



## Proyecto del Tercer Juego de Esclusas

Traducción

**Nombre del estudio en inglés:** Saltwater intrusion analysis for Post Panamax Locks – Report A

**Nombre del estudio en español:** Análisis de la intromisión de agua salada en las esclusas Pospanamax – Informe A

**Fecha del informe final:** Junio de 2003

**Fecha de la traducción:** 24 de mayo de 2006

**Nombre del consultor:** WL Delft Hydraulics

## RESUMEN EJECUTIVO

### Introducción

La Autoridad del Canal de Panamá (ACP) otorgó a WL Delft Hydraulics el contrato para la realización del “Análisis de la intromisión de agua salada en las esclusas existentes y en las esclusas Pospanamax propuestas para el Canal de Panamá” (contrato SAA-74337). Los objetivos de los servicios de WL Delft Hydraulics consistieron en analizar la intromisión de agua salada en las esclusas existentes y en las esclusas Pospanamax propuestas. Para este propósito, los servicios incluyeron:

- análisis de las operaciones actuales del Canal y datos sobre la intromisión de agua salada con las condiciones existentes
- recopilación de datos en el campo sobre la intromisión de agua salada, tanto en la temporada seca como en la lluviosa
- modelaje numérico, validación y análisis de la intromisión de agua salada con las condiciones existentes
- modelaje numérico y análisis de la intromisión de agua salada para las tres configuraciones propuestas para las esclusas Pospanamax

Los servicios también incluyen:

- desarrollo de las especificaciones para pruebas adicionales de la intromisión de agua salada utilizando modelos físicos a escala de las esclusas propuestas y las tinas de reutilización de agua



El Informe A presenta los resultados del análisis de la intromisión de agua salada con las condiciones existentes, incluyendo una revisión de las operaciones actuales del Canal, un análisis de los datos disponibles sobre la intromisión de agua salada con las condiciones existentes, recolección de datos en el campo de la salinidad durante las temporadas seca y lluviosa, desarrollo de un modelo de simulación numérico y un análisis de la intromisión de agua salada con las condiciones existentes. Además, el informe presenta las especificaciones para las pruebas de intromisión de agua salada utilizando modelos a escala (Anexo III).

### **Análisis de los datos**

La ACP proporcionó varios informes, dibujos, datos y folletos sobre el tema del diseño y operación del Canal, intromisión de agua salada y la expansión futura del Canal. Todos los informes y datos, en particular aquellos sobre el Canal y el sistema de esclusas existentes y la intromisión de agua salada, han sido estudiados a cabalidad.

El Canal de Panamá, en operación desde agosto de 1914, conecta el océano Atlántico, al noroeste, con el océano Pacífico, al sureste. Su extensión total de océano a océano es de aproximadamente 80 Km. El lago Gatún, en el área noroeste del Canal, y el Corte Culebra, un cauce angosto excavado a través de las rocas de la Cordillera Continental, constituyen la mayor elevación del sistema del Canal. El lago Gatún se conecta con el océano Atlántico por medio de un sistema de esclusas de dos carriles y tres niveles. Un sistema de esclusas de dos carriles y un solo nivel conecta el Corte Culebra con el relativamente pequeño lago Miraflores en el área sureste del Canal, mientras que un sistema de esclusas de dos carriles y dos niveles conecta el lago Miraflores con el océano Pacífico. Desde la perspectiva de la intromisión de agua salada, las características más importantes de las esclusas son el nivel superior en el piso de cada esclusa aguas arriba, y el sistema de llenado y vaciado ubicado en el piso. El escalón promedio en el nivel del agua se ubica entre 8.15 m y 9.30 m. Diariamente transita un promedio de 35 buques de alto calado.

En algunas ocasiones en el pasado se han realizado mediciones de salinidad en el Canal de Panamá. Además, la División de Administración Ambiental de la ACP realiza mediciones de salinidad ocasionalmente. Las principales conclusiones a las que llegamos a partir de estas mediciones de salinidad son:

- La concentración de salinidad en el lago Gatún es prácticamente imperceptible; el lago Miraflores tiene una baja concentración de salinidad (de hasta 3 partes por millar).
- Las concentraciones de salinidad en las entradas del Atlántico y el Pacífico son más bajas que las concentraciones de salinidad en los océanos, particularmente cerca de la superficie del agua cerca de las esclusas.
- El sistema de llenado en el piso de las esclusas facilita una buena mezcla del agua de llenado con el agua de la esclusa, lo que resulta en una concentración de salinidad uniforme luego del llenado; la mezcla se mantiene gracias a la acción de las hélices de los buques en tránsito.
- Las corrientes de densidad y de capas se dan en las esclusas cuando se abren las compuertas.



## Interpretación cualitativa inicial de la intromisión de agua salada

Las mediciones de salinidad tomadas en el pasado indican que las operaciones de esclusaje ocasionan cierta intromisión de agua salada en el lago Miraflores, pero casi ninguna intromisión de agua salada en el lago Gatún. El lago Gatún tiene el nivel más alto, mientras que el lago Miraflores se encuentra un escalón por debajo del lago Gatún y dos escalones por encima del nivel de la entrada del Pacífico.

El agua de los lagos baja en la dirección de los escalones durante los esclusajes aguas arriba y aguas abajo de los buques, mezclándose con el agua de las esclusas inferiores durante el llenado. Cuando se abren las compuertas de las esclusas y un buque entra o sale, el volumen del buque se intercambia y ocurren flujos de densidad entre los cuerpos de agua con diferente densidad; por esto, el agua salada se mueve de los cuerpos de agua inferiores hacia los superiores. Los escalones en el piso juegan un papel importante en vista de la limitación de intromisión de agua salada de los cuerpos de agua inferiores hacia los superiores.

En el caso de los esclusajes aguas arriba, el buque se encuentra en la cámara de las esclusas que está llena de agua tomada del cuerpo de agua más alto adyacente. Inicialmente, el volumen del agua en la esclusa inferior es relativamente menor comparado con el volumen sumergido del buque. La entrada de agua por medio de chorros es influenciada por el buque que flota sobre las aperturas de llenado. Cuando el cuerpo de agua más elevado adyacente es una esclusa, el agua proviene de un volumen de agua inicialmente grande (sin buque) y la velocidad inicial del influjo en los chorros puede ser alta debido a la gran diferencia inicial en el nivel del agua. Cuando el cuerpo de agua más elevado adyacente es un lago, el agua proviene del área entre el muro lateral y el muro central, cerca de las compuertas aguas arriba. Cuando los niveles de agua en ambos cuerpos de agua se han igualado y se abren las compuertas de aguas arriba, el buque debe pasar el escalón en el piso de la cámara de la esclusa (excepto cuando el cuerpo de agua más bajo es la entrada de mar o un lago). El espacio de quilla en el escalón es importante para las corrientes de retorno y los posibles efectos de pistón (el nivel del agua en la esclusa superior puede permanecer elevado).

En el caso de los esclusajes aguas abajo, el buque se encuentra en la cámara de la esclusa donde el agua llega para llenar el cuerpo de agua inferior. Cuando el cuerpo de agua inferior es una esclusa, los chorros de llenado no son bloqueados por un buque y se pueden distribuir libremente. Inicialmente, el agua de llenado con más baja densidad – lo más probable – se expande y se distribuye cerca de la superficie del agua. Debido a la presencia de tantos chorros, la expansión es limitada y el agua de llenado se distribuye hacia arriba y hacia abajo, lo último debido a la mezcla intensiva debido a la turbulencia que generan los chorros. Cuando el buque transita del cuerpo de agua superior hacia el inferior, pasa por un escalón que baja (excepto cuando el cuerpo de agua inferior es la entrada al mar o un lago). Una vez más, el espacio bajo quilla en el escalón es importante para el retorno de las corrientes y los efectos de pistón (el nivel del agua en la esclusa superior adyacente puede permanecer elevado).

Los diversos pasos en un esclusaje aguas arriba o aguas abajo no pueden ser simulados en un modelo de flujo numérico tridimensional. En cambio, se debe aplicar un modelo de simulación simplificado en el que los coeficientes de intercambio se utilicen para cuantificar los volúmenes de agua intercambiada entre los cuerpos de agua separados con diferentes niveles de salinidad. En general, estos coeficientes de intercambio son diferentes para los diversos pasos en el proceso de esclusaje, y varían dependiendo de varios factores que ejercen influencia.



## Recopilación de datos en el campo

Se requirió la realización de mediciones en el campo para recolectar suficientes datos para el estudio de la intromisión de agua salada en el Canal de Panamá. Los programas de recopilación de datos en el campo fueron diseñados de manera tal que, en particular, los datos fueran obtenidos para el análisis de los procesos físicos durante los esclusajes aguas arriba y aguas abajo, mientras que también se recolectaron datos para determinar los coeficientes de intercambio para su aplicación en el modelo numérico, que simula el proceso de intromisión de agua salada. Además, los niveles actuales de salinidad en los lagos Gatún y Miraflores fueron medidos al igual que los niveles de salinidad en las entradas de mar.

Panamá cuenta con dos estaciones – la estación lluviosa que se extiende de mediados de mayo a finales de diciembre y la estación seca, que va de enero a mediados de mayo. Como las variaciones estacionales (variaciones en los niveles de agua en el lago Gatún ocasionadas por variaciones estacionales en la precipitación, variaciones en la descarga de agua de los lagos, el brote estacional de agua más fría y más salina en la costa del Pacífico durante la temporada seca) se tomaron como posibles factores que influyen el proceso de intromisión salina, se realizaron mediciones a finales de las temporadas lluviosa y seca.

Se tomaron mediciones de perfiles verticales de salinidad en las cámaras de las esclusas, antecámaras, poscámaras, entradas de los lagos y de mar, utilizando dos instrumentos CTP de rápida respuesta (CTP = conductividad, temperatura y profundidad bajo la superficie del agua). A partir de estas mediciones, se puede deducir que tanto la salinidad como la densidad ocurren en función de la profundidad bajo la superficie del agua.

Ambos CTP fueron colocados en las esclusas, el área del Canal y las entradas de mar, utilizando dos botes pequeños de reconocimiento (las lanchas *Cara Cara* y *Perico*), proporcionados por la ACP. Un tercer instrumento CT conectado a un registrador de datos se utilizó para medir la salinidad en una serie de ubicaciones fijas bien seleccionadas en las antecámaras y poscámaras de las esclusas tanto en el Pacífico como en el Atlántico. El trabajo en las esclusas y los cauces fue coordinado por personal de la ACP.

## Interpretación cuantitativa de la intromisión de agua salada con las condiciones existentes

### *Entradas del Pacífico y Atlántico*

Las mediciones de la *estación lluviosa* demuestran la existencia de una subcapa en la entrada del Pacífico con una salinidad constante; la salinidad es de aproximadamente 28 partes por millar (ppm) en el área cercana a las esclusas. Los vertidos desde las esclusas ocasionan valores más bajos de salinidad en la capa cercana a la superficie del agua. La densidad de esta capa superior depende principalmente de la cantidad de esclusajes en Miraflores y de las ventanas entre períodos de esclusaje. La considerable variación de las mareas en la entrada del Pacífico no pareciera influir mucho en los niveles de salinidad en el área cerca de las esclusas. Es cierto que el movimiento de las mareas ocasiona la entrada y salida de agua en la entrada de mar, pero las velocidades del flujo horizontal de las mareas cerca de las esclusas son pequeñas y no causan una mezcla significativa. En consecuencia, sólo la densidad de la capa inferior donde la salinidad tiene más o menos un valor constante de aproximadamente 28 ppm, varía con el movimiento de las mareas. La temperatura en esta subcapa es de aproximadamente 28°C. Las mediciones en la *estación seca* demuestran que la temperatura en la subcapa es considerablemente inferior – unos 21°C –, mientras que la salinidad es superior – unas 34 ppm. Estas diferencias son



probablemente causadas por variaciones estacionales en los flujos de las corrientes hacia la costa del Pacífico.

Las mediciones en la entrada del Atlántico demuestran la existencia de una subcapa, similar a la de la entrada del Pacífico, en la que la salinidad y la temperatura mantienen un valor constante. Durante la *estación lluviosa*, la salinidad en la subcapa cercana a las esclusas fue de aproximadamente 31 ppm, mientras que en la *estación seca* fue ligeramente más alta con aproximadamente 32 ppm. La temperatura del agua en la subcapa fue más o menos la misma durante ambas estaciones – aproximadamente 28°C. Al igual que en la entrada del Pacífico, la densidad y salinidad de la capa superior varía dependiendo de la distancia de las esclusas. Las fluctuaciones de salinidad en la capa superior son ocasionadas por flujos de vertido continuos, pero interrumpidos desde las esclusas de Gatún.

#### *Proceso de intromisión de agua salada en las esclusas*

Las mediciones realizadas en las esclusas, antecámaras y poscámaras han sido extensivas. A partir de los análisis de los datos de las mediciones y observaciones visuales, se han identificado algunos procesos hidráulicos característicos referentes a la intromisión de agua salada durante los tránsitos aguas arriba y aguas abajo de los buques. Las conclusiones generales basadas en las mediciones de salinidad son: (i) no ocurren fenómenos significativos de densidad transversal en las cámaras de las esclusas, (ii) los niveles promedio de salinidad disminuyen considerablemente en cada cámara superior de las esclusas (iii) se puede esperar un patrón de intromisión de agua salada más o menos cíclico, ocasionado por períodos alternados de esclusajes aguas arriba y aguas abajo.

Las olas de capas y densidad constituyen fenómenos hidráulicos normales en cámaras cerradas de esclusas, mientras que las corrientes de densidad entre los cuerpos de agua adyacentes se dan al abrir las compuertas. La Tabla 3.4, que está basada en los resultados de nuestras mediciones, presenta el rango aproximado de los valores de salinidad promediados por volumen en los diferentes cuerpos de agua.

Existen diversas diferencias aparentes entre los esclusajes aguas arriba y aguas abajo. Las principales teorías son: un movimiento del buque hacia arriba va ligado a un movimiento hacia abajo del agua; un movimiento hacia abajo del buque va ligado con un movimiento hacia arriba del agua; el agua de llenado siempre va hacia abajo; el agua de llenado diluye, mientras que los chorros de llenado mezclan el agua en una cámara inferior de las esclusas; el escalón en el piso de las cámaras de esclusas en el lado de aguas arriba ejerce influencia sobre las corrientes movidas por diferencias de densidad y limita la intromisión de agua salada.

El proceso de esclusaje aguas arriba se inicia en una esclusa inferior que en su mayoría está llena de agua salada del mar; esto ocurre particularmente en las esclusas del Pacífico, donde las compuertas de las esclusas se abren mucho antes del arribo del buque. Cuando el buque entra, una cantidad de agua equivalente al volumen sumergido del buque es empujada y fluye hacia la poscámara del lado del mar. Debido a los efectos de la densidad y el movimiento del buque, se da un intercambio adicional de agua entre la esclusa y la poscámara del lado del mar; el agua con menor porcentaje de salinidad se mueve hacia la poscámara del lado del mar y es reemplazada por casi igual cantidad de agua con mayor nivel de salinidad, ocasionando intromisión de agua salada. Este proceso se repite en cada esclusa superior, pero el escalón aguas arriba en la entrada de una esclusa superior junto con la corriente de retorno a lo largo del buque son medios efectivos para limitar la intromisión de agua salada. Más aún, el agua de llenado de la esclusa superior



adyacente proviene de la región del agua cercana al piso, la cual contiene el mayor nivel de salinidad, o de la antecámara. De esta manera, el agua salada será vertida de vuelta. Una desventaja del sistema de llenado en el piso es que los chorros de llenado mezclan todo el volumen de agua alrededor del buque dentro de la cámara de la esclusa. Esto resulta desfavorable si se trata de prevenir la intromisión de agua salada en el cuerpo de agua más alto adyacente.

El efecto adverso de los chorros de llenado resulta especialmente claro durante el esclusaje aguas abajo de un buque. Iniciando con la esclusa superior (sin buques en la cámara de la esclusa) el agua es vaciada desde la antecámara. Parte de la salinidad infiltrada anteriormente es sacada con el agua de llenado. El agua en la cámara de la esclusa es diluida por el suministro de esta agua que, generalmente, tiene un menor nivel de salinidad que el agua que la recibe en la cámara de la esclusa. Sin embargo, los chorros de llenado mezclan todo el cuerpo de agua. En consecuencia, se encuentran concentraciones de sal más elevadas en la parte superior del cuerpo de agua, cerca de la superficie del agua. Cuando el buque entra, una cantidad de agua equivalente al volumen sumergido del buque es empujada y fluye de regreso a la antecámara. Esta agua se origina principalmente en la región superior del agua en la cámara de la esclusa, y debido al intensivo proceso de mezcla, contiene sal. Las diferencias de densidad y el movimiento del buque causan un intercambio adicional de agua entre la cámara de la esclusa y la antecámara. En esta situación, el escalón aguas abajo en la entrada de la cámara de la esclusa es menos efectivo para prevenir o reducir la intromisión de agua salada. Este proceso se repite en cada esclusa inferior. La marea en la entrada de mar es particularmente importante para la última fase del proceso de esclusaje aguas abajo, cuando el buque entra a la esclusa inferior adyacente a la poscámara del lado del mar. Durante la marea alta, el nivel del agua en esta esclusa es alto y en consecuencia sólo una cantidad relativamente pequeña de agua de llenado se requiere para subir el nivel. El agua en la esclusa inferior está menos diluida y el agua con una mayor concentración de salinidad entra a la esclusa superior adyacente. Por el contrario, la marea baja en la entrada de mar produce menos intromisión de agua salada.

De manera general, se transporta más sal en la dirección aguas arriba durante los esclusajes aguas abajo que durante los esclusajes aguas arriba. Es posible que en algunos casos hasta se dé un transporte inverso durante el esclusaje aguas arriba. La marea alta resulta más favorable para la intromisión de agua salada que la marea baja, tanto en los esclusajes aguas arriba como aguas abajo. Los buques más grandes producen una corriente de retorno mayor y en consecuencia son más desfavorables en el caso de los esclusajes aguas abajo; los buques más pequeños producen corrientes de retorno menores, pero debido a esto, el desarrollo de flujos de densidad encuentra menos obstáculos y se convierte principalmente en una función de tiempo. Los buques más pequeños transitan en grupos y su manejo requiere de más tiempo. En consecuencia, las compuertas pudieran permanecer abiertas durante períodos más largos, lo que resulta desfavorable para la prevención de la intromisión de agua salada.

#### *Lago Miraflores*

Las operaciones de esclusaje en Pedro Miguel son la razón por la cual el lago Miraflores es alimentado por un flujo de vertido más o menos continuo desde el lago Gatún. El agua de lluvia entra a varios sitios a lo largo de las riberas oeste y este. La evaporación y las operaciones de esclusaje ocasionan pérdidas de agua en Miraflores. La cantidad de agua perdida en las esclusas de Miraflores es un poco menor que en las esclusas de Pedro Miguel. El agua excedente es descargada a través del vertedero ubicado a un costado de las esclusas de Miraflores. Esta también es la ubicación de donde se saca el agua para efectos de refrigeración. En consecuencia, existe un patrón de circulación en el flujo con un flujo neto en dirección sur hacia Miraflores.



Durante la temporada seca, el suministro de agua al lago es en su mayoría resultado de las operaciones de esclusaje en Pedro Miguel. El nivel del agua en el lago Miraflores se mantiene en aproximadamente PLD+54.5 pies (PLD+16.6 m) durante todo el año.

Las mediciones en la temporada lluviosa demuestran que la salinidad promedio es de aproximadamente 0.5 ppm en todo el cauce de navegación entre las esclusas de Miraflores y las esclusas de Pedro Miguel. Cerca del cauce, los valores de salinidad son de aproximadamente 1.5 ppm (se encuentran valores inferiores de hasta 1.0 ppm cerca de las esclusas de Pedro Miguel, mientras que los valores de salinidad cerca de la superficie del agua pueden ser inferiores a 0.5 ppm).

Mediciones detalladas en secciones cercanas al vertedero de Miraflores muestran que la salinidad es de casi 1.3 ppm cerca de la superficie del agua en el área de las esclusas de Miraflores, disminuyendo hasta casi 1.0 ppm cerca de las esclusas de Pedro Miguel. En el área de agua sobre el cauce, los valores de salinidad son superiores; varían aproximadamente entre 2.0 ppm y 3.5 ppm en todo el cauce. Las mediciones en el área cerca del vertedero de Miraflores muestran valores de salinidad entre casi 1.2 ppm cerca de la superficie del agua y 1.5 – 2.5 ppm cerca del cauce.

Los valores de salinidad hallados cerca del cauce en el área cercana al vertedero son generalmente inferiores a los valores hallados cerca del lecho en el cauce de navegación. Esto podría indicar que el agua salada, infiltrada a través de las esclusas de Miraflores, se propaga inicialmente en el área más profunda del cauce de navegación. Luego pasa por un proceso de difusión y finalmente fluye con el patrón de la corriente dominante hacia el vertedero. En los períodos en los que el vertedero de Miraflores se encuentra activo, una parte del agua salada de las esclusas puede fluir directamente al vertedero.

Al comparar los resultados de la temporada seca y la lluviosa, pareciera que la salinidad en el lago Miraflores ha aumentado en el período entre ambos esfuerzos de medición (el volumen promedio de salinidad en la estación lluviosa es de casi 0.7 ppm, y en la estación seca es de casi 1.5 ppm). Probablemente, la salinidad incrementada durante la época lluviosa es un efecto estacional causado por una menor descarga de agua excedente en el vertedero de Miraflores. Pero además, la temperatura más baja y la mayor salinidad del agua en la entrada del Pacífico durante la estación seca tienen un efecto, porque la diferencia en temperatura entre el lago Miraflores y la entrada de mar y la diferencia más marcada en la salinidad causan corrientes de densidad más fuertes y por ende un mayor influjo de agua salada.

### *Lago Gatún*

El lago Gatún recibe agua del río Chagres (lago Alhajuela) y otros ríos. El nivel del agua fluctúa dependiendo de la estación lluviosa o seca; el nivel medio del agua es PLD+85.0 pies (PLD+25.9 m). Las operaciones de esclusaje en Pedro Miguel y Gatún y la evaporación ocasionan pérdida de agua. El agua excedente se descarga en el vertedero de Gatún; el agua también es llevada a este sitio para la generación de energía eléctrica. El patrón de circulación del agua va hacia las esclusas de Pedro Miguel en la parte sur del Corte Culebra y hacia las esclusas de Gatún y el vertedero de Gatún en el lago Gatún.

Las mediciones demuestran que la salinidad es de casi cero en todo el cauce de navegación entre las esclusas de Gatún y las de Pedro Miguel y en las áreas más profundas cerca de la ribera este del lago (donde atracan los buques) y cerca del vertedero de Gatún. En las áreas cercanas a las



esclusas de Gatún y de Pedro Miguel, se encuentran valores mínimos de salinidad; ocasionalmente se encuentran valores de hasta 0.1 ppm en las antecámaras cerca del cauce. Los CTP aplicados tienen un nivel de medición inferior de salinidad de 0.1‰; esto hace que las mediciones de salinidad con un valor por debajo de 0.1 ppm no sean confiables. La mejor conclusión sería entonces que la concentración de sal en el lago Gatún y el Corte Culebra fue menor que 0.1 ppm durante las mediciones realizadas en las estaciones lluviosa y seca.

### **Modelo de simulación para la intromisión de agua salada**

El proceso de intromisión de agua salada a través de las esclusas del Canal de Panamá se simula con un modelo numérico. En esencia, el modelo consiste de una variedad de cuerpos de agua separados, cada uno con cierto nivel de agua, volumen de agua y concentración de sal, los cuales están conectados entre sí. Cuando un buque navega de océano a océano, atraviesa varios cuerpos de agua, creando una red de transporte de agua de los lagos a los océanos y la consecuente migración de agua salada de cuerpo de agua en cuerpo de agua. El transporte de agua y de sal es evaluado tras cada paso del proceso de esclusaje aguas arriba o aguas abajo.

El modelo de simulación ha sido programado para predecir la carga de agua salada en el lago Miraflores y el lago Gatún una vez que el nuevo tercer carril de navegación del Canal de Panamá esté listo y las nuevas y más grandes esclusas Pospanamax se hayan construido y estén en operación. El modelo permite la posibilidad de comparar cómo influyen los diversos diseños de esclusas Pospanamax en la intromisión de sal, con tinas de reutilización de agua o sin ellas, con varios escenarios de suministro de agua, y para comparar las condiciones futuras con las existentes. Es por ende una herramienta para quienes tomarán las decisiones, que les permitirá adentrarse en los posibles efectos causados al medio ambiente por las futuras esclusas Pospanamax, en términos de intromisión de agua salada y la necesidad de fuentes adicionales de agua dulce.

No se pretende que el modelo de simulación prediga la diseminación de agua salada que dependa del paso del tiempo en el lago Miraflores, el Corte Culebra y el lago Gatún, además de que no posee esa capacidad. Para lograr ese propósito se requeriría de un modelo de flujo completamente tridimensional (3D) que además sea capaz de computar los flujos causados por diferencias de densidad. Este modelo de flujo tridimensional podría utilizar como dato de entrada la carga de agua salada producida por la operación de las esclusas existentes y las esclusas Pospanamax.

Los cuerpos de agua separados del Canal de Panamá (cámaras de esclusas, antecámaras y poscámaras de las esclusas, lagos y entradas) son tomados como nodos en el modelo de simulación numérico. Los nodos y las conexiones hidráulicas entre los nodos se muestran en el esquema de la Figura 5.1. En el futuro se podría construir una nueva vía con esclusas con capacidad para buques Pospanamax.

El nivel del agua en los lagos, que varía durante el transcurso del año, y los niveles de fluctuación del agua (movimientos de las mareas) y las concentraciones de sal en las poscámaras del lado del mar constituyen los datos utilizados para el modelo de simulación. La variación en los niveles del agua en los lagos es producto de la entrada y salida de agua. Presumimos que la intromisión de agua salada en los lagos es causada solamente por el proceso de esclusaje. Todas las demás fuentes de agua [lago Alhajuela (río Chagres)], quebradas y ríos, precipitación pluvial, flujo de agua subterránea) proporcionan agua dulce a los lagos.



De darse algún flujo saliente de agua salada, ocurre a través de los vertederos del lago Gatún (derrame de agua excedente, agua para generación eléctrica) y el lago Miraflores (derrame de agua excedente, agua para refrigeración). Presumimos que el flujo saliente de agua salada a través de otras tomas (para agua potable, uso industrial, aguas subterráneas, evaporación) es nulo o puede ser obviado del análisis.

Los movimientos de los buques en el modelo de simulación van del océano Pacífico al lago Gatún, del lago Gatún al océano Atlántico, del océano Atlántico al lago Gatún y del lago Gatún al océano Pacífico. Cuando un buque se mueve hacia arriba o hacia abajo, los niveles del agua, la profundidad del agua, los volúmenes del agua y las concentraciones de sal cambian en los nodos del modelo de simulación. El valor de estos parámetros nodulares se evalúa luego de cada paso del proceso de esclusaje para cada movimiento del buque.

Los pasos subsiguientes del movimiento de un buque se describen en un escenario; los escenarios especiales son escenarios que describen un “retorno” o descargas de agua en las represas de Gatún y Miraflores. Los escenarios se combinan en un patrón diario. El patrón de un día normal consiste en una cantidad de escenarios de movimientos de buques, escenarios de retorno y escenarios de descarga de agua.

Los patrones diarios se combinan en un caso. Al inicio de cada caso se inicializan los parámetros del estado nodular. Los patrones diarios se manejan uno a uno en la secuencia de entrada. Luego de manejar el último patrón del día, el modelo de simulación comienza otra vez con el primer patrón del día; este proceso cíclico continúa hasta el último día de la simulación. Al final de cada día calendario (o como se establezca: semana, mes, año) el valor computado de los parámetros de estado se escribe en un archivo.

Cuando un caso es la continuación de un caso anterior, los últimos valores de concentraciones de sal en los nodos (excepto para las entradas del Pacífico y Atlántico) se pueden utilizar como valores iniciales en el nuevo caso.

### **Coefficientes de intercambio**

El proceso de esclusaje es simulado en el modelo numérico como una serie de pasos subsiguientes. Tanto los flujos de agua como los flujos de sal se computan en un paso. Las concentraciones de sal en el balance de salinidad se definen como valores promediados por volumen (en cuerpos de agua); la concentración de sal multiplicada por el volumen de agua representa la cantidad de sal (kg) que es transferida de un cuerpo de agua al otro. El intercambio de sal (IS) en el balance de salinidad representa la cantidad de sal (kg) que se transfiere de un cuerpo de agua al otro.

El intercambio de sal IS, es expresado como el producto de un volumen de referencia bien definido  $V_{ref}$ , una concentración de sal (o diferencia en la concentración de sal) relacionado con este volumen de referencia, y un coeficiente de intercambio  $e_x$ . Para detalles completos refiérase a la Sección 5.8.

Los coeficientes de intercambio representan los efectos combinados de los aspectos hidráulicos y geométricos relacionados con los diversos pasos durante un esclusaje aguas arriba y uno aguas abajo. Los aspectos más relevantes son la dirección de navegación (aguas arriba o aguas abajo),



las dimensiones del buque respecto a las dimensiones de las esclusas, el escalón en el piso en el lado aguas arriba de las esclusas, las diferencias de densidad entre los cuerpos de agua adyacentes, la formación de olas de capas y de densidad en las esclusas, la mezcla ocasionada por los chorros de llenado y la acción de la hélice y el momento en que se abren las compuertas de las esclusas.

Los coeficientes de intercambio se obtuvieron con base en las mediciones de salinidad realizadas durante las estaciones lluviosa y seca para poder tomar en cuenta aspectos hidráulicos relevantes. La procedencia de los coeficientes de intercambio fue apoyada por cálculos realizados con el programa numérico Delft3D. Además, los valores máximos y mínimos se obtuvieron a través de un análisis teórico. Estos límites superiores e inferiores parecieron ser de utilidad para la selección de valores representativos para los coeficientes de intercambio. Los coeficientes de intercambio seleccionados tienen un valor constante en el paso I del proceso de esclusaje (igualar los niveles del agua) y se dan en función del radio  $S/V_{ref}$  ( $S$  = desplazamiento de agua por el buque,  $V_{ref}$  = volumen de referencia) en el paso II (movimiento del buque de un cuerpo de agua al cuerpo de agua adyacente). Los aspectos geométricos están incluidos en la selección de los coeficientes de intercambio, al igual que las dimensiones del buque y los aspectos del radio de bloqueo.

## Pruebas y validación del modelo de simulación

### Pruebas

Hemos probado el funcionamiento adecuado del modelo de simulación a través de corridas de varios casos de prueba. Estos casos de prueba fueron diseñados de tal forma que los resultados pudieran ser revisados paso a paso.

Una primera serie de pruebas se realizó colocando en 0 la concentración de salinidad de todos los cuerpos de agua (incluyendo las antecámaras del Pacífico y el Atlántico). El propósito de estas pruebas era verificar el manejo de los niveles del agua, volúmenes y balance del agua cuando los buques se mueven de océano a océano.

Una segunda serie de pruebas se enfocó en el funcionamiento adecuado de los vertederos, el manejo del balance del agua y la salinidad, el uso de coeficientes, el intercambio de agua salada que depende del tiempo entre las antecámaras y poscámaras y los lagos y el proceso de migración de la sal. La concentración de salinidad inicial en todos los cuerpos de agua se ubicó en 0 (incluyendo las poscámaras del Pacífico y Atlántico), pero la concentración de salinidad inicial de los lagos Gatún y Miraflores se estableció en 30 ppm.

La última serie de pruebas se enfocó en el proceso de intromisión de agua salada del océano Pacífico al Atlántico. En las corridas de la simulación, la concentración de salinidad en las poscámaras del Pacífico y el Atlántico se ubicó en un valor constante de 30 ppm, mientras que la concentración inicial en todos los demás cuerpos de agua se estableció en 0.

En este proceso de prueba se detectaron y se corrigieron errores. Se realizaron corridas con la versión final de la validación del modelo de simulación.

### Validación



El modelo de simulación fue validado con base en las mediciones de salinidad realizadas durante las estaciones lluviosa y seca. Los valores de salinidad promediados por volumen hallados en los lagos se utilizaron para la calibración del modelo (lago Gatún: concentración de salinidad promediada por volumen  $c < 0.1$  ppm; lago Miraflores: concentración de salinidad promediada por volumen  $c =$  aproximadamente 0.7 ppm en la estación lluviosa y hasta aproximadamente 1.5 ppm en la estación seca). También se tomó en consideración el rango aproximado de los valores de salinidad promediados por volumen de otros cuerpos de agua dentro del sistema del Canal, presentados en la Tabla 3.4.

Muchos de los casos se crearon con duración variable. En estos casos, los coeficientes de intercambio fueron afinados aún más. En particular se distingue la selección de los coeficientes de intercambio utilizada en los escenarios de descarga de agua.

Las principales conclusiones de las corridas de validación son:

- Con los coeficientes de intercambio seleccionados, el modelo de simulación puede predecir de manera confiable los niveles y variaciones estacionales de la concentración de salinidad en los lagos Miraflores y Gatún.
- La concentración de salinidad promediada por volumen en el lago Miraflores varía entre 0.7 – 1.5 ppm, dependiendo de las influencias estacionales: (i) variación en la concentración de salinidad y temperatura del agua en las poscámaras del Pacífico, (ii) menos descargas de agua en la temporada seca. La concentración de salinidad en el lago Gatún varía de manera similar, principalmente debido a la menor cantidad de descargas de agua en la estación seca. La concentración de salinidad promediada por volumen en el lago Gatún es pequeña y permanece por debajo de 0.03 ppm, muy por debajo del valor límite de agua dulce de casi 0.45 ppm de salinidad. (Nota: En Holanda se utiliza un valor de 200 mg/l de concentración de cloruro de sodio como valor límite para agua dulce; esto corresponde a unos 400 mg/l ó 0.4 ppm de salinidad. En los EE.UU., un valor de 250 mg/l de concentración de cloruro (unos 0.5 ppm de salinidad) se utiliza como límite máximo para el agua para el consumo humano (norma de la Agencia de Protección Ambiental). Las concentraciones locales de salinidad en los lagos pueden ser superiores a las concentraciones computadas de salinidad promediadas por volumen.
- La variación significativa en las mareas en el Pacífico ocasiona una variación relativamente pequeña en la concentración de salinidad particularmente en el lago Miraflores, que a largo plazo no es de importancia para el nivel de concentración de salinidad en los lagos.
- En la actualidad se infiltra una mayor concentración de salinidad en el lago Gatún a través de las Esclusas de Gatún que a través de las esclusas de Pedro Miguel y el Corte Culebra.
- Bajo las condiciones meteorológicas e hidrológicas actuales, con la actual intensidad de los tránsitos y las dimensiones de los buques, y con la administración actual del agua de los lagos Gatún y Miraflores, se obtienen concentraciones de salinidad estables en los lagos luego de un período de tan solo 2 años (iniciando con cero salinidad en los lagos).