

Análisis integrado de la crecida en Atacama ocurrida en marzo 2015 **CRISTIÁN ESCAURIAZA**

Antes de empezar quiero agradecerle a Hernán por la organización, a la SOCHID por invitarnos a presentar en esta esta Jornada. Quería mostrarles la investigación que hicimos del análisis integrado de todo lo que ocurrió en las crecidas, que recientemente publicado en *Geophysical Research Letters*.

Obviamente esto no es trabajo que haya hecho yo únicamente, somos un grupo grande de investigadores, entre ellos Andrew Wilcox de Estados Unidos y Emmanuel Mignot, de Francia, y varios investigadores, estudiantes: aquí está Jorge y Vicente, de la Universidad Católica, Luca Mao también, de la facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Porque tratamos abordar todos los aspectos relacionados con lo que fue este evento, desde el punto de vista incluso meteorológica, hidrometeorológica, hidrológica e hidráulica también. Para los que no hayan ido, la Universidad Católica tomó el caso de Chañaral como el caso emblemático de ellos, durante el año pasado tuve cinco veces ahí.

En Google Street vemos una sección de Chañaral: en diciembre del año pasado este lugar se veía así (mal), y eso fue posterior que el ministerio pudiera haber organizado y limpiado un poco esta zona, porque cuatro días después de la inundación en la cantidad de barro y lo que había sucedido la ciudad de Chañaral era bien impresionante.

Solamente para mostrarles las consecuencias lo que se vio en la presentación de Roberto anteriormente, las isoyetas muestran - son datos de la NASA - la precipitación total de todo el evento, y en algunas zona claro estuvo entre cerca de 90 mm en algunas partes. Esto probablemente ustedes lo conocen: esta es la cuenca endorreica del salar de Pedernales y la cuenca del Salado, que tiene aproximadamente 7500 km².

Sobre la precipitación total, aquí está el evento en Cine Inca, solamente para poner de referencia lo pasó en Pastillo, hubo fundamentalmente dos eventos de precipitación significativa en toda esta zona, durante los tres días. En Copiapó la estación fluviométrica fue sobrepasada, entonces es difícil decir si posterior al primer peak los otros datos son confiable.

Una característica fundamental de esto, cuando recorrimos la cuenca completa, es que la mayor cantidad de sedimentos provino del valle, provino del río. Observamos que en muchas partes en donde estuvimos evaluando las condiciones de las laderas, no hubo situaciones significativas de deslizamiento o modificaciones grandes en las zonas laterales. La mayor parte de los sedimentos fueron arrastrados por una incisión del cauce, y el sedimento que terminó en la ciudad fue fundamentalmente de esas zonas.

Donde observamos que ocurrió algún tipo deslizamiento, estos fueron muy menores comparados con la cantidad de los que ocurrió en toda esa zona. Sin embargo el

transporte de sedimentos en la zona principal del río fue importante, especialmente en la parte alta, donde hubo mayor precipitación. Si ustedes ven - y eso una de las cosas que nosotros primero hicimos, cuando fuimos a los tres días después de la inundación – es que en Chañaral la precipitación fue cero. De hecho la gente reportaba que había hecho calor en esos días, como mencionaban las dos presentaciones anteriores.

Para mostrar el impacto que tuvo esto, aquí está la ciudad de Chañaral, en la zona cercana a la costa: es el cauce del río salado, marcado en amarillo, lo que está en blanco es la ruta 5, que pasaba por ahí. Todo eso que ustedes ven que es la playa, se calcula que son aproximadamente 300 millones de toneladas de relaves, hasta antes que empezaran a depositarlos en Caleta Palito, un poco más al norte. Se depositaron producto de que los relaves en ese tiempo se tiraban al río Salado

Por ejemplo, en esta foto del año 1922 pueden ver que Chañaral tenía una bahía, de hecho esa calle de aquí se llama Costanera todavía, y queda a unos kilómetros de la costa. Esa situación previa a la inundación. Esta es la situación posterior a la inundación, lo que hicimos nosotros con un GPS diferencial fue marcar todos los puntos donde podíamos determinar hasta dónde llegaba la inundación. Como el barro estaba marcado perfecto en las infraestructuras, con la diferencia de cota en la zona que enfrentaba al flujo y la parte lateral, teníamos una aproximación de la altura velocidad del flujo y con eso calculamos en alguna parte, especialmente el cauce, donde habían casas, velocidades de hasta 8 m/s. Esto fue confirmado después por las simulaciones que hicimos posteriormente.

Esta figura muestra principalmente las profundidades que medimos en distintas partes, y medimos hasta donde llegó la inundación, donde está el punto más alto a lo que llegó y es la línea azul que se ve en esta zona. Se abrieron brechas en algunas zonas de relaves, algunas de hasta 500 m de ancho. Este tipo de análisis es como un análisis forense, uno trata de entender qué fue lo que pasó y tuvimos la suerte de que aguas arriba de Chañaral hay una zona bastante estable, justo por la cual pasó todo el caudal, y lo que hicimos que ir de nuevo con el GPS diferencial y con alta resolución medir varias secciones a lo largo esta zona, asumiendo de que la marca más alta correspondía al caudal máximo.

El problema fundamental de hacer esto – aunque teníamos una súper buena indicación de la de la pendiente y de la forma de las secciones – es que todavía tenemos incertidumbre de otros factores que pueden influir en la dinámica del flujo. Lo obvio que uno podría suponer en principio, es asumir que localmente en esta sección que medimos el flujo era uniforme y si ustedes recuerdan la ecuación de flujo uniforme se puede representar así, la pendiente es igual a la pendiente de fricción en esa zona. Sin embargo, hay factores adicionales que pueden influir en la dinámica, y eso fundamentalmente es el efecto de la hiperconcentración de sedimento

Lo que hicimos este caso fue desarrollar un modelo nuevo de base física que nos permite incorporar el efecto de la concentración de sedimentos ya que cuando es

muy alta, puede producir esfuerzos adicionales por la fluencia. Si está muy concentrado, este aluvión ni siquiera se mueve. También hay efectos adicionales por el aumento de viscosidad y también los esfuerzos internos que provoca tener un flujo con partículas que están constantemente moviéndose al interior del flujo.

Entonces, primero consideramos la concentración del sedimento como uno de los factores que podrían influir en el cálculo del máximo, y en segundo lugar, tampoco tenemos mucha información de la rugosidad. Tenemos un rango, porque había ciertos datos de sedimento, de la granulometría y de la distribución del tamaño de diámetro. Hicimos un análisis de sensibilidad al variar la concentración de sedimento entre el 15% y 20%, (lo que se muestra en este gráfico), y la rugosidad relativa (rugosidad partida hidráulico hidráulico) en un rango que nosotros creemos que era más o menos razonable y estos valores nos indican el caudal. Entonces aproximadamente fue alrededor de 1000 m³/s, de acuerdo a lo que teníamos evaluado en esas condiciones.

Al mismo tiempo, Jorge, Lina y Vicente estuvieron desarrollando modelos hidrológicos para reconstruir el hidrograma. Usaron SWMM, entre otros modelos, que es un modelo semidistribuido, consideraron hasta 11 subcuencas, lo que permitió reconstruir el hidrograma, usando un coeficiente de escorrentía del 6%, logrando reproducir aproximadamente en Chañaral los 1000 m³/s como máximo.

Una de las cosas principales es que el pronóstico meteorológico se tiene que traducir de alguna forma a los efectos. Decir que va a llover 80 mm no es lo mismo que ocurra en Atacama, que ocurra en el sur, entonces de alguna manera necesitamos conectar lo que el pronóstico meteorológico a lo que termina pasando en terreno.

Dentro de las cosas que hicimos fue también desarrollar un modelo poquito más sofisticado, un modelo hidráulico bidimensional. No sé si ustedes saben, pero Diego de Almagro se llamaba antes "Pueblo Hundido", de todas formas la topografía nos mostró eso al final. Esto es una foto justo en posterior al evento, entonces en esta foto pudimos ver cual fue la extensión de la inundación y después con el caudal máximo en Diego de Almagro utilizamos modelo con las condiciones que habíamos determinado a partir del análisis de Chañaral y fuimos capaces de reproducir el área inundada con ese caudal máximo exactamente en esa zona, con alta resolución también.

Ya tenemos el modelo bastante validado entendemos bien cómo funciona, cuáles son las diferentes sensibilidades que tiene frente diferentes factores, porque es súper importante poder entender estas cosas. Como comentaban antes dentro de las estaciones que existen en la cuenca del Salado, si uno ve los años en que hay precipitación coinciden exactamente con años del niño. Entonces en uno de los temas relevantes y para eso estamos haciendo modelos que nos permiten presentar este tipo cosas.

Esta simulación que están viendo ahora es hacer pasar el mismo programa ahora es una simulación impermanente – es decir, modelando el hidrograma completo – en Chañaral pero con las condiciones actuales, con la brecha abierta ahora en la zona de la desembocadura y uno puede tratar de evaluar qué es lo que pasaría. En este caso no está infiltrando por que es la recesión del hidrograma pero después se empieza a secar en algunas zonas.

Hemos seguido tratando entender cuál es el impacto de tener algo similar en estas condiciones, según entiendo van a haber modificaciones adicionales que van a permitir mejorar las condiciones de riesgo en esta situaciones. Solamente quiero brevemente resumir las cosas que hemos hablado: esta es una tormenta que generó caudales que no se habían observado en el registro histórico y la concentración de sedimentos ocurre fundamentalmente por la alta disponibilidad de sedimentos que hay en la zona. Sin embargo esta disponibilidad de sedimento provino fundamentalmente del cauce o de la zonas del valle y no de las laderas, como uno lo podría haber pensado inicialmente, y la depositación.

Esto de seguro nos dio información sobre la evolución morfológica de Atacama, la hidrología y los potenciales riesgos que pueden amplificarse debido a factores antrópicos, obviamente que los relaves tuvieron un factor en la dinámica de lo que pasó en el flujo en esa zona.

Quería finalizar solamente con los desafíos futuros este tipo cosas no imponen lo que estamos viendo en CIGIDEN en el largo plazo: primero, que la planificación y el desarrollo urbano futuro requiere estudios de amenaza y riesgo. La gente necesita saber cuál es el riesgo al que están expuestos. La inundación también plantea nuevos desafíos de medición y monitoreo, si uno piensa bien, medir recursos hídricos no lo mismo que medir información hidrometeorológica para amenazas.

Especialmente en Chile tenemos tres factores que son súper relevantes y que influyen en esto. Primero, la topografía es súper compleja, las inundaciones de los ríos son súper rápidas, los ríos tienen alta pendiente. En segundo lugar tenemos alta concentración de sedimentos, flujos hiperconcentrados que cambian la dinámica, también hay que considerarlos. Y en tercer lugar es muy difícil medir, especialmente condiciones en topografía abrupta, en condiciones meteorológicas extremas, como las que tenemos nosotros, entonces tenemos que plantear esos desafíos y ver cómo solucionamos.

Más encima - no tengo ahora tiempo para explicarles - cada región es distinta la información que se necesita y cómo se puede medir. No lo es lo mismo el trabajo estamos haciendo, por ejemplo aquí en la Quebrada de Ramón en la zona central, comparado con lo que uno podría necesitar en el desierto de Atacama. Por eso es tan importante integrar la meteorología, la hidrología y la hidráulica para predecir la consecuencia estos eventos y tratar de desarrollarlos de forma sustentable. Muchas gracias por su atención.

Preguntas

Una pregunta muy rápida: ¿la simulación hidrodinámica la hicieron con SWMM o con otro modelo?

No, la hidrodinámica la hicimos según un modelo que desarrollamos nosotros. Lo que pasa es que cuando uno tiene información topográfica de alta resolución, tenemos curvas de nivel cada 50 cm, entonces tenemos discretizaciones que son súper detalladas, con varios millones de nodos en la discretización. Entonces desarrollamos un modelo que tiene la concentración acoplada y que está paralelizado, entonces podemos calcular relativamente rápido en computadores grandes, la evolución de la inundación

¿Y cuánto tiempo les dura una simulación?

Depende, porque hay varias cosas. Uno muchas veces, como hacemos también la discretización a mano hay veces que hacemos la simulación y vemos que en verdad no tenemos detalles en zonas que deberíamos tener detalles, porque pasan cosas y uno vuelve. Pero uno hiciera bien las cosas a la primera... una semana.

¿Y finalmente es estructurado o no estructurado la grilla del modelo?

Es de volumen finito no estructurados.

Nosotros trabajamos en algo similar y el primer problema que encontramos fue el problema de topografía, que obviamente uno va a tomar los datos después de este fenómeno entonces la topografía ha cambiado, y al modificar un poco la topografía, los resultados pueden cambiar radicalmente. La primera pregunta radica en eso, ¿cómo trabajaron ustedes ese tema? Segundo es el tema de la hidrología, ¿ustedes que problema encontraron para simular la hidrología? ¿Fue suficiente con la red de estaciones? ¿Qué vieron con respecto a la línea de nieve?

Voy a empezar con la parte hidrológica, porque se usó la información de las 5 estaciones que habían y los hietogramas, más la validación del modelo hidrológico que fue SWMM.

Gironás: Los registros del MOP y la acumulación en el embalse Lautaro mostraban que si uno asumía una cota de nieve entre 3600 y 3700 metros en Copiapó, el coeficiente de escorrentía para explicar el volumen acumulado era del orden del 2%. Si uno corre ahora en el Salado con 2% de escorrentía, los caudales eran tres veces menos a los que se midió. Si tu multiplicas por tres, de 2% a 6%, seguimos en un rango bajo. Si tú vas a la literatura, en ambientes hiperáridos hay desde 0% hasta 30%: es bastante impresionante la variabilidad.

Entonces no es que nosotros hayamos simulado un caudal de 1000 m³/s y nos juntamos con Cristián a celebrar, porque no. Si no que vimos que generó 1000 y nosotros tratamos de ver que significaba desde el punto de vista de la modelación

hidrológica, y significaba valores de “c” que estaban en un rango súper amplio, pero dentro del rango. Claramente nos demostró que nuestro conocimiento de los procesos de generación de escorrentía directa en cuencas hiperáridas es muy bajo, eso es lo que te puedo comentar desde el punto de vista hidrológico. Usamos la distribución espacial de la precipitación y la distribución temporal la estimamos más o menos con lo que se había estimado en Pastillo.

Escauriaza: Para responder la otra pregunta rápidamente, tienes razón, cuando uno tiene un lecho móvil y especialmente para esfuerzos de corte significativos uno puede tener para estos caudales, hasta 1 m de un flujo granular abajo que uno no sabe lo qué está pasando, es difícil, hay poco experimentos y teoría al respecto. En este caso tuvimos la suerte de que en esa zona en Chañaral aguas arriba era terreno bien consolidado que no se veía con cambios recientes, por lo menos en esa zona.

Pero tienes toda la razón, cuando uno ve crecidas más o menos grandes, uno básicamente lo que tiene en la primera parte un flujo granular que no solamente cambia el perfil de velocidades, sino que agrega más resistencia y pasan cosas que uno en realidad es difícil de medir en esas condiciones. Hay muy poca investigación porque cuando viene una gran inundación nadie se mete a ver lo que está pasando en el lecho.