

Sistemas de costeros y estuarinos: Aplicación a la bahía de Mobil

VLADIMIR ALARCÓN

Muchas gracias por venir. En esta presentación simplemente voy a mostrar el resultado de dos publicaciones que se hicieron hace poco, junto con colegas de la Universidad del estado de Mississippi, en Estados Unidos. Haremos una pequeña revisión de la hidrodinámica de estuarios, para después establecer los objetivos y finalmente hablar en métodos de lo que consiste esta investigación, presentaré algunos resultados que obtuvimos en estas dos investigaciones, y finalmente hablaré de aplicaciones potenciales de este método en Chile.

Bueno, como ustedes saben – y quizás en esto estoy predicando al coro –, los estuarios son los lugares geográficos en los que los ríos se unen con el mar, con el océano. Y al menos en el Golfo de México, los estuarios son cuerpos de aguas muy someros, de bajas profundidades, y con una batimetría muy suave. Lo interesante es que en este tipo de cuerpos de agua existe una mezcla de aguas salobres con aguas frescas y eso produce interesante fenómenos de diferencias de densidad. Usualmente lo que la comunidad usa para estimar la hidrodinámica de estuarios, son en 2 ó 3 dimensiones, y generalmente necesitan recursos computacionales muy intensos, ya que las ecuaciones que se resuelven, como ustedes saben, son variaciones de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Al menos en mí experiencia, ya que yo he jugado con códigos en elementos finitos y en diferencias finitas, yo más o menos tengo la impresión de que los códigos que son en diferencias finitas presentan más estabilidad que los códigos que son en elementos finitos. No sé cómo será Delft3D, no sé si serán volúmenes finitos: ayer Cristián nos hablaba de un código de volúmenes finitos, pero por lo menos si comparamos códigos de diferencias y de elementos finitos, las diferencias finitas ganan en términos de estabilidad, etc.

La desventaja de estos códigos que usan diferencias finitas, es que no capturan, tienen limitaciones para capturar la geometría de los estuarios o de cualquier cuerpo de agua, y es por eso que si tenemos un cuerpo de agua que es muy irregular, tenemos que usar mallas, o gridas computacionales muy finas: hay algunos códigos que pueden utilizar, pueden adaptar estas gridas que son prácticamente cartesianas, utilizando coordenadas curvilíneas, pero eso también tiene limitaciones. Y eso hace que si tenemos cuerpos geométricamente muy complejos, las gridas que se producen tienen que ser muy finas y la solución de las ecuaciones diferenciales en estas gridas, toma mucho tiempo.

Para solucionar eso, generalmente lo que se hace es la paralelización del código, sin embargo, el paralelizar un código insume mucho tiempo, ya que generalmente los códigos que son libres, que se les puede descargar libremente desde el internet, son códigos que han sido desarrollados en los '40, '50 y cada ingeniero ha aumentado una subrutina y finalmente son códigos paquidérmicos en los que la

lógica de los programadores es muy difícil de entender, y el paralelizar este tipo de códigos es muy difícil. Entonces es una tarea que tomaría mucho tiempo.

Otra opción dentro de esta misma opción de paralelización de códigos, es escribir el código desde los inicios y generar un nuevo código, que es lo que hicieron Cristián y su equipo en CIGIDEN, usaron volúmenes finitos. Pero obviamente ha debido tomar meses sino años para llegar a un resultado. Entonces la otra solución es usar modelos anidados, y esa es la segunda mejor opción, que es hacer distintos modelos hidrodinámicos, con diferentes resoluciones espaciales y luego hacer correr los tres códigos, uno tras otro, y alimentar la parte que nos interesa, en esta parte un subestuario, con condiciones de borde. Pero eso también toma bastante tiempo; eso fue la motivación de esta investigación.

Si sabemos que en mallas que son más pequeñas, que son muy gruesas, los tiempos de ejecución son más cortos, y en mallas que son muy finas los tiempos son más largos, entonces, ¿por qué no hacer que esta conexión entre diferentes modelos que son de áreas geográficas adyacentes, en vez de realizarlas estáticamente, es decir, enlaces suaves, por qué no hacer ese enlace dinámico? El resultado que genera un código pase inmediatamente al código de la región adyacente y hacer que nuestra simulación sea más rápida. Esa fue nuestra motivación y es por eso lo que hicimos fue tratar de generar una herramienta que haga ese enlace dinámico de varios modelos hidrodinámicos que corren paralelamente. No hicimos la paralelización en el código mismo pero sí hicimos una paralelización de diferentes modelos hidrodinámicos, para que se alimenten dinámicamente.

El código que usamos, que también se le puede bajar de la red, es el *Environmental Fluid Dynamics Code*, que ha sido usado históricamente por décadas, y es muy bueno, obviamente soluciona las ecuaciones de aguas someras, que generalmente son aplicadas en ríos de poca altura, estuarios someros y lagos poco profundos. Y el sabor del código que usamos fue el de diferencias finitas, pero algunos investigadores están transformando este código a volúmenes finitos: pero en esta investigación usamos el de diferencias finitas.

El lugar de estudio corresponde a un subestuario localizado en el sudeste de Estados Unidos, el subestuario Weeksbay está dentro de la bahía de Mobil, y la bahía de Mobil está en contacto total prácticamente con el Golfo de México. Lo que hicimos fue generar un modelo hidrológico de las cuencas que alimentan a diferentes partes de los ríos que drenan a este estuario, utilizamos condiciones de contorno de un modelo oceánico y utilizamos tres modelos hidrodinámicos hechos con EFDC de diferentes partes de nuestro lugar de estudio.

La modelación hidrológica se hizo con HSPF, un código que se utiliza mucho mundialmente para estimar volúmenes de aguas que aportan todas las cuencas que drenan a un río. José Hernández es uno de nuestros estudiantes, que se encuentra desarrollando un modelo hidrológico para el río Quilmo [Chile]. Este modelo

hidrológico alimentaba en diferentes lugares del río Fishriver aportes de aguas dulces en formas de series temporales. El río Fishriver, luego de recibir aguas del modelo hidrológico, drenaba aguas al modelo hidrodinámico en sí, en la bahía de Weeksbay, que era nuestro foco de estudio y este modelo hidrodinámico del subestuario de Weeksbay recibía datos de un modelo más grande de la bahía de Mobil con el que establecíamos condiciones de contorno a este modelo de este subestuario. Así mismo, el modelo de la bahía de Mobil recibía condiciones de contorno de un modelo oceánico de ADCIRC, que establecía en las fronteras de la grida, aguas abajo, en este modelo de la bahía de Mobil. La interconexión dinámica la hicimos solo entre los modelos hidrodinámicos, es decir, entre el modelo hidrodinámico del río Fishriver, el modelo hidrodinámico del subestuario Weeksbay y el modelo hidrodinámico de la bahía de Mobil.

Simplemente para darles una idea de cuán grande eran estas gridas, en realidad, la bahía de Mobil es el modelo más grueso (103 celdas), el de Weeksbay era de alrededor de 3000 celdas y el de Fishriver era del orden de 105. (En la presentación que ustedes van a recibir hay un error tipográfico, en donde debería decir celdas, dice células, espero que comprendan: es una culpa de *bing translator*). Reiterando: cada modelo que establece condiciones de contorno para el estuario de Weeksbay tiene que pasar dinámicamente los datos generados por cada uno de estos modelos.

Para esta transferencia dinámica lo que usamos es *Message Passing Interface* (MPI), es una herramienta que se usa para paralelizar códigos, posiblemente Cristián y su equipo usaron MPI para el código desarrollado en la PUC, aunque hay otras herramientas también para hacer también este traspaso dinámico en las fronteras de nuestro modelo de Weeksbay. Una vez que obtuvimos esa herramienta, se la optimizó usando diferentes combinaciones de las *flags* que tiene Fortran90, y de alguna forma tratamos de optimizar lo que ya había sido optimizado por MPI. Obtuvimos que la optimización en tiempos de simulación correspondía a después de haber desarrollado la herramienta con MPI, a esta serie de *flags* que nos permitieron alcanzar un *speed-up*, es decir, logramos acelerar 8 veces el tiempo de simulación que generalmente tomaba 30 horas. Entonces optimizamos ese tiempo en 8 veces.

Luego lo usamos para jugar con algunos escenarios, usamos lo que ocurrió durante el huracán Katrina, todo lo que ocurrió, hidrológica y meteorológicamente durante ese evento, y jugamos con diferentes tipos de períodos de retorno para inundaciones, desde un año hasta 100 años. Obtuvimos en este caso, simplemente áreas de inundación, pero, por ejemplo, si nosotros generáramos una modelo de calidad de agua basado en esta simulación hidrodinámica, con estos resultados podríamos estimar el transporte por ejemplo de sedimentos o de contaminantes, nitratos, fosfatos, etc. Entonces esos fueron los resultados que obtuvimos con nuestro con nuestro modelo ya optimizado a través de MPI y de las opciones que tiene Fortran.

Los resultados están online si ustedes quieren jugar con ellos o ver cuáles son los resultados pueden ir a esta dirección y simplemente desplazando este cursor ustedes pueden ver cómo durante Katrina, para diferentes tipos de períodos de retorno de inundación, las áreas inundación son diferentes, crecen o decrecen. Entonces pueden jugar ustedes con estos resultados, no solamente para Weeksbay, de sino también tenemos para la bahía de Mobil y también para la fracción del río Fishriver que está aguas arriba del modelo del subestuario de la bahía de Weeksbay.

Simplemente para ver posibles aplicaciones que se podrían hacer de esta metodología en Chile, junto con el profesor Enrique Álvarez y el profesor Luis Estellé, de aquí de la Escuela, alguna vez exploramos la posibilidad de desarrollar un modelo hidrodinámico y no solamente hidrodinámico, sino de calidad de agua del estero Cubquelán, que está en el sur de Chile. Ya habíamos establecido una estrategia para generar, por ejemplo, los modelos hidrológicos que alimentan aguas arriba de este estero, habíamos más o menos caracterizado la batimetría: no tenemos datos muy finos pero ya teníamos idea de cómo es la batimetría de este estero. Lastimosamente no tuvimos suerte en el en el financiamiento y no pudimos completar este estudio. De todas maneras la idea está allí, este, por ejemplo, sería un lugar geográfico ideal en Chile donde podríamos utilizar esta esta técnica, y lo que en realidad buscábamos en este estudio no era solamente generar un modelo hidrodinámico, sino estudiar el transporte de materia orgánica y la disposición de materia orgánica en este estero, que es usado para acuicultura, la empresa que posiblemente hubiera dado lanzamiento para este proyecto, estaba interesada en ver donde se depositaba la materia orgánica.

Otra idea era con el profesor Luis Álvarez hacer modelos hidrodinámicos sobre transporte de contaminantes en la cuenca del río Biobío, de algunos estén tributarios a la cuenca del río Biobío: el profesor Alcayaga me dio la idea de un tributario que podría ser muy interesante la idea de aplicar este tipo de metodología para simular la hidrodinámica y también la calidad de agua. También con el profesor Alcayaga y con José Hernández, utilizando el modelo hidrológico que está desarrollando planeamos hacer este tipo remodelación hidrodinámica para el río Quilmo, creo que tenemos ya la batimetría.

Más menos esas serían las aplicaciones potenciales de este método en regiones de Chile, donde sería necesario estimar la hidráulica; y bueno con eso termino mi presentación. Muchas Gracias.

Preguntas

La validación de las simulaciones ¿cómo las hacen, con qué las hacen? Si dices que la materia orgánica se deposita, ¿puedes ver la validación de las partículas, puedes ver la validación de las depositaciones?

Para validar, teníamos dos modelos ya validados: el modelo de la bahía de Mobil y el modelo del río Fishriver. Los calibramos y validamos con los datos de estaciones de elevación del agua que había disponibles, no tenemos muchos datos, pero tratamos de validarlos, primero calibrarlos y después validarlos. No teníamos una estación que tenía récords muy extensos para el subestuario, teníamos creo que simplemente como dos meses, y durante Katrina barrió con la estación que había en el lugar, que estaba cerca de la boca del río, antes de entrar al subestuario.

Entonces teníamos datos parciales para calibrar el modelo del subestuario, pero los modelos que proporcionaban las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo sí estaban validados, pero eso se hizo no dinámicamente sino fue un trabajo previo cuando desarrollamos los modelos individualmente.

¿Cuándo pasaban datos de una malla a otra, pasaban los datos a través de condiciones de borde y entrada?

Eso fue, y es bien importante, el hacer que hay una transferencia *seamless*, lo que se dice en inglés, no sé cómo traducirlo. Lo que hicimos fue hacer ventanas de nueve celdas primero, luego de diez celdas aumentar, de forma de encontrar un kernel que proporcione una distribución proporcional con respecto del área de cada celda, ya que las celdas de cada uno de estos modelos tenían diferencias de hasta de un factor de 10. Entonces las celdas del modelo de la bahía eran mucho más grandes que las celdas del modelo de Weeksbay y mucho más grandes que las celdas del modelo de Fishriver.

Lo que hicimos fue jugar con ventanas de nueve celdas y ponderar por área, pero obviamente las condiciones, tanto aguas arriba que generaba en el modelo del río Fishriver, y las condiciones que generaba el modelo de la bahía, eran increíblemente dominantes, entonces hicimos una comparación y la transferencia era casi lo mismo que cuando se hace un enlace suave de simplemente alimentar con series temporales en las fronteras.

¿Y un análisis de sensibilidad respecto al tamaño de la celda?

No, eso no lo hicimos y es lo que se debería haber hecho, y eso es lo que se hace generalmente en modelos de elementos finitos: se van haciendo análisis de sensibilidad hasta que ya no hay una influencia, ya no hay variaciones en la transmisión de información. En el caso de este estudio, las condiciones eran tan dominantes, por ejemplo las elevaciones de agua en la frontera del modelo de Weeksbay, y obviamente los resultados, las series temporales, que producía el

modelo de Fishriver eran tan dominantes, que no, dijimos no es necesario esto. Pero debería haberse hecho, si es que hubiera habido diferencias muy leves.

Hidrodinamicamente no cabe duda de que es un muy buen modelo, pero cuando uno utiliza un modelo de calidad del agua: yo hace muchos años utilicé y después se me olvidó, el WASP, que si bien no tenía un módulo hidrodinámico muy importante, sí tenía muy bien desarrollada la parte de calidad del agua ¿Cuál sería la ventaja de este respecto esos modelos tipo WASP? Que son muy antiguos, pero creo que aún son efectivos, porque yo use el WASP 3 ó 4, ahora creo que va en el 6 ó 7. ¿Cuál es la ventaja de este?

En realidad la ventaja de EFDC es que simplemente el cálculo hidrodinámico, tal como usted lo dice, es mejor que el algoritmo que ofrece WASP: lo que hemos hecho en dos lugares, aquí en el golfo de México, fue usar los resultados de EFDC y ponerlos como información dentro de WASP. WASP tiene una opción en la que se hace una transferencia casi automática de la modelación hidrodinámica y ya ahí se utiliza el modelo WASP para hacer todo lo que es calidad de agua y ahí uno tiene lo mejor de los dos mundos. Eso es comúnmente hecho, lo hicimos en el modelo de la bahía de Mobil porque utilizamos WASP para calcular el transporte de nutrientes en la bahía de Mobil, y también para una bahía mucho más pequeñita, que está por este lado, en Mississippi en la costa del Golfo, que se llama Saint Louis Bay. Ahí exactamente fue la misma metodología: hacer la hidrodinámica con EFDC, hacer que WASP lea esa información hidrodinámica y utilice los algoritmos de calidad de agua para calcular nutrientes, hasta mercurio ¿no es cierto? Es como se dice, una unión hecha en el paraíso, EFDC y WASP se utilizan generalmente juntos.