura del agua es sensible a las variaciones de la temperatura del aire. Otra razón por las altas temperaturas de estas áreas podría ser atribuida a que se encuentran más lejos de los límites, donde las temperaturas son más bajas.

- La temperatura del agua durante la marea alta muestra un valor inferior que durante la marea baja, debido a un influjo desde los límites durante la marea alta. En la capa de la superficie la temperatura, en la mayoría del área de la bahía, aumenta de 29.5° a 30°, a medida que la marea varía de alta a baja.
- La temperatura del agua desciende en dependencia de su profundidad. Las diferencias de temperaturas entre la capa superficial y la segunda capa es de casi 2°, lo que es mayor que la diferencia de temperatura en dirección horizontal.
- Los gradientes de salinidad, tanto en dirección horizontal como vertical, se debe al influjo de agua dulce proveniente de ríos y de canales de drenaje. El área cercana a la entrada de la bahía muestra una mayor concentración de salinidad si se compara con los estuarios del río Luyano, el río Martín Pérez y los canales de drenaje.
- La salinidad varía periódicamente de acuerdo a las mareas. Las diferencias de salinidad en la segunda capa son insignificantes. Lo que significa que la segunda capa es menos influenciada por los vertimientos de agua dulce provenientes de otras fuentes.



ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.7
 Resultados de la Simulación de las Corrientes en la Bahía de La Habana (Superficie)

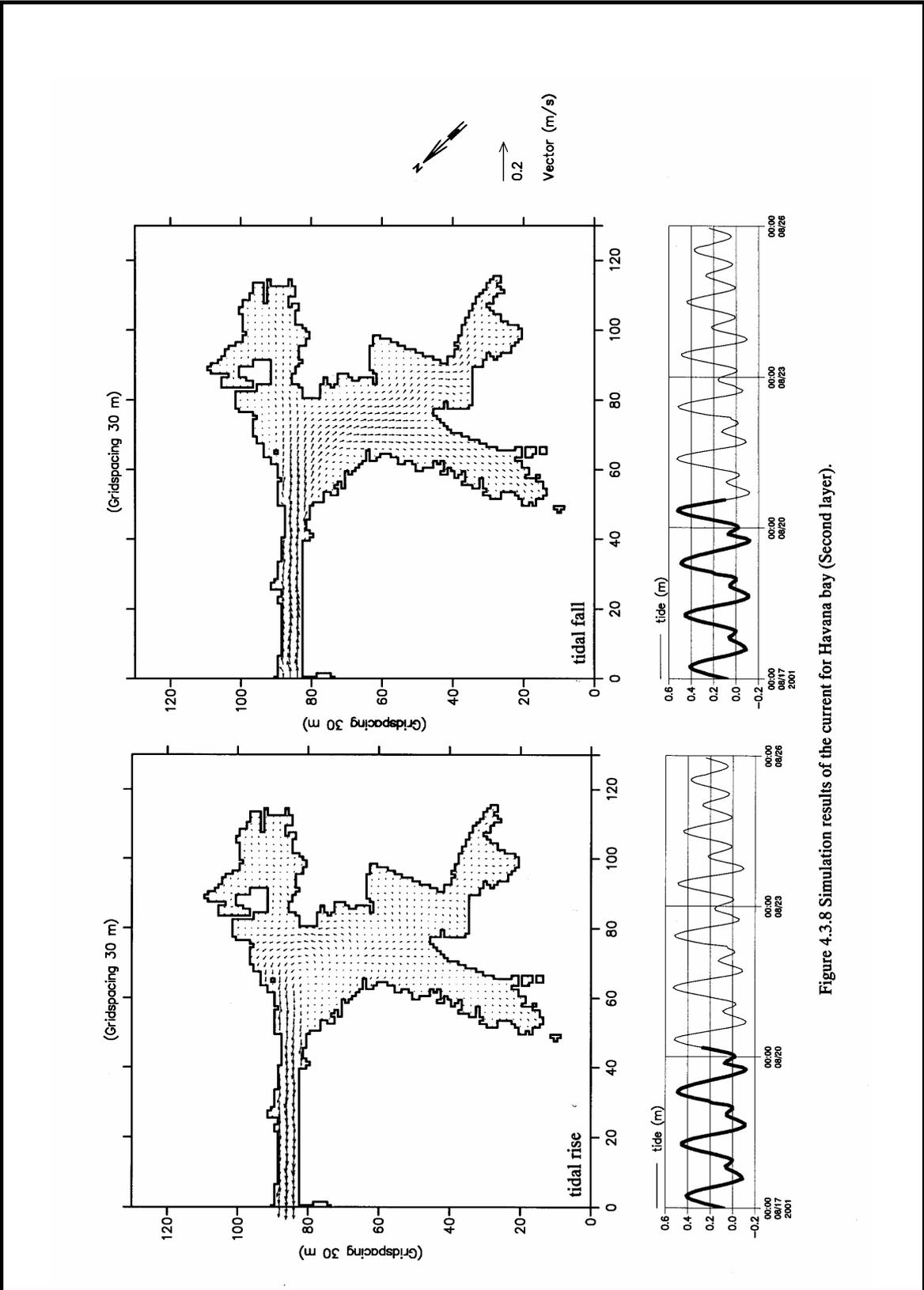
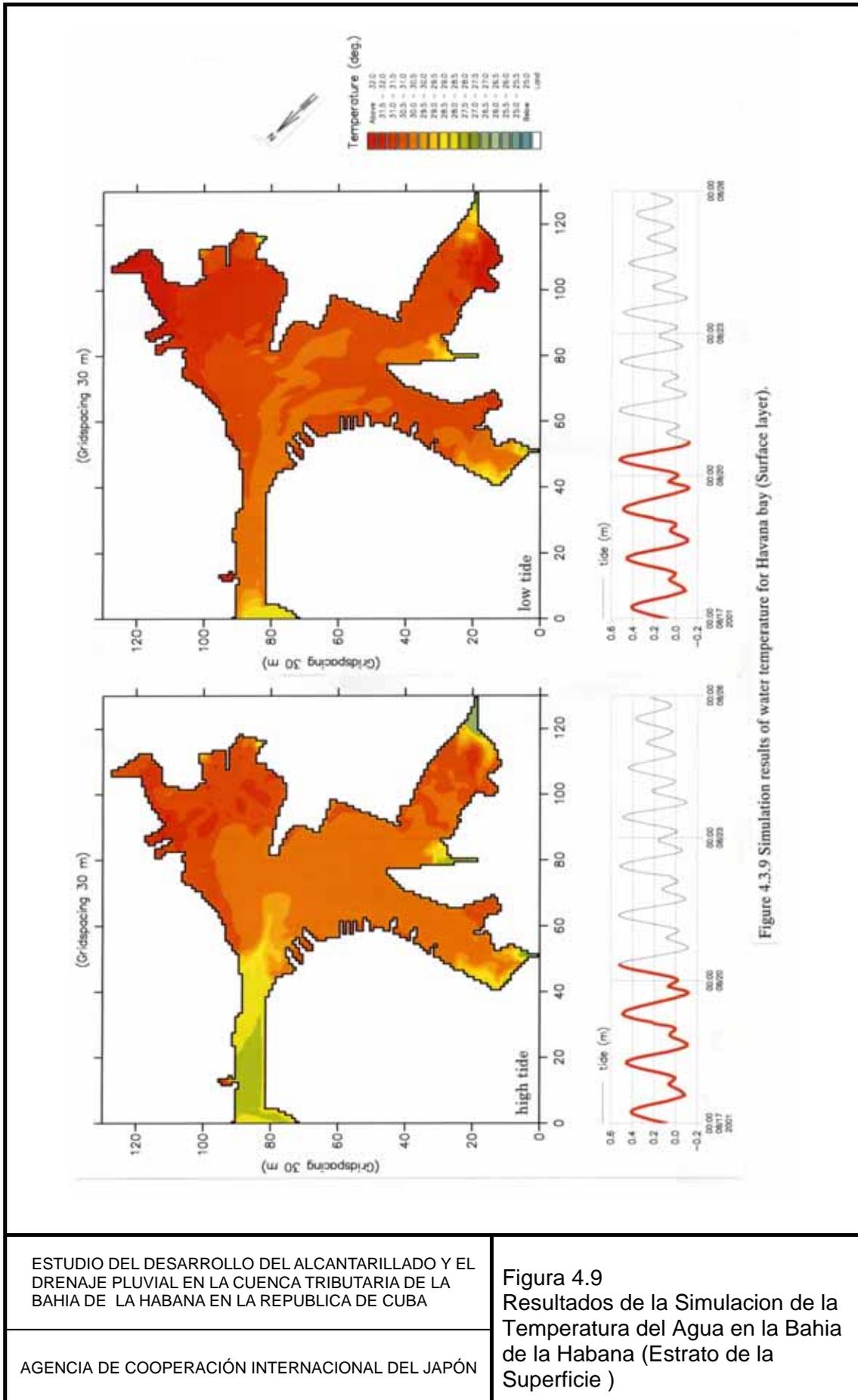


Figure 4.3.8 Simulation results of the current for Havana bay (Second layer).

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.8
Resultados de la Simulación de las Corrientes en la Bahía de La Habana (Segundo Estrato)



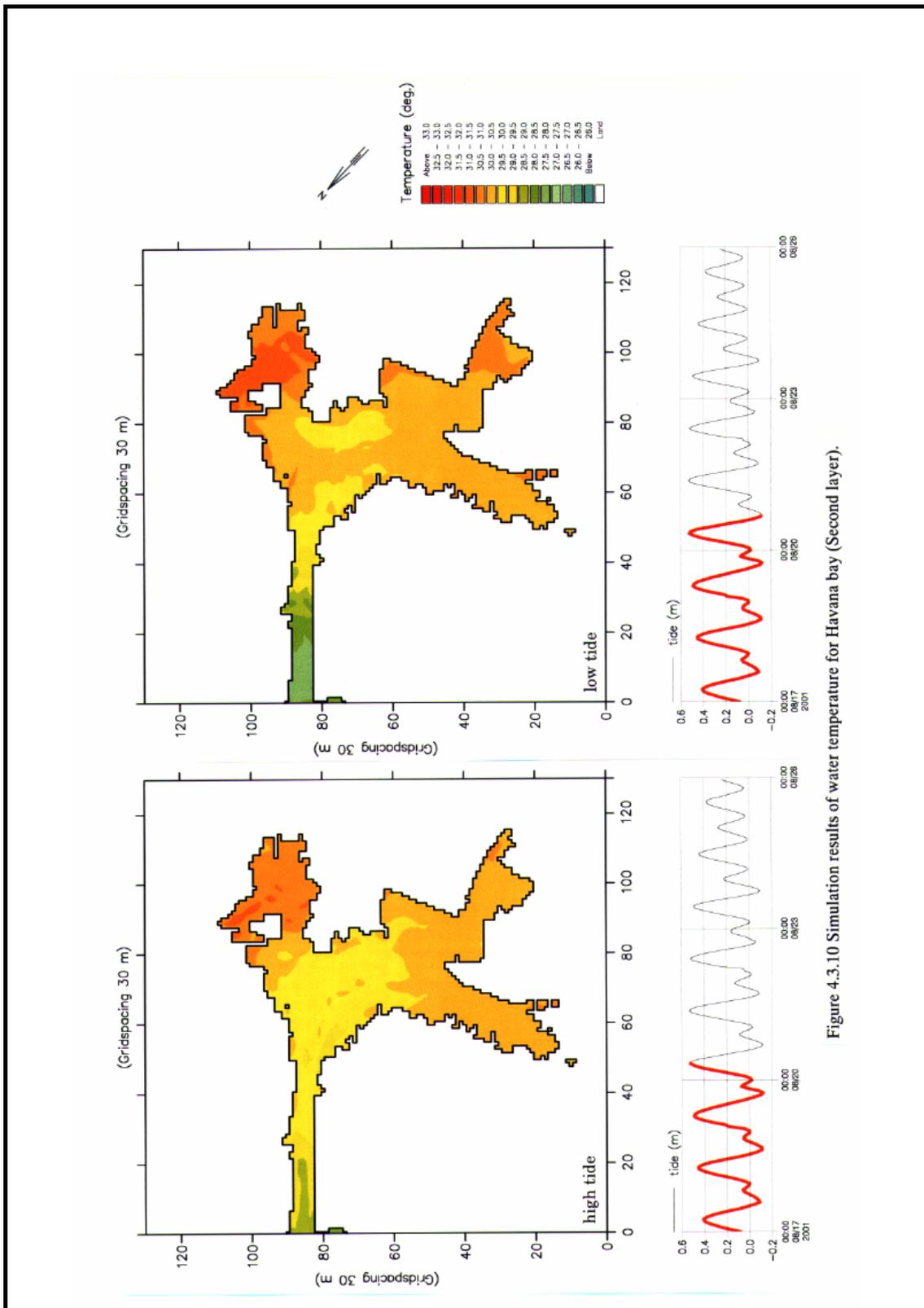
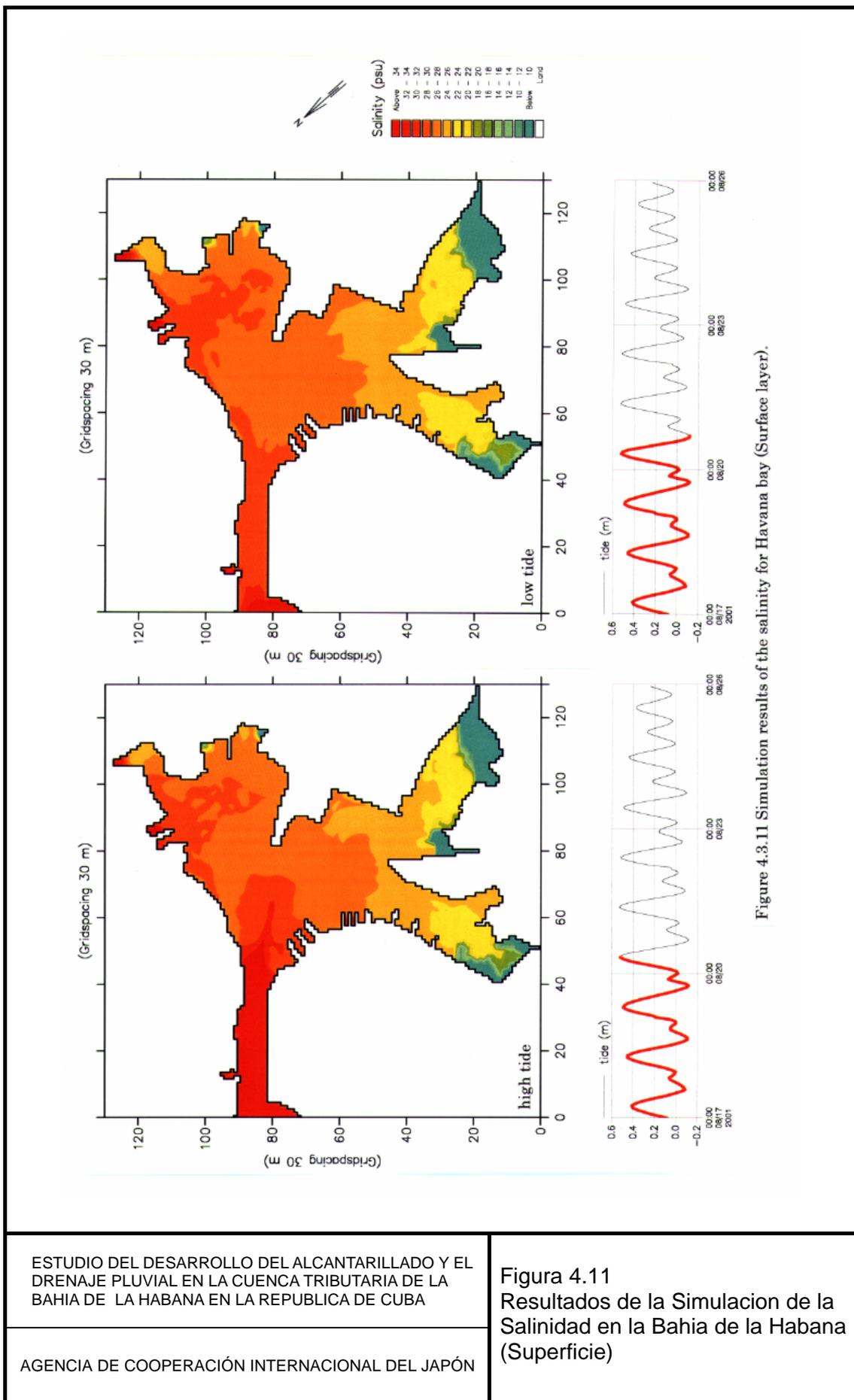


Figure 4.3.10 Simulation results of water temperature for Havana bay (Second layer).

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

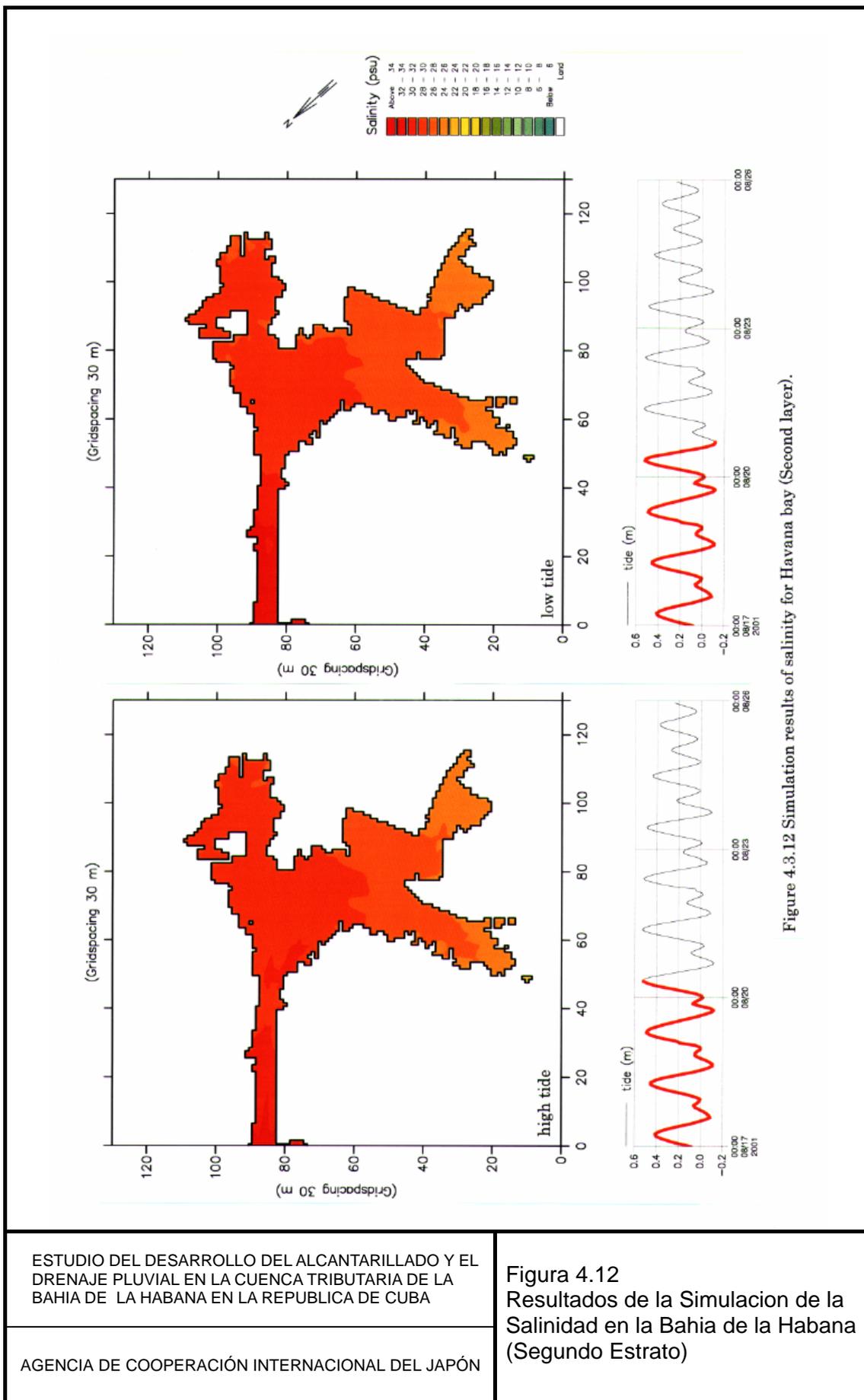
Figura 4.10 Resultados de la Simulación de la Temperatura del Agua en la Bahía de la Habana (Segundo Estrato)



ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.11 Resultados de la Simulación de la Salinidad en la Bahía de la Habana (Superficie)



ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.12
Resultados de la Simulación de la Salinidad en la Bahía de la Habana (Segundo Estrato)

4.3.3 SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA BAHÍA DE LA HABANA

(1) Característica de la Contaminación del Agua en la Bahía de La Habana

En la investigación del medio marino realizado por el CIMAB, la calidad del agua de la Bahía de La Habana fue reportada. Figura 3.2 muestra las locaciones de monitoreo del CIMAB. Playa del Chivo y Caleta de San Lázaro están ubicadas fuera de la bahía. Basado en los resultados de las observaciones del 2001, la variación de la calidad del agua en la Bahía de La Habana aparece ilustrada en las Figuras 4.13 – 4.15. Están disponibles las informaciones sobre la calidad del agua para los dos eventos de muestreos de agua, durante la marea alta (28 de noviembre del 2001) y la marea baja (30 de noviembre del 2001). De acuerdo a estos resultados sobre la calidad del agua, así como otras informaciones reportadas, las características de la contaminación del agua en la Bahía de La Habana, pueden ser concluidas de la manera siguiente:

- Las concentraciones de DO son significativamente diferentes para las cinco ubicaciones de muestreo. Generalmente, las áreas de aguas adyacentes a los estuarios dentro de la bahía y las fuentes de influjos, muestran una baja concentración de DO. En las locaciones de Atares y Marimelena, en particular, donde el drenaje de alcantarillado y de las aguas residuales de las industrias son vertidas, el agotamiento del DO es sorprendente. Durante la estación de las lluvias, el DO cae muchísimo y el nivel de DO en las dos locaciones es tan bajo como 2.0 mg/L. La condición del bajo DO, particularmente en el lecho marino, traería como consecuencia un exceso de la liberación de nutrientes de los sedimentos, así como la sofocación de los recursos naturales. Estos nutrientes promoverían el crecimiento de fitoplancton y causaría la eutrofización de la masa de agua.
- Las concentraciones de fósforo en la bahía varían durante las estaciones y espacialmente. Tanto para el fosfato y el fósforo total, la temporada de sequía muestra una más alta concentración que durante la temporada de las lluvias. En las áreas de Atares, Marimelena y Guasabacoa, se observan altas concentraciones de fósforo. Se puede concluir debido a la concentración del gradiente, que la principal fuente externa de fósforo proviene del vertimiento de los ríos y canales de drenaje.
- Fueron observadas altas concentraciones de amoníaco en partes interiores de la bahía, tales como Atares, Marimelena y Guasabacoa. Particularmente, en el área de Atares, la concentración de $\text{NH}_4\text{-N}$, tanto en la superficie como en la segunda capa, es tan alta como 0.5 mg/L. Las concentraciones de $\text{NO}_2\text{-N}$ y $\text{NO}_3\text{-N}$ y sus variaciones entre las locaciones son comparativamente pequeñas. Por lo tanto, se puede llegar a la conclusión que la distribución de amoníaco depende más del influjo de la carga contaminante de la fuente y la liberación del sedimento, mientras que el nitrito y el nitrato son más relativos debido a el proceso de nitrificación que ocurre dentro de la bahía.
- Se observan altas concentraciones de SS en Atares y Guasabacoa, comparado con otras áreas. Esto es similar a otros parámetros y se puede atribuir al influjo del agua suspendida a través de los ríos y canales de drenaje.
- Aunque el fitoplancton y la clorofila, como dos importantes parámetros para evaluar el nivel de eutrofización, fueron medidos, la inconsistencia en los resultados de los dos parámetros hacen difícil resumir el carácter de la producción primaria en la bahía. Como tendencia general, el Canal de entrada y Centro de la Bahía muestran una mayor concentración de clorofila. La concentración de fitoplancton en el Canal de Entrada y Atares, es relativamente alta. En comparación con el nivel del nutriente (nitrógeno y fosfato inorgánico), se puede afirmar que la concentración de clorofila en la bahía es relativamente baja.

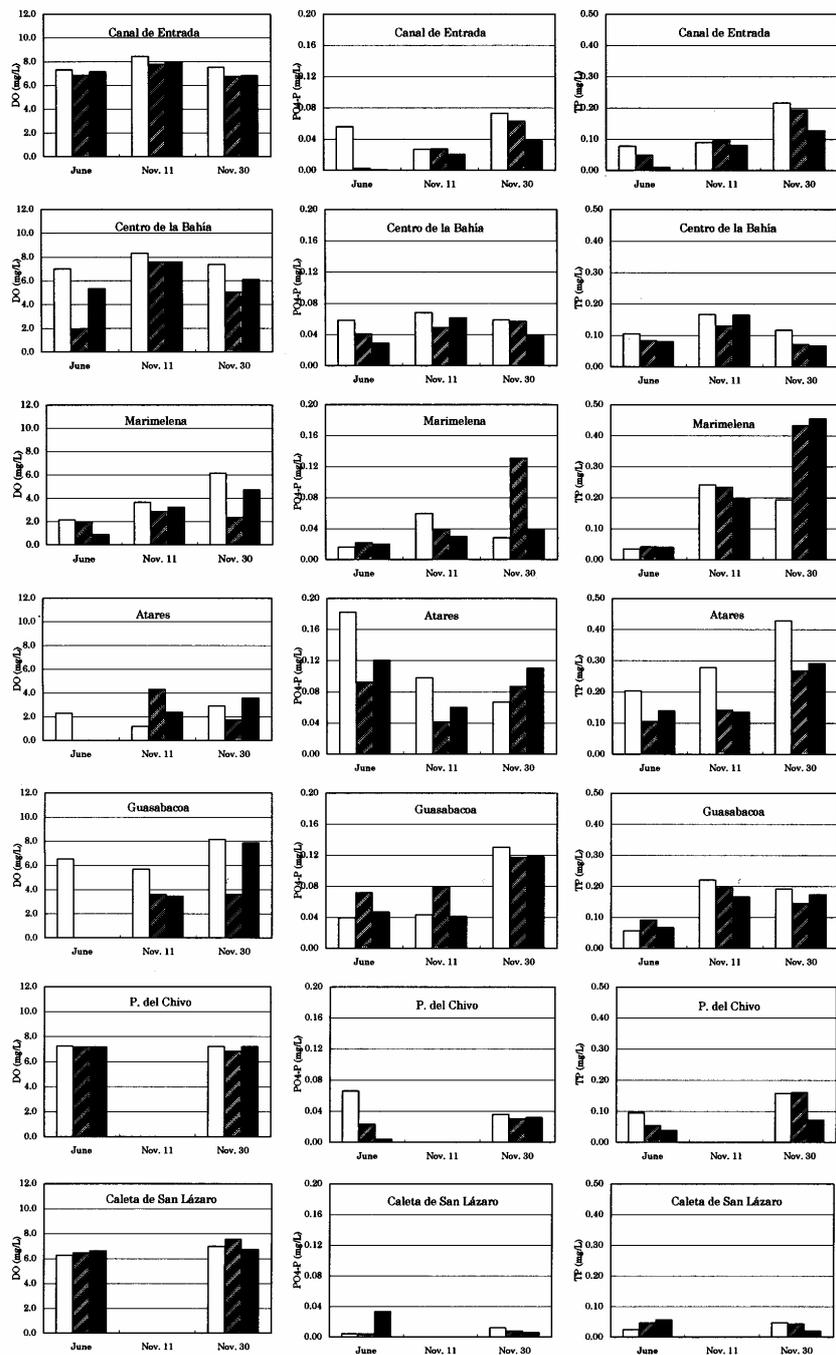


Figure4.3.14(a) Water quality observation results of Havana bay (□ surface, ■ middle, ▨ bottom)

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.13
Resultados de la Observación de la Calidad del Agua de la Bahía de La Habana (A)

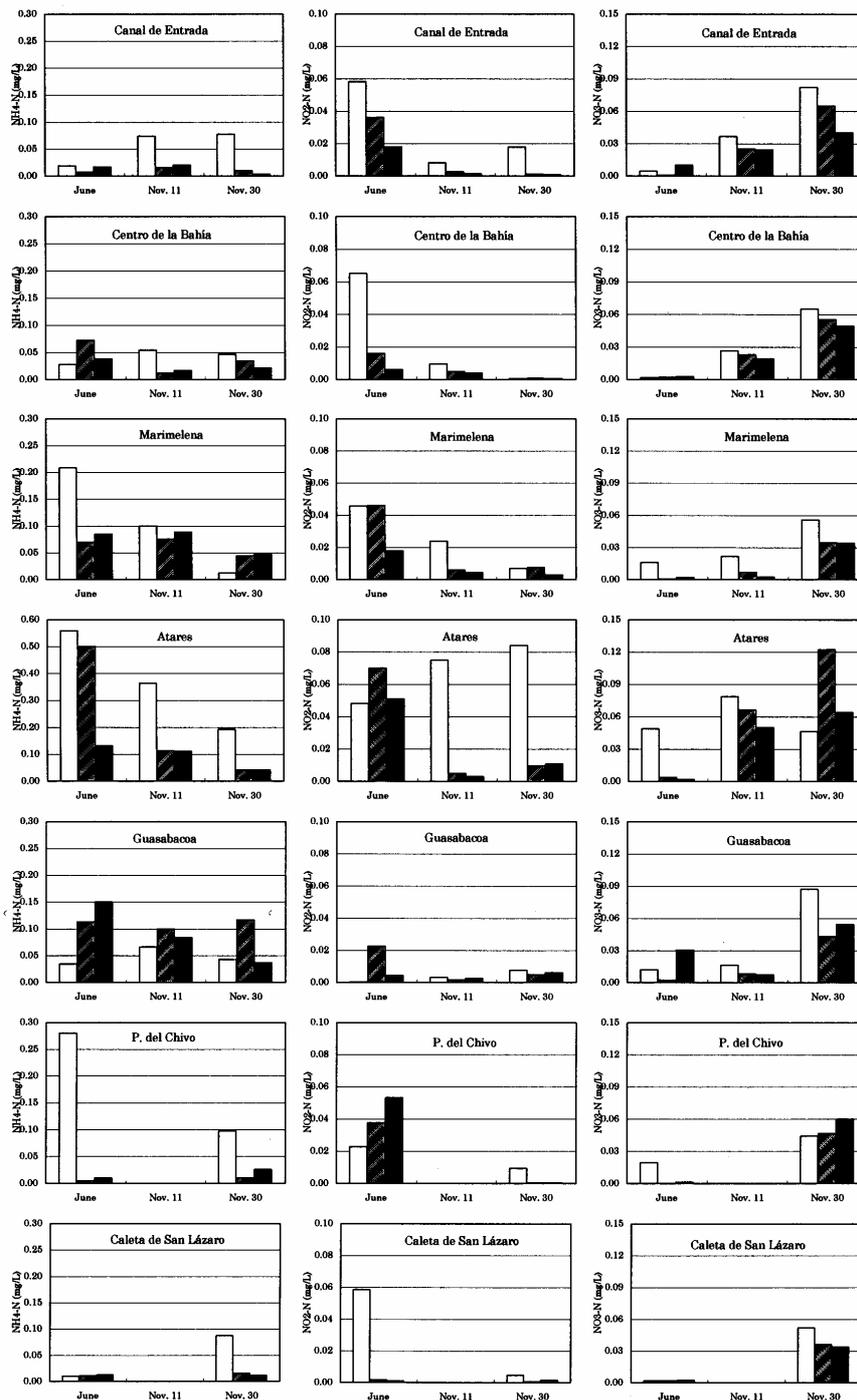


Figure4.3.14(b) Water quality observation results of the Havana bay (□ surface, ■ middle, ■ bottom)

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.14 Resultados de la Observación de la Calidad del Agua de la Bahía de La Habana (B)

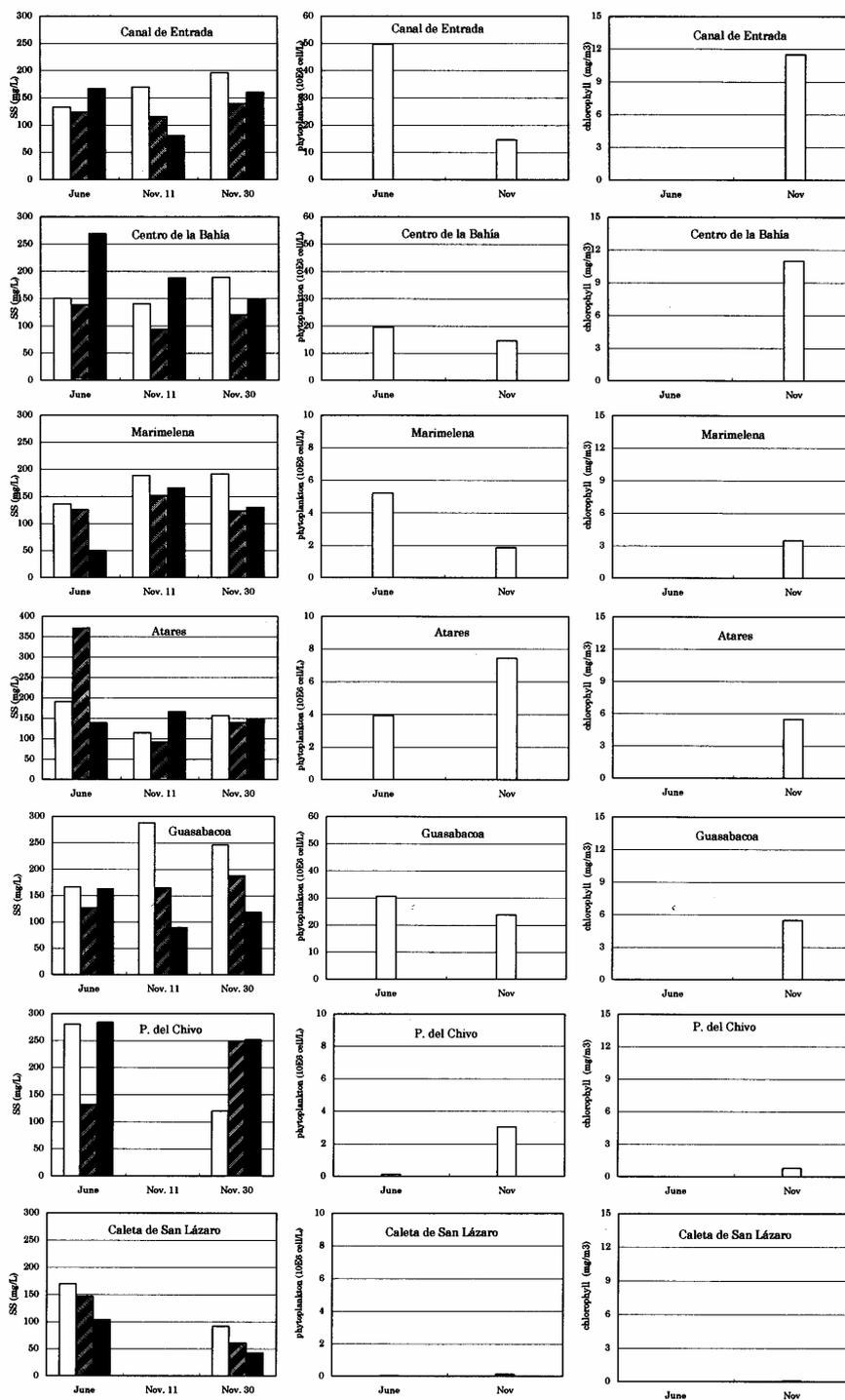


Figure 4.3.14(c) Water quality observation results of the Havana bay (□ surface, ■ middle, ▨ bottom)

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.15
Resultados de la Observación de la Calidad del Agua de la Bahía de La Habana (C)

(2) Montaje del Modelo

Basado en las características de la contaminación del agua analizada más arriba, es necesario montar un modelo, en el cual los siguientes sub-modelos de transportación y transformación son compuestos.

- Advección y dispersión de los contaminantes
- Degradación biológica y reacción química de los procesos.
- Eutrofización

En estos sub-modelos, los siguientes procesos de transformación son incorporados:

- La degradación de materias orgánicas expulsadas como estado disuelto y suspendido
- Sedimentación de las materias orgánicas suspendidas y la resuspensión de los sedimentos
- Intercambio de oxígeno entre la atmósfera y el agua de mar
- Demanda de oxígeno en la degradación de las materias orgánicas suspendidas y disueltas
- Producción de oxígeno en la respiración de fotosíntesis y fotosintética
- Amonificación y nitrificación, así como el proceso de desnitrificación
- Liberación de nitrógeno y fósforo en la degradación de las materias orgánicas
- Recepción de nitrógeno y fósforo por parte de las bacterias y plantas
- Liberación de nitrógeno y fósforo inorgánico de los sedimentos

A modo de simular y calibrar estos procesos, son seleccionados nueve aspectos de la calidad del agua como las variables del estado en el modelo, las que son disueltas BOD (BODd), suspendidas BOD (BODs), BOD en los sedimentos (BODb), DO, amoníaco ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitrito ($\text{NO}_2\text{-N}$), nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$), fosfato ($\text{PO}_4\text{-P}$) y clorofila. Los principios del Modelo WQ aplicados en este estudio son ilustrados en la figura 4.16.

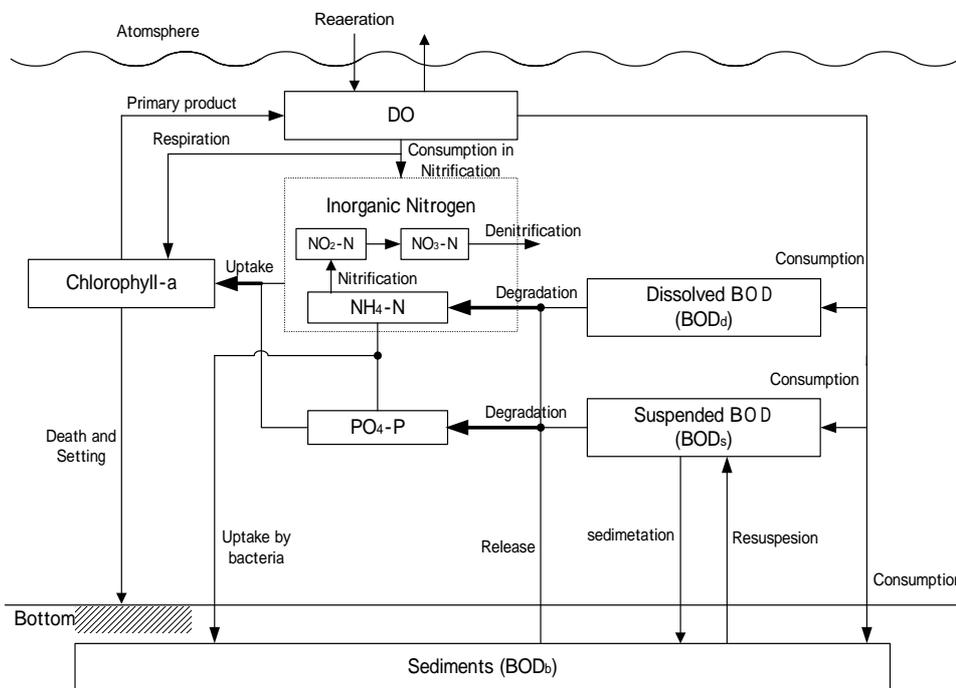


Figure 4.3.15 Principles of the WQ model applied in this study.

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.16
Proceso Esquemático Incluido en el Modelo WQ Aplicado en este Estudio

(3) Condiciones de Calculo para la Simulación de la Calidad del Agua

La simulación de la calidad del agua es llevada a cabo simultáneamente con la simulación hidrodinámica. Excepto para los aspectos descritos a continuación, las condiciones de calculo son básicamente las mismas que para la simulación hidrodinámica.

Carga de las condiciones de las fuentes: Diez fuentes seleccionadas, incluyendo tres ríos y tres canales de drenaje, así como una industria vertiendo en cuatro locaciones, son tomadas en cuenta en la simulación de la calidad del agua. La calidad del agua de la fuente, esta especificada, basándose en la tasa de carga para BOD5, total de fósforo y nitrógeno, que son calculados basados en las recientes informaciones de monitoreo del CIMAB. La tabla 4.15 muestra los resultados especificados para la calidad del agua de las fuentes.

Tabla 4.15 Especificación de Fuentes de Contaminantes para la Simulación de la Calidad del Agua

| Nombre de la fuente | Fuente No. | Tasa de flujo, m ³ /s | BOD ₅ , mg/L | DO, mg/L | NH ₄ -N, mg/L | NO ₂ -N, mg/L | NO ₃ -N, mg/L | PO ₄ -P, mg/L |
|----------------------|------------|----------------------------------|-------------------------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Rio Luyano | S1 | 1.329 | 83 | 3.0 | 2.1 | 0 | 1.0 | 0.17 |
| Rio Martin Perez | S2 | 0.719 | 20 | 1.6 | 2.0 | 0 | 1.5 | 0.59 |
| Arroyo Tadeo | S3 | 0.093 | 192 | 2.0 | 2.2 | 0 | 0.6 | 3.20 |
| Dren San Nicolas | S4 | 0.099 | 151 | 1.0 | 7.4 | 0 | 1.9 | 0.29 |
| Dren Arroyo Matadero | S5 | 0.900 | 115 | 1.0 | 1.7 | 0 | 0.4 | 3.10 |
| Dren Agua Dulce | S6 | 0.500 | 156 | 1.0 | 2.2 | 0 | 0.5 | 6.30 |
| Ñico López | S7 | 0.010 | 1,810 | 0 | 50 | 0 | 0 | 10 |
| | S8 | 0.037 | | | | | | |
| | S9 | 0.037 | | | | | | |
| | S10 | 0.010 | | | | | | |

Fuente : Basado en la información de monitoreo de CIMAB

Carga de nutrientes de los sedimentos: No existen informaciones experimentales disponibles sobre la liberación de los nutrientes de los sedimentos de la Bahía de La Habana. Las tasas de liberación de nitrógeno y fósforo inorgánico son estimados indirectamente basándose en la relación del contenido orgánico de los sedimentos con la tasa de liberación de nutrientes. Las tasas siguientes son utilizadas:

Tasa de liberación de nitrógeno inorgánico=94.0 mg/m²/d

Tasa de liberación de fosfato 6.6 mg/m²/d

Fronteras y condiciones iniciales: Los fronteras y las condiciones iniciales están especificados basado en los resultados de las mediciones de la calidad del agua de la Bahía de La Habana mediciones llevados a cabo por CIMAB en el 2001 (tabla 4.16)

Tabla 4.16 Calidad del Agua en los Limites e Iniciación

| | BODd | BODs | DO | NH ₄ -N | NO ₂ -N | NO ₃ -N | PO ₄ -P | (en mg/L) Clo.-a* |
|------------|------|------|----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Frontera | 2 | 2 | 8 | 0.015 | 0.01 | 0.002 | 0.004 | 0.002 |
| Iniciación | 5 | 5 | 5 | 0.15 | 0.05 | 0.02 | 0.05 | 0.005 |

*clo.-a:clorofila

Parámetros del Modelo : Los parámetros del modelo de la calidad del agua son identificados de acuerdo a los resultados de la calibración del modelo. La tabla 4.17 muestra los valores de los parámetros para cada proceso de reacción.

Otros: Al igual que en la simulación hidrodinámica, se dice el paso del tiempo del calculo numérico es de 120 segundos y los períodos de simulación es de dos meses, ambos para las temporadas de lluvias y de sequía.

Tabla 4.17 Parámetros del Modelo de la Calidad del Agua

| Proceso | parámetro | Unidad | Valor |
|-----------------------|--|-----------------------|--------|
| COD/DO relacionado | Degradación constante para BOD _d | 1/día | 0.05 |
| | Degradación constante para BOD _s | 1/día | 0.02 |
| | Tasa de Sedimentación para BOD _s | 1/día | 0.2 |
| | Tasa de Nitrificación | 1/día | 0.05 |
| | Tasa del producción fotosintético | mgO ₂ /L/d | 3.5 |
| | Coefficiente de extinción de la luz | 1/m | 7.4 |
| Nutriente relacionado | Tasa de absorción de nitrógeno por plancton | gN/gO ₂ | 0.066 |
| | Tasa de absorción de nitrógeno por bacteria | gN/gO ₂ | 0.109 |
| | Concentración de mediasaturación de NH ₄ -N | gN/m ³ | 0.05 |
| | Tasa de Nitrificación (NO ₂) | 1/día | 1.0 |
| | Tasa de desnitrificación | 1/día | 0.1 |
| | Tasa de absorción de fosforo por plancton | gP/gO ₂ | 0.0091 |
| | Tasa de absorción de fosforo por bacteria | gP/gO ₂ | 0.015 |
| | Concentración de mediasaturación de PO ₄ -P | g P/m ³ | 0.005 |
| Clorofila relacionada | Tasa de muerte del fitoplancton | 1/día | 0.01 |
| | Tasa de Sedimentación del fitoplancton | m/día | 0.15 |
| | Nivel de carbón de clorofila y fitoplancton | mg/L | 0.02 |
| | Nivel de carbón a oxígeno en el producción primario | gC/gO ₂ | 0.0133 |
| | Concentración mediasaturación para el nitrógeno inorgánico | mg/L | 0.05 |
| | Concentración mediasaturación para el fosforo | mg/L | 0.01 |

4.3.4 CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO DE LA CALIDAD DEL AGUA

(1) Información utilizada en la Calibración y la Verificación

Los resultados de la observación de la calidad del agua, descritos en la sección 4.3.3 (1) son utilizados como datos de verificación en el modelo de calibración. Seis elementos, incluyendo el DO, amoníaco, nitrito, nitrato, fosfato, fósforo y la clorofila, son utilizados en la calibración del modelo. Ya que no hay información disponible para el periodo de simulación durante agosto y septiembre del 2001, la información sobre las observaciones realizadas en junio del 2001 son utilizan como sustitución para la temporada de lluvia. Para la temporada de sequía, la información tomada a finales de noviembre (28 de nov. 2001 y 30 de nov. 2001) fue utilizada en la verificación.

(2) Comparación de los resultados calculados con la información de la observación

Los resultados de la simulación de la calidad del agua durante la marea alta y baja, son ilustrados en las figuras 4.17 al 4.24. Debido ala gran fluctuación en los datos de la fuente y del período inconstante entre la fuente y la información sobre la calidad del agua en la bahía, la calibración es realizada aquí principalmente sobre la base de los niveles de la calidad del agua en vez de en los valores de concentración exactos. De acuerdo a la comparación de los resultados de la simulación y las observaciones, la actividad reproductiva del modelo de calidad del agua, puede resumirse de la siguiente manera.

- Los niveles de concentración son aproximadamente reproducidos para las cinco puntos de observación de la bahía (figura 4.21). Al igual que los datos observados, las locaciones de Atares y Marimelena muestran menores concentraciones de DO en comparación con otras locaciones. Durante la marea baja, el nivel de Do en la superficie de las dos locaciones muestran caídas por debajo de los 2.0 mg/L y desgaste

en la capa baja de la columna de agua. Esto demuestra la existencia de altos niveles de materia orgánica, así como que alguna sustancia orgánica sería resuspendida por los sedimentos en estas áreas.

- Las distribución de amoníaco en la bahía esta aproximadamente de acuerdo con los resultados de las observaciones (figura 4.20) Las áreas de aguas cercanas a las locaciones de influjo de las fuentes muestran una alta concentración de amoníaco. Si comparamos los resultados de los niveles de DO y amoníaco, tendríamos como resultado que la locación con un menor DO esta en correspondencia con un alto nivel de amoníaco. Se puede estimar que el bajo nivel de DO de las áreas es motivado principalmente por la degradación de la materia orgánica así como por la nitrificación del amoníaco.
- Para el nitrito y el nitrato, aunque los resultados calculados parecen ser un poco más altos que en los datos de información, los niveles de concentración son casi reproducidos (figura 4.21 al 4.22).
- La reproducción de las concentraciones de fosfato para la locación de Atares (figura 4.23) no fue completa. Al hacer una comparación sobre las concentraciones de fosfato en la locación de Atares se puede hallar que los resultados de la simulación arrojaron un alto valor que los observados en la información. De acuerdo al círculo de fósforo, reflejado en la figura 4.16, las concentraciones de fosfato están basadas en los dos procesos opuestos de la generación y la aceptación después de que fuera vertido hacia el agua de mar. Para el proceso de generación, el fosfato es liberado, tanto producto de la reacción de la degradación del BOD como de los sedimentos. Y para el proceso de aceptación, el fosfato es consumido por el crecimiento de plancton y de las bacterias. Basado en la reacción y los parámetros esteoico métricos, de estos procesos, el fracaso fue hallado en el ajuste de los resultados de la simulación y en los datos de la observación. Como una de las posibilidades, la baja concentración de fosfato podría haber contribuido a algún otro proceso de reacción, tal como la adhesión a la suspensión sólida, la sedimentación, etc.
- La actuación reproductiva de la clorofila es diferente para las cinco locaciones. Para la locación de Atares, Guasabacoa y Centro de la Bahía, el nivel de clorofila previsto esta generalmente de acuerdo con los resultados de las mediciones. Sin embargo, para la locación del Canal de Entrada y Marimelena, varias discrepancias fueron detectadas entre los cálculos y las observaciones. Comparando los niveles de nutrientes y concentración de clorofila en las cinco locaciones, se apreciaría que las concentraciones de clorofila no concuerdan con los niveles de nutrientes. Por lo tanto, existe la posibilidad que el coeficiente de extinción de la luz fueran diferentes entre las locaciones y que las locaciones, como el Canal de Entrada, muestra un bajo coeficiente de extinción que las otras locaciones.

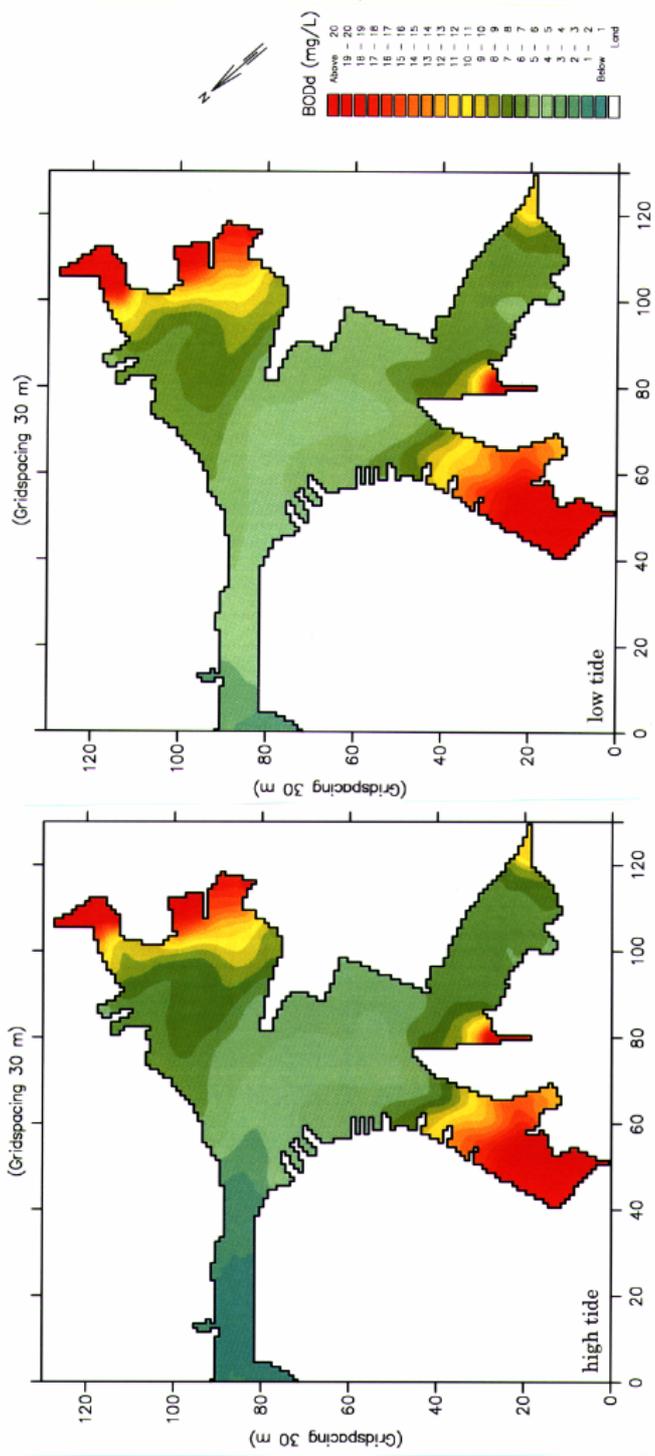


Figure 4.3.16 Concentration distribution of dissolved BOD (BODd) in Havana bay (Surface layer).

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.17
Distribucion de la Concentracion de BOD Disuelto (BODd) en la Bahia de la Habana (Estrato de la Superficie)

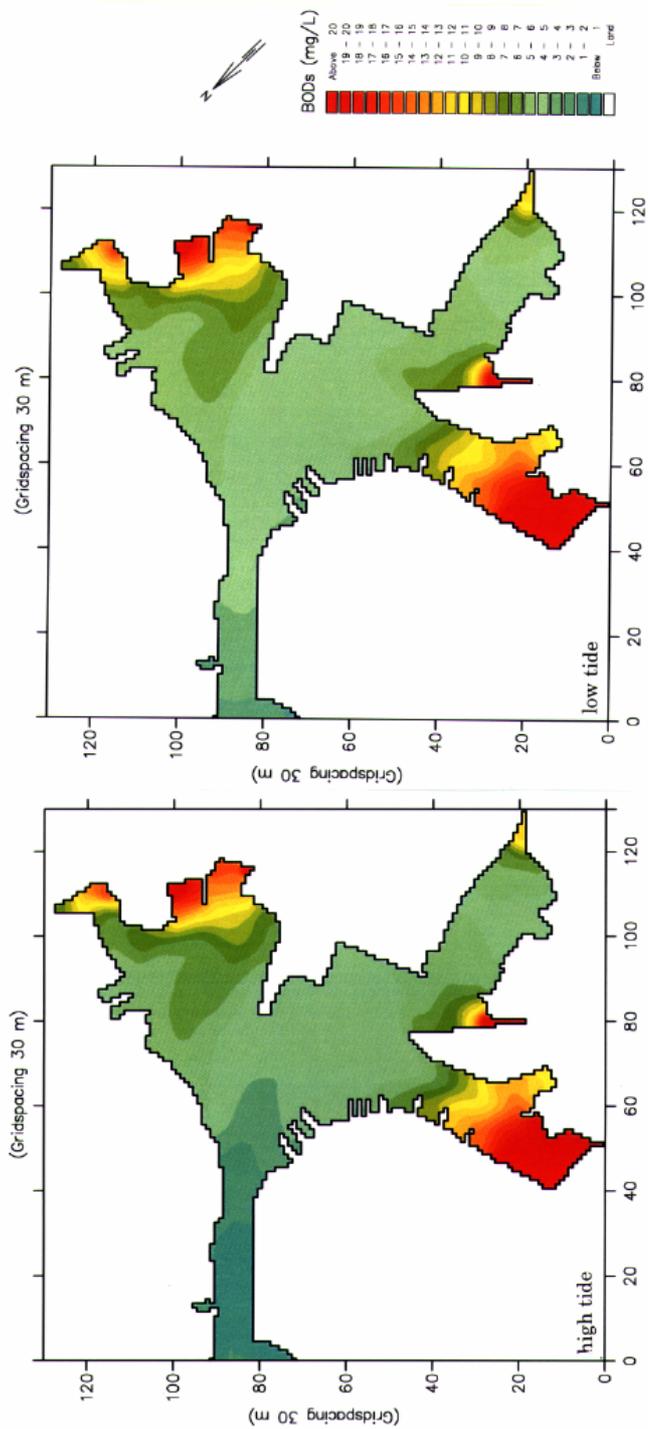


Figure 4.3.17 Concentration distribution of suspended BOD (BODs) in Havana bay (Surface layer).

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.18
Distribucion de la Concentracion de BOD Suspendido (BODs) en la Bahia de la Habana (Superficie)

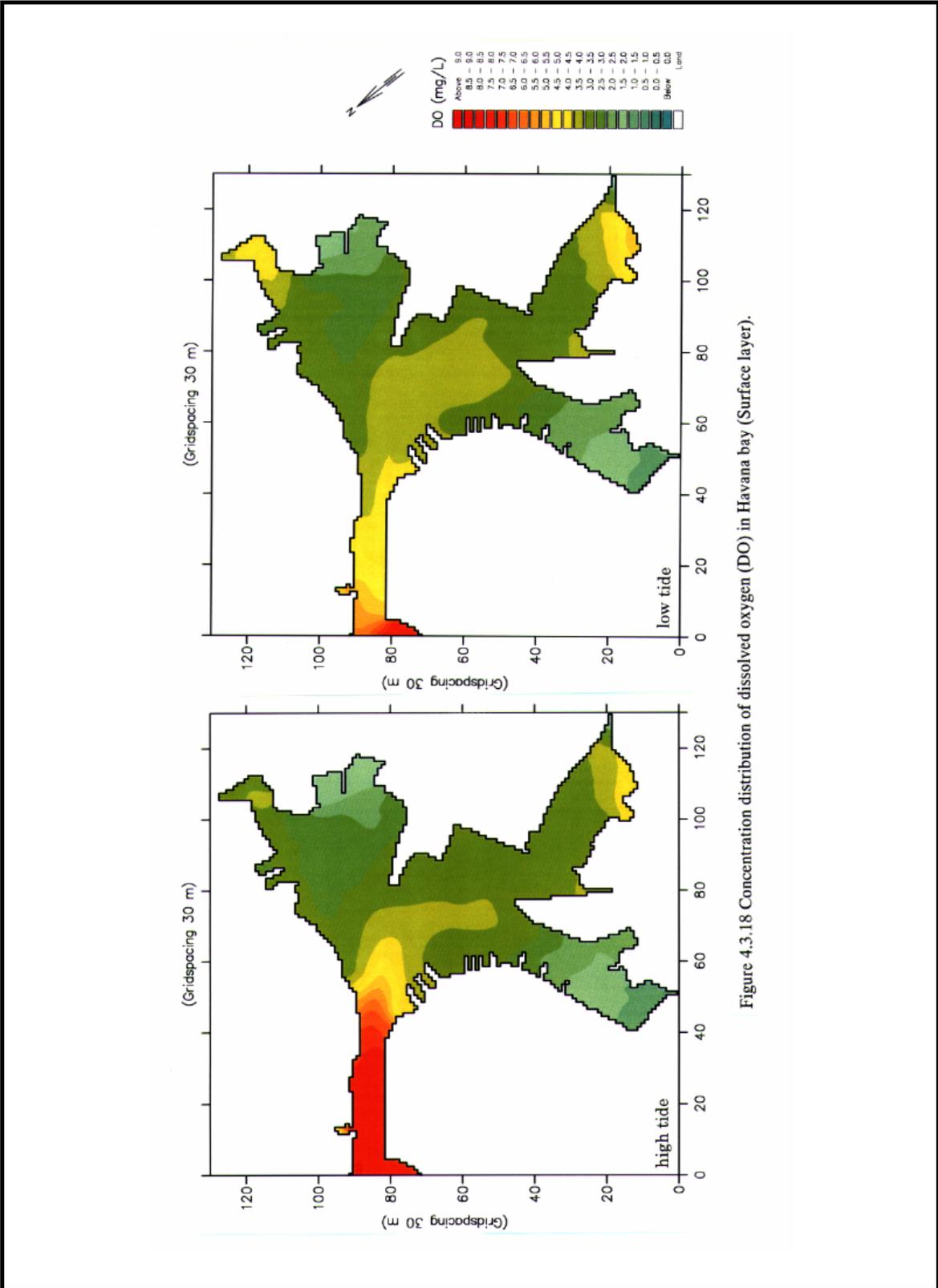


Figure 4.3.18 Concentration distribution of dissolved oxygen (DO) in Havana bay (Surface layer).

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.19
Distribucion de la Concentracion de Oxigeno Disuelto (Do) en la Bahia de la Habana (Superficie)

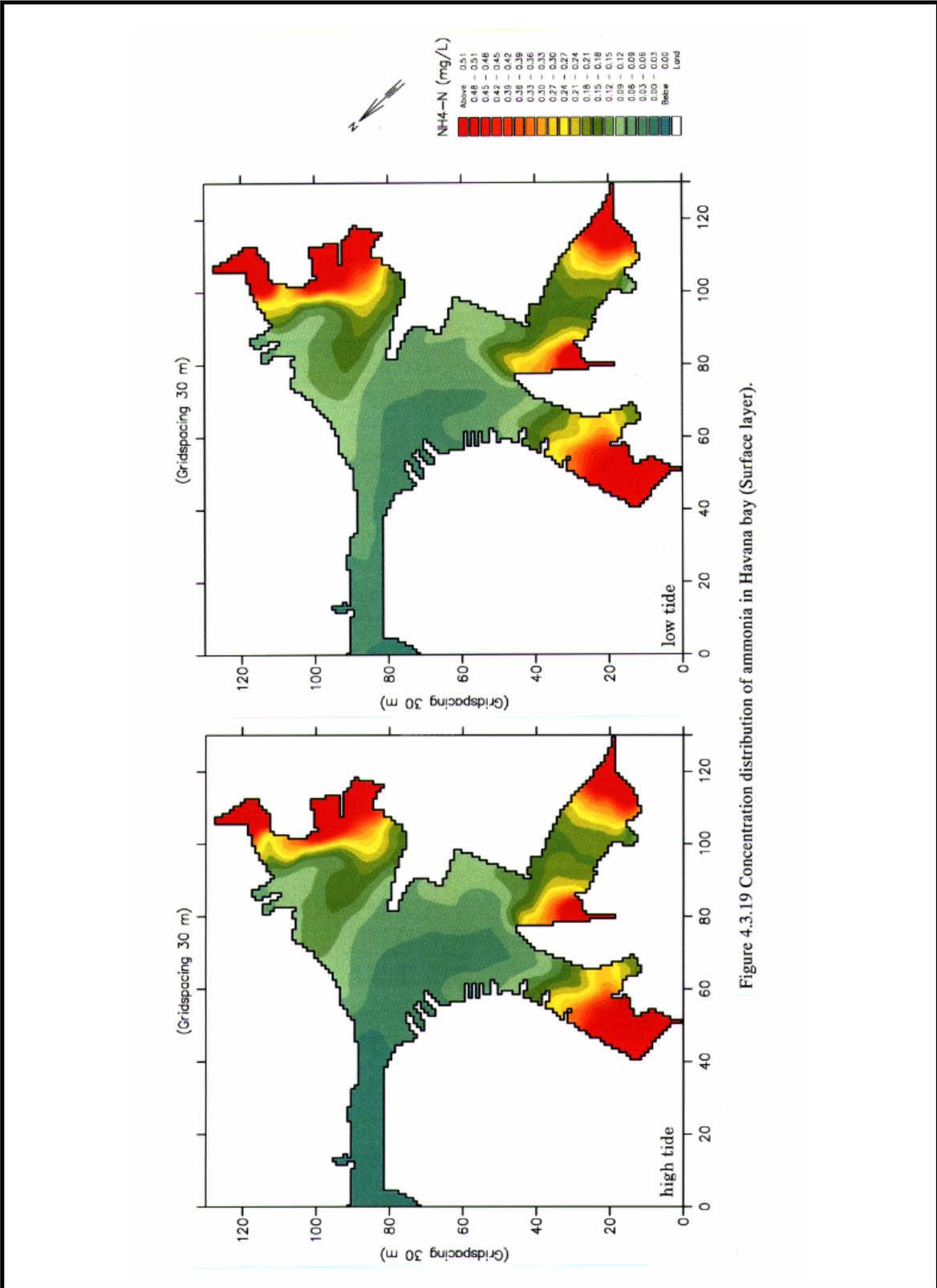


Figure 4.3.19 Concentration distribution of ammonia in Havana bay (Surface layer).

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.20 Distribucion de la Concentracion de Amoniaco en la Bahia de la Habana (Superficie)

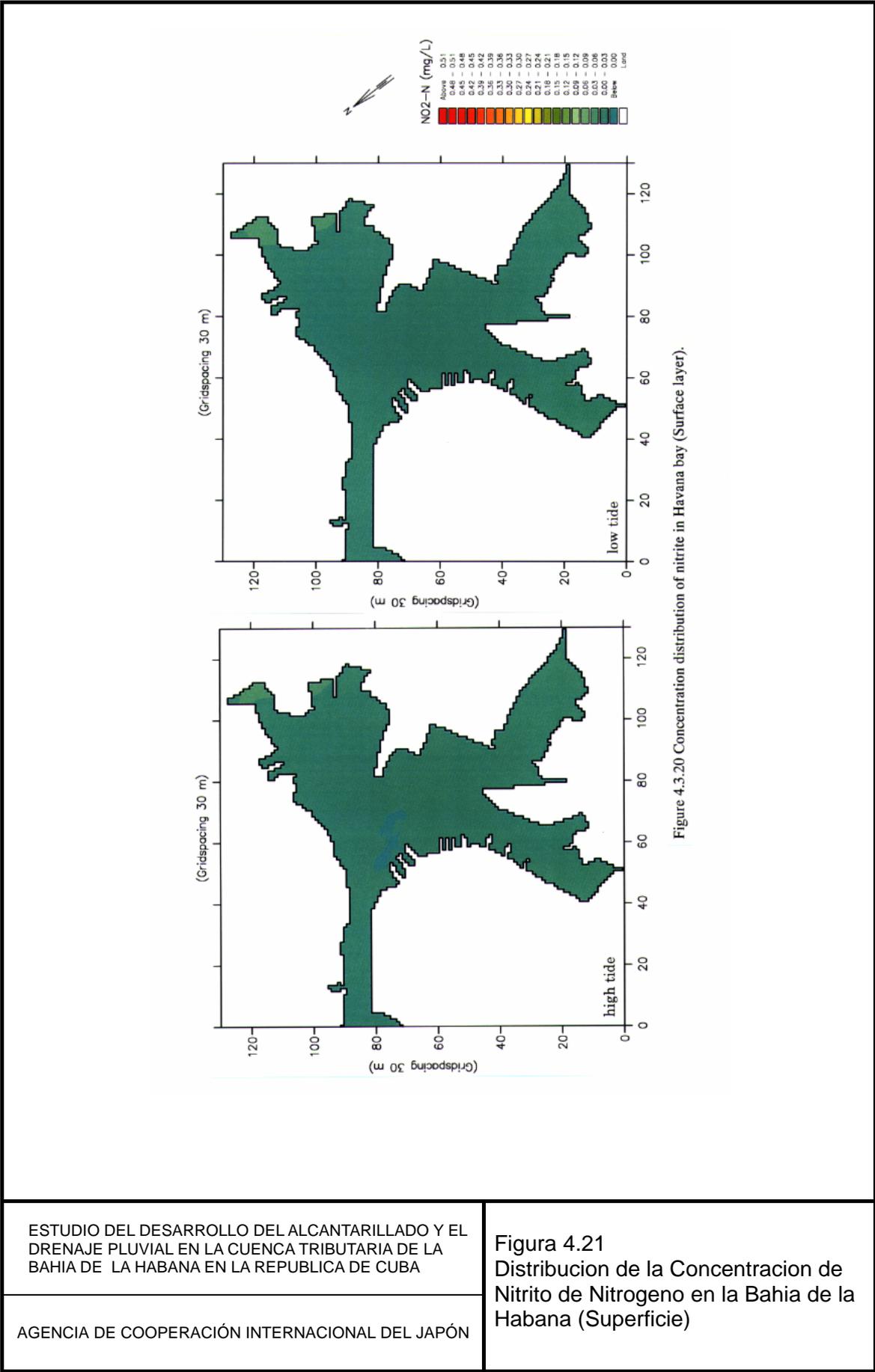


Figure 4.3.20 Concentration distribution of nitrite in Havana bay (Surface layer).

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.21
Distribución de la Concentración de Nitrito de Nitrogeno en la Bahía de la Habana (Superficie)

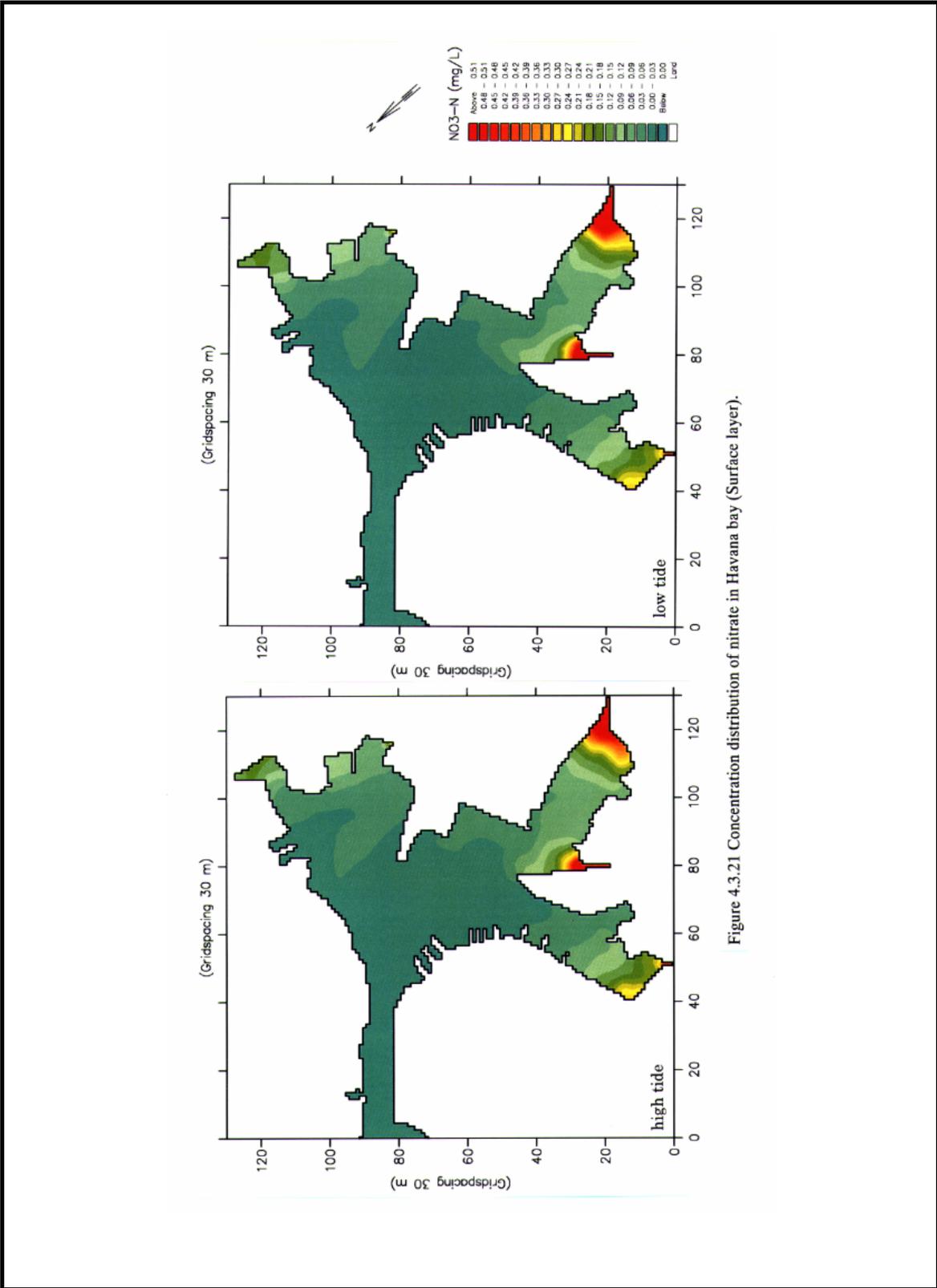


Figure 4.3.21 Concentration distribution of nitrate in Havana bay (Surface layer).

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.22
Distribucion de la Concentracion de Nitrato de Nitrogeno en la Bahia de la Habana (Superficie)

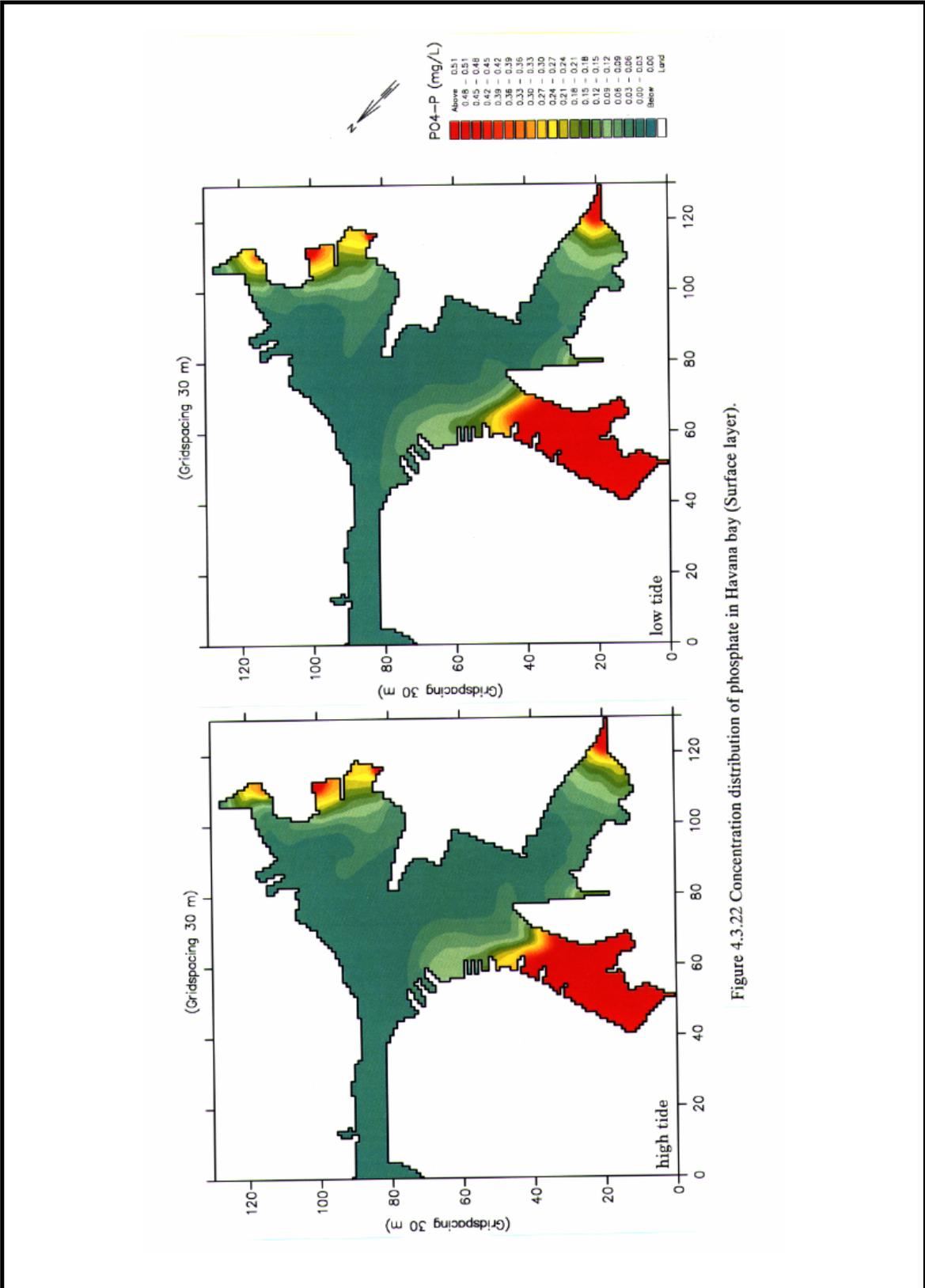


Figure 4.3.22 Concentration distribution of phosphate in Havana bay (Surface layer).

ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN

Figura 4.23
Distribucion de la Concentracion de Ortofosfato en la Bahia de la Habana (Superficie)

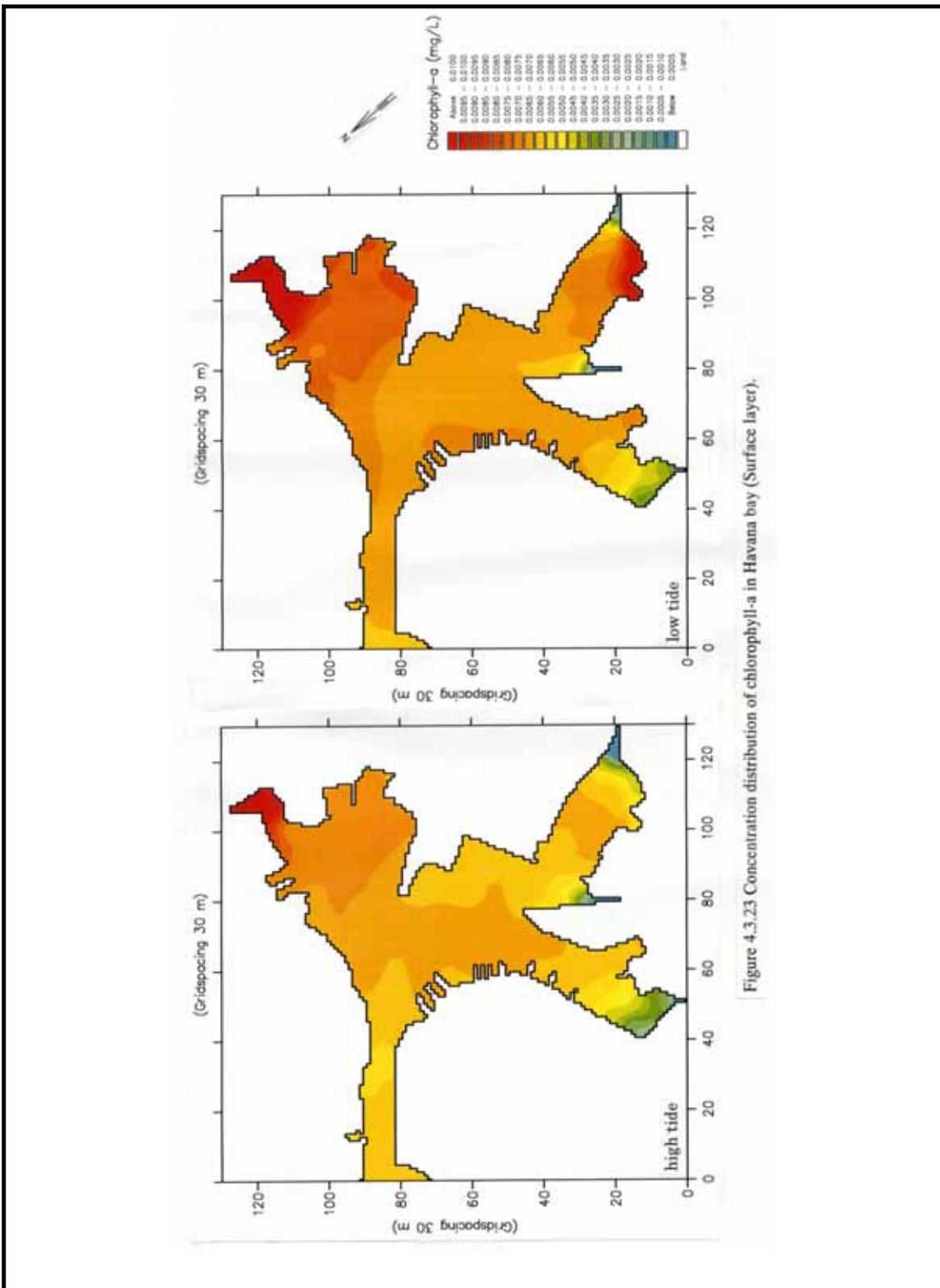


Figure 4.3.23 Concentration distribution of chlorophyll-a in Havana bay (Surface layer).

| | |
|--|---|
| <p>ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL ALCANTARILLADO Y EL DRENAJE PLUVIAL EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA BAHIA DE LA HABANA EN LA REPUBLICA DE CUBA</p> | <p>Figura 4.24 Distribucion de Concentracion de Clorifila en la Bahia de la Habana (Superficie)</p> |
| <p>AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN</p> | |