

Figura 2 Estructura de Aplicación del Modelo Dinámico del Sistema Antrópico.

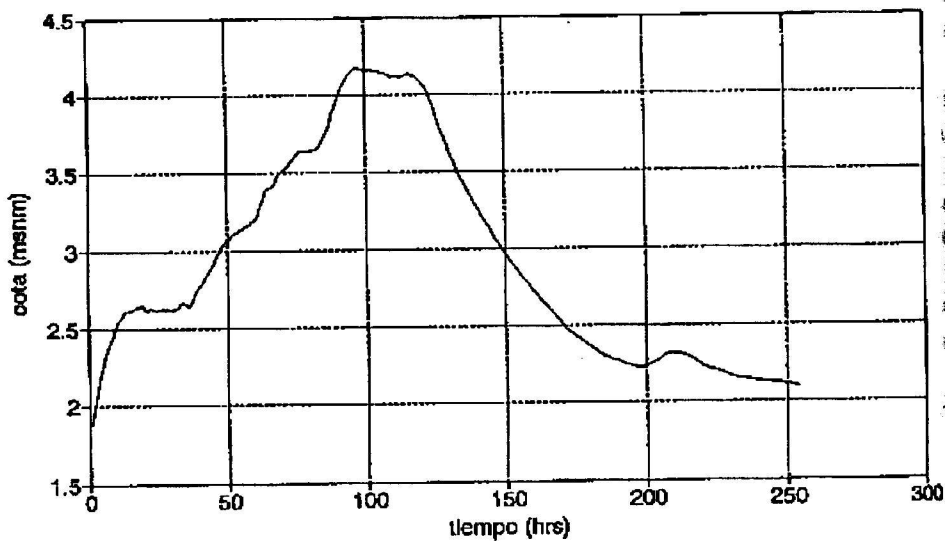


Figura 3 Crecida representativa utilizada para simulación



UN MODELO DINAMICO DEL SISTEMA ANTROPICO ANTE
DECISIONES DE ALERTA EN EVENTOS DE CRECIDA.
PLANTEAMIENTO CONCEPTUAL.

ANDREA NARDINI (1) ANDRES LOPEZ (2)
ANDREA RODRIGUEZ (3)

RESUMEN

En este artículo se entrega el planteamiento conceptual para el desarrollo de un modelo matemático dinámico del sistema antrópico potencialmente afectado por inundaciones fluviales. Este modelo servirá para ser implementado en un Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones para dar alertas de crecidas.

Se plantea modelar la dinámica de los sectores poblados (incluyendo las personas y sus bienes) a través de un sistema de estados finitos y, por lo tanto, como una «cadena de Markov» determinística con ingresos. Los estados posibles del sistema antrópico dependen de sus características

- (1) Ingeniero Civil, Centro EULA-Chile y Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción
- (2) Ingeniero Civil M. Cs., Centro EULA-Chile y Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción
- (3) Ingeniero Civil Informático, Centro EULA-Chile y Dpto. de Ingeniería Civil Informática, Universidad de

particulares, como la topografía y las medidas de emergencia posibles.

Con este modelo se puede simular el comportamiento del sistema antrópico, dada una política de gestión de alertas (o dada la secuencia de decisiones -medidas de emergencia- que se tomarían) dado un escenario para las variables no controlables (típicamente, una secuencia de hidrogramas de crecida).

A través de estas simulaciones es posible «probar» distintas políticas de gestión de alertas, o sea, evaluar un conjunto de indicadores de prestación (por ejemplo el número de «eventos no alertados» y el número de «falsas alertas») para compararlas, y luego elegir la de mejor comportamiento (política «óptima»). Este procedimiento permite asegurar la confiabilidad del Sistema de Alerta.

I.- INTRODUCCION

En este artículo (el tercero de una serie de cuatro en esta edición) se presenta el planteamiento de un modelo dinámico del sistema antrópico afectado por los eventos de crecida en el río Biobío (desde Hualqui a la Desembocadura). Esto se enmarca dentro del proyecto FONDECYT N° 1941033 que tiene como objetivo desarrollar un Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones (DSS, Decision Support System) [Guariso y Wethner, 1989] para dar alertas de crecidas (ver descripción general entregada por Nardini y López [1993]).

Como se ha mencionado en Nardini y López [1995], el aspecto clave que caracteriza a los sistemas de alerta es la **confiabilidad**. La manera quizás más racional y sistemática de verificarla es la siguiente: definir formalmente políticas de gestión de alertas (o sea, una regla que sugiera, en tiempo real, las decisiones a tomar en relación a posibles medidas de emergencia, en base a la información disponible); y «experimentar» su uso en eventos de crecida (históricos y/o sintéticos) para evaluar las políticas y elegir la «óptima». La evaluación mencionada se refiere a los daños que ocurrirían en el «sistema antrópico» al utilizar esa política o al número de "eventos no alertados" y de "falsas alertas".

Con el término «Sistema Antrópico» nos referimos tanto a «cosas materiales», como viviendas, industrias, infraestructura pública y privada (puentes, calles, sistemas de abastecimiento hídrico, alcantarillado, etc.), como a las personas presentes en el territorio potencialmente afectado por los eventos de crecida.

Para buscar una política de gestión de alertas «óptima» (ver Nardini y López [1993]) es necesario conocer el comportamiento dinámico del Sistema Antrópico en los eventos de crecida ante las decisiones de medidas de emergencia que esa política indique; además, este comportamiento del Sistema Antrópico debe ser sintetizado a través de índices que permitan evaluar los daños (evitables) que ocurrirían al implementar las decisiones proporcionadas por esa política y/o evaluar en forma resumida el desempeño en términos de «falsas alertas» y «eventos no alertados».

Para poder representar (simular) la dinámica del Sistema Antrópico es necesario definir un

conjunto adecuado de variables que constituya su estado. Además, es necesario definir las reglas (o sea la **función de transición de estado**) que determina, dado el estado en el instante t , cuál sería el nuevo estado en el instante siguiente $t+1$ como consecuencia de las decisiones tomadas y de la cota del río en el instante t . Estas reglas dependen, en parte, de la capacidad de reacción organizada de los individuos y del comportamiento de las instituciones para la protección civil.

Los índices de daño deben representar tanto daños objetivos monetizables (a los bienes materiales públicos y privados), como también daños no monetizables (al menos de manera no cuestionable; piénsese por ejemplo en las enfermedades producto de la inundación de las viviendas), y también daños subjetivos o «intangibles» (en particular las «molestias» por estar inundado, o por estar evacuado, etc.).

Los índices deben tener una estructura matemática que los relacione con la secuencia de decisiones tomadas y de estados asumidos por el Sistema Antrópico.

Su cuantificación se basa tanto en evaluaciones económicas, como en encuestas directas a las personas potencialmente afectadas.

También el sistema de transportes pertenece al Sistema Antrópico. Entre los índices de daño deben por lo tanto considerarse aspectos como: tiempos de viajes, demoras, consumo de combustible, etc. En principio, no sería posible separar el sistema de transporte del resto, porque mayores tiempos de viaje pueden implicar una permanencia más larga de la población en un sector inundado (y así mayores enfermedades y molestias, etc.), y, viceversa, la inundación de un sector (o directamente el cierre de un camino por precaución) puede implicar demoras adicionales en el resto del sistema vial. El estado antes definido debería por lo tanto incluir también todas las variables necesarias para determinar, dada la situación en el instante t , la nueva situación del sistema de transportes en el instante siguiente $t+1$.

Sin embargo, para el caso particular del río Biobío, considerado en el proyecto FONDECYT mencionado, es razonable tratar el sistema de transportes separado del Sistema Antrópico antes definido. En efecto: los sectores donde ocurren inundaciones no afectan mucho el tráfico, y éste no los afecta mucho. El punto clave del transporte es en cambio el de la seguridad del Puente Viejo: con niveles elevados del río el riesgo de colapso (y de pérdida de vidas humanas además de daños a los vehículos) es significativo, por lo tanto se toma la decisión de cerrarlo; sin embargo, el cierre del Puente Viejo sí afecta todo el sistema de transporte. Por lo tanto, la toma de la decisión «cerrar» el Puente es muy delicada (nótese que si la solución fuera darle prioridad absoluta a las vidas humanas, como podría parecer a primera vista, el puente debería estar permanentemente cerrado en los eventos de crecida, cosa que obviamente no es así).

Cabe aclarar que con estas reflexiones se quiere indicar correctamente el problema y no expresar juicios alarmistas sobre la situación del Puente Viejo. Además, es necesario señalar que hace sólo unos meses se ha ejecutado un proyecto de reforzamiento del Puente que, aunque no cambia los términos

del problema, sí disminuirá (significativamente) el riesgo. Este problema del riesgo de colapso y consecuente decisión de cierre ha sido abordado en el ámbito del proyecto FONDECYT ya mencionado; se espera publicar en el futuro próximo otro artículo para presentar el planteamiento adoptado, su desarrollo y los resultados obtenidos.

En resumen, en este artículo se presenta un modelo dinámico del Sistema Antrópico y la manera de implementarlo en un programa computacional. Con este modelo, dada una secuencia de decisiones (o dada una política de alerta), se pueden efectuar simulaciones en correspondencia con distintos escenarios de ingresos no controlables, en particular hidrogramas de crecidas. Cada simulación entrega la trayectoria del estado del sistema que, junto a la secuencia de decisiones, permite calcular el valor de los índices de daño. Con estos índices es entonces posible evaluar la «bondad» de la política (o de las decisiones) considerada.

En la revisión bibliográfica realizada, no se han encontrado planteamientos similares. El único trabajo parecido es el de Haimés *et al.* [1991], donde se modela el efecto de alertas sobre una población antrópica considerando la dinámica de respuesta de las personas frente a las falsas alertas. Aunque el intento es seguramente interesante, se trata de un aspecto particular dentro del enfoque general que se propone en el presente artículo; además, en el mencionado artículo se adopta un enfoque de tipo probabilístico que no es muy apto para ser integrado dentro de un DSS.

Otro antecedente que merece ser mencionado es el relativo al sistema de alerta del Danish Hydraulic Institute (DHI) [Pandyal, 1994] para Bangladesh. Este trabajo del DHI puede definir también un sistema de apoyo para la gestión de alertas de crecidas; sin embargo, no está dirigido a abordar el problema de la confiabilidad y a generar, para ello, políticas de alerta «óptimas» que sugieran decisiones a tomar. Las funciones que ese sistema desarrolla son básicamente la predicción de eventos hidrológicos y la representación de la dinámica de inundación a gran escala (que incluye todo Bangladesh, pero considera sólo variables hidráulicas). El modelo presentado en este artículo considera, al contrario, un área mucho más limitada, pero incluye, además de las hidráulicas, otras variables fundamentales para describir la dinámica del Sistema Antrópico. Sólo de esta forma es posible formalizar un modelo que represente la respuesta del Sistema Antrópico ante decisiones de medidas de emergencia y que permita efectuar los experimentos necesarios para evaluar sistemáticamente en términos de «costos y beneficios» (en sentido amplio) distintas políticas de alerta para luego elegir la «óptima».

A continuación se presenta el planteamiento conceptual de este modelo y algunas soluciones innovativas en relación a la forma de implementarlo computacionalmente.

II.- ENFOQUE DE MODELACION

El Sistema Antrópico puede ser representado como un sistema dinámico tiempo discreto (sobre este concepto véase por ejemplo el libro introductorio muy interesante y claro de Luenberger [1973]

cuya representación matemática general es:

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{f}_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t, \mathbf{w}_t) \quad (1)$$

donde (la siguiente descripción es sólo indicativa y por lo tanto carece de rigor formal):

- \mathbf{x}_t : es el vector de variables que constituyen el estado del sistema;
- \mathbf{u}_t : es el vector de ingresos controlables, o sea «decisiones»;
- \mathbf{w}_t : es el vector de ingresos no controlables, o sea que no se pueden decidir sino sólo asumir;
- $\mathbf{f}_t(\cdot, \cdot, \cdot)$: es la función (vectorial) de transición de estado.

Los términos anteriores se pueden especificar ulteriormente para el caso del Sistema Antrópico. Por simplicidad, en lo que sigue se hace referencia a un «sector» independiente (este término se define en forma precisa más adelante), o sea una parte del Sistema Antrópico topográficamente y antrópicamente homogénea e independiente de las demás partes. Además, según la situación específica, pueden darse variaciones (por ejemplo, algunos elementos no se encuentran activos, o bien otros, no mencionados aquí, lo están); sin embargo, se piensa que lo que sigue puede servir para clarificar las ideas aquí planteadas.

Para el Sistema Antrópico, entonces, el vector \mathbf{u}_t de los ingresos controlables está constituido por las siguientes decisiones correspondientes a medidas de emergencia: $\mathbf{u}_t \in \{\text{alertar, evacuar, construir, muro}\}$, con:

$U_t^* = S$: se da la orden de **alertar**; la gente residente en los sectores potencialmente anegados es avisada por radio y/o a través de personal encargado; saca gran parte de sus bienes muebles y los protege (por ejemplo llevándolos al segundo piso, a casas de parientes en otros lugares; etc.); se prepara para sellar en lo posible las viviendas; se prepara para eventualmente evacuar;

$U_t^* = N$: se da la orden de **des-alertar**; la gente vuelve a la situación de normalidad.

$U_t^* = S$: se da la orden de **evacuación organizada**; la Municipalidad, a través de sus organismos de Protección Civil, traslada a las personas con sus cosas. De esta forma, si ocurre la inundación del sector, se sufren daños mucho menores tanto respecto a los bienes muebles (trasladados y/o protegidos), como a la viviendas (selladas), y a las personas mismas (molestia directa, enfermedades).

Naturalmente, la evacuación es más efectiva y simple si hubo una alerta previa y, aún más, si se efectúa antes de la inundación. Es necesario, por lo tanto, un adelanto suficiente en la predicción y toma de la decisión.

$U_i^e = N$: se da la orden del **retorno** (por supuesto, después de haber dado la orden de evacuar)

$U_i^m = S$: se da la orden de **construcción de muros provisionarios**; se construyen barreras con sacos de arena (u otro material) para impedir el ingreso del río en los puntos críticos de las riberas en los sectores poblados. Estos «muros» modifican por lo tanto provisoriamente el sistema hidráulico. No se dejan en el lugar permanentemente por la casi certeza que, siendo material útil para otros fines, inevitablemente estarían sujetos a remoción (hurtos) y a deterioro (materiales no resistentes). Por otro lado, no se hacen muros definitivos (concreto, etc.) tanto por el costo, como porque durante la mayor parte del tiempo molestan al tránsito, la estética, etc. (esto último se da principalmente en zonas fuertemente urbanizadas -ciudades- en la ribera de los ríos).

$U_i^m = N$: se da la orden de **retiro de muros provisionarios**.

Como se puede notar, estas medidas no modifican el sistema hidrológico o el sistema hidráulico (a parte de los muros provisionales); sin embargo, pueden de todas maneras contribuir significativamente a reducir los daños.

El vector de ingresos no controlables w_i se reduce a la variable y_i cota del nivel de aguas del río frente al sector. Se recuerda (ver Nardini y López [1995]) que, al menos para ese modelo, una vez conocida esta magnitud en una sección (en particular la definida en el modelo de predicción ingreso-salida ARMAX), se puede asumir que se conoce en las demás secciones del tramo considerado, a través del eje hidráulico en régimen permanente.

El vector x_i de estado del Sistema Antrópico está constituido por las siguientes variables:

| | | |
|-------------|---|---------------------|
| $X_i^e = S$ | : | alertado |
| $X_i^e = N$ | : | no alertado |
| $X_i^e = S$ | : | evacuado |
| $X_i^e = N$ | : | no evacuado |
| $X_i^m = S$ | : | con muro provisorio |
| $X_i^m = N$ | : | sin muro provisorio |

$X_i^e = (X_i^e, X_i^i, \dots, X_i^{n-1})$: cota (discretizada) de la superficie libre de inundación (supuesta horizontal) del sector considerado (x_0 es la máxima cota de no inundación, o sea la cota mínima del terreno).

De esta definición se desprende que el número de posibles estados (igual al número de posibles combinaciones de valores de las 4 componentes) es finito. Además, muchas de las combinaciones no son factibles debido a restricciones lógicas en la secuencia de decisiones; por ejemplo, si en el instante t el sector está alertado y evacuado, es ilógico que al instante siguiente $t+1$ esté evacuado pero no alertado. Esto debe reflejarse en restricciones que se deben respetar en la definición de la política de gestión de alertas. Como consecuencia, el número de combinaciones de estados posibles a considerar es finito y menor que el conjunto de las combinaciones matemáticas.

Por otra parte, el paso de tiempo de este modelo, planteado para ser utilizado en tiempo real (ver Nardini y López [1993] y Nardini y López [1995]), es breve (típicamente una hora). Es por lo tanto evidente que es imposible pasar de un estado, por ejemplo, «no evacuado», al estado «evacuado» en un breve lapso de tiempo. La evacuación, como también la alerta, la construcción de un muro provisorio, etcétera, requieren de un intervalo de tiempo para llevarse a cabo. Es posible modelar este proceso con el esquema anterior: basta incluir entre las variables de estado nuevas variables que representen esta «demora»; por ejemplo, para el **proceso de evacuación** se introduce:

$X_i^e = (\Delta_e, \Delta_e - 1, \dots, 0, -1, -2, \dots, -\Delta_e)$: es el número de intervalos de tiempo (horas) que faltan para cumplir el proceso de evacuación (si es positivo), o para cumplir el retorno (si es negativo). El parámetro Δ_e representa el tiempo total de llevar a cabo la evacuación o el retorno.

Y para el **proceso de construcción del muro**:

$X_i^m = (\Delta_m, \Delta_m - 1, \dots, 0, -1, -2, \dots, -\Delta_m)$: es el número de intervalos de tiempo (horas), que faltan para completar la construcción del muro (si es positivo), o para retirarlo (si es negativo). El parámetro Δ_m representa el tiempo total de llevar a cabo la construcción o el retiro del muro.

Eventualmente, por supuesto, el tiempo de implementación de las medidas de alerta anteriores puede ser diferente al tiempo de volver al estado sin medida.

La función de transición $f_i(\cdot, \cdot, \cdot)$ describe el mecanismo de evolución de un estado a otro, tanto para la componente del estado relativa a la inundación, como para las más estrictamente antrópicas. Como se dijo esta función considera, de manera esquematizada, el comportamiento de los individuos de las instituciones competentes para la protección civil, además de los mecanismos físicos que gobiernan el proceso de inundación.

Siendo éste un sistema de estados finitos se puede describir como una **cadena de Markov con**

decisiones (véase cualquier texto de Investigación Operativa, o de nuevo Luenberger [1973]). Además, dado que la idea es hacer simulaciones bajo distintos escenarios hidrológicos (o secuencias de valores del ingreso no controlable «cota» y), de acuerdo a un planteamiento determinístico la cadena de Markov degenera en un **autómata con decisiones** cuya dinámica es definida por un conjunto de Matrices de Transición (una para cada valor del vector de decisiones).

En la Figura 1 (a y b) se muestra, a través de un grafo, un ejemplo de autómata para un sistema con 14 posibles estados. Notar que el número de estados es igual al número de círculos (combinaciones de valores de las componentes) en cualquiera de las Figuras 1a y 1b.

El estado de este sistema tiene sólo dos componentes: alertado (S) o no (N) y un atraso (con Δ_m pasos de tiempo). La decisión en este caso es alertar (Figura 1a), o des-alertar (Figura 1b).

Las definiciones anteriores valen para un sector independiente; el Sistema Antrópico real puede esquematizar como un conjunto de sectores que interactúan. Cada sector es una parte del Sistema Antrópico topográficamente y antrópicamente homogénea, caracterizada por sólo un vector de estado uno de decisiones y uno del ingreso no controlable del tipo antes definido. Desde el punto de vista hidráulico, cada sector puede suponerse como una «piscina» delimitada por un borde cuyo perfil topográfico es conocido. Es razonable definir *a priori*, en base a un análisis de terreno y de información aerofotogramétrica, el comportamiento hidráulico de cada «piscina»: dada la cota de agua en los sectores adyacentes (eventualmente igual a la del terreno si no están inundados), y en el sector considerado, y la topografía y forma del borde, es determinado el caudal entrante a la piscina (función de la diferencia de cota hídrica entre «afuera» y «adentro» del sector, de acuerdo a las leyes del hidráulica) y el que sale. Por lo tanto, gracias a la ecuación de continuidad (discretizada) se define la dinámica de inundación del sector.

En general, existen a lo largo del borde algunos **puntos críticos** que constituyen vías preferenciales para el agua; por lo tanto, la información básica es su cota y la forma de la ribera alrededor de ellos. Estos puntos críticos pueden verse modificados por ejemplo al construir un muro provisorio o como consecuencia de una nueva urbanización.

En definitiva, la dinámica de cada sector está gobernada por una ecuación análoga a la ec. (1) específica a ese sector, con una variante: debe incluir las variables de estado «cota de inundación» relativas a todos los sectores que están potencialmente conectados hidráulicamente con ese sector.

Un sector que no tiene una conexión hidráulica con otros se indica como **independiente**.

II.- FORMA DE IMPLEMENTACION

Por simplicidad en lo que sigue se hace referencia a un sector independiente y directamente afectado por la cota y_t del río.

Aunque conceptualmente el Sistema Antrópico se representa por una ecuación como la ec. (1), que el estado incluye todas las componentes listadas (con las variantes del caso específico), desde el punto de vista de la implementación es conveniente hacer una separación en: *i*) un módulo matemático que describe la dinámica puramente hidráulica de la cota de inundación en el sector (este se llama en lo que sigue **módulo de inundación**); y *ii*) un conjunto de reglas lógicas (llamado **módulo lógico**, representado por una tabla) que describe la dinámica del resto de las variables de estado.

Más aún, aunque desde el punto de vista formal el Sistema haya sido definido como de estados altos (autómata), y por lo tanto la cota de inundación sea una variable discreta, desde el punto de vista de la implementación resulta más natural y simple utilizar en el módulo de inundación una variable continua $z(t)$, cuya dinámica en tiempo continuo es gobernada por la ecuación de continuidad:

$$\dot{z}(t) = h(z, x_t^m, y_t) \quad (2a)$$

donde la función de transición tiempo continuo $h(\cdot, \cdot, \cdot)$ en general tiene la forma:

$$h(z, x_t^m, y_t) = \frac{1}{A_z} (Q_e(z - y_t, x_t^m) - Q_s(z)) \quad (2b)$$

donde:

- $A(z)$: área horizontal de la «piscina» a una altura z ;
- $Q_e(z - y_t, X_t^m)$: es el caudal de entrada función de la diferencia de nivel $z - y_t$ y de la existencia o no de un muro provisorio;
- $Q_s(z)$: es el caudal de salida, función de la cota de inundación z .

(En el caso de un sector no independiente, hay que introducir también la cotas de los sectores afectados).

Para calcular los daños es razonable, por otro lado, considerar sólo algunos umbrales de cota de inundación, precisamente aquellos en los cuales se tienen cambios significativos (por ejemplo, desde la cota del suelo de la casa hasta un metro de altura; desde un metro de altura hasta el primer piso; etc.). Lo que sigue, por simplicidad de notación, se confunden las clases de cotas (I_1, I_2, \dots, I_M), definidas por estos umbrales, con los valores asumidos por la componente hidráulica en la ec. (1), aunque en rigor no sean la misma cosa; es decir, se supone que cuando la cota de inundación $z(t)$ pertenece, por ejemplo, a la clase 2 (o sea: $z(t) \in I_2$) se tiene

$X_t^c = 2$; etc.

En definitiva, entonces, el módulo de inundación define la dinámica tiempo continua (mientras las demás son discretas) de la variable $z(t)$ "cota de inundación" que asume valores en un intervalo continuo; el nuevo valor $z(t+1)$ asumido en el instante $t+1$ se calcula a través de la ecuación de estado (ec. (2)) (discretizada en el tiempo para integrarla, a menos que sea lineal) donde pueden entrar algunas componentes de estado del módulo lógico (en particular la relativa al muro provisorio); el valor de $z(t+1)$ determina el de la variable discreta X^c , que representa la "componente de inundación" del estado; los índices de daño son sensibles a esta última variable (esto debe considerarse en la estructuración de los índices).

Se puede observar que, de esta forma, el Sistema Antrópico modelado ya no es formalmente un autómatas, y por lo tanto ya no se pueden aprovechar las propiedades estructurales de esta clase de sistemas. Sin embargo, siendo el fin hacer simulaciones (ver Nardini y López [1993]), esta limitación no es relevante.

El módulo lógico, que define la dinámica de de las variables no hidráulicas del estado x (variables discretas), se puede representar conceptualmente con un grafo del tipo de Figura 1 ya mostrada, porque es un sistema de estados finitos determinístico, una vez asignado un escenario para el ingreso no controlable y .

Sin embargo, desde el punto de vista de la implementación, conviene representar las reglas lógicas a través de una estructura distinta. En efecto, se tiene la exigencia de tener una estructura suficientemente flexible para poder eventualmente efectuar modificaciones. Más precisamente, se debe poder: *i*) modificar las condiciones de la transición (por ejemplo en consecuencia a una evolución del Sistema Antrópico: edificación de nuevas viviendas, cambios en la topografía, etc.); *ii*) agregar nuevas reglas de transición; *iii*) agregar nuevas componentes del estado y/o del vector de decisiones; y *iv*) utilizar la misma estructura general para todos los sectores identificados.

La forma adoptada es una «tabla de transición» (que, junto a la ec.(2), es totalmente equivalente a la función de transición $f(x', \cdot, \cdot)$ de la ec.(1)). Esta tabla debe contener la siguiente información: para cada estado posible (incluyendo la componente hidráulica discreta X^c , dado el vector de decisiones u , y la cota del río y , frente al sector, la tabla define cuál será el estado x_{t+1} (excluyendo la componente X^c , x_{t+1}) al instante siguiente.

Nótese que el módulo de inundación y el lógico están acoplados (véase Figura 2), como debe ser correctamente: la dinámica de $z(t)$ (ec. (2)) depende (de algunas componentes) del estado X^c , y viceversa, la de X^c depende de $z(t)$ porque el nuevo valor de la componente discreta X^c , depende de $z(t+1)$.

Como ya se dijo, el modelo del Sistema Antrópico es utilizado para hacer simulaciones. El input al modelo es: *i*) un escenario hidrológico, o sea una secuencia de valores del ingreso no controlable y del río y ($t=0,1,2, \dots T-1$); *ii*) una secuencia de decisiones u , ($t=0,1,2, \dots T-1$), o bien una política de gestión

de alertas.

El *output* es una trayectoria del estado global, o sea una secuencia de valores del vector X^c , ($t=0,1,2, \dots T-1$), donde X^c , es el conjunto de los estados relativos a los distintos sectores del Sistema Antrópico. Con éstos es posible calcular el valor de los índices de daño.

De esta forma, las consecuencias de una política de alerta (o de una secuencia de decisiones) sobre el Sistema Antrópico se pueden apreciar **visualmente** (el DSS representa dinámicamente la secuencia de estados en mapas y gráficos, destacando en cada instante, típicamente, los sectores alertados, o inundados con nivel de agua en la clase i -ésima; etc.) y **sintéticamente** (el DSS presenta los índices de daño en tablas, como por ejemplo: el valor económico de los daños a bienes muebles y viviendas; el costo de las medidas de emergencia planteadas; el número de horas bajo agua por un cierto sector; etc.).

IV.- CONCLUSIONES

Para poder encontrar una política de alerta óptima a ser utilizada en un DSS para la gestión de alertas, se ha planteado un modelo dinámico del Sistema Antrópico potencialmente afectado por el problema de las inundaciones. Este modelo permite efectuar simulaciones, una vez asignado un escenario hidrológico (hidrograma de crecida en una sección adecuada del río) y una secuencia de decisiones o una política de alerta. Cada simulación entrega una trayectoria de estado y , a través de ésta, es posible calcular un conjunto de índices que sintetizan los daños correspondientes y su desempeño.

El modelo es conceptualmente una cadena de Markov determinística con decisiones, o «autómata con decisiones». Su función de transición de estado puede por lo tanto ser representada a través de grafos y, matemáticamente, a través de Matrices de Transición.

En la implementación, sin embargo, se ha desviado de este esquema formal considerando la variable hidráulica «cota de inundación» como una variable continua. Por otro lado, la función de transición de las demás variables (acopladas con la variable hidráulica, pero discretas) ha sido representada a través de una tabla, en vez que un grafo o matrices, para obtener mayor flexibilidad.

En efecto, esto permite: a) modificar los valores de los parámetros que gobiernan las condiciones de transición (por ejemplo en consecuencia a una evolución del Sistema Antrópico: edificación de nuevas viviendas, cambios en la topografía; etc); b) agregar nuevas reglas de transición; c) incluir nuevas componentes del estado y/o nueva decisiones (medidas de emergencia); y d) es suficientemente general para ser directamente aplicable a cualquier sector, modificando adecuadamente, por supuesto, los valores de los parámetros. Además: e) permite reducir el número de casos (combinaciones de estados y decisiones) a considerar explícitamente, ya que es suficiente listar el conjunto de valores posibles de sólo las componentes del estado y , análogamente, de sólo las componentes del vector de

decisiones (cuando más de una componente de decisión está activa, basta re-leer en la tabla la fila correspondiente, re-actualizando la correspondiente componente del estado; esto es posible porque cada componente del vector de decisión afecta directamente sólo una componente del vector de estado).

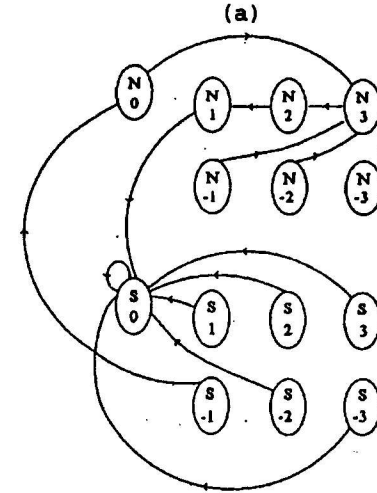
AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al FONDECYT que financia el proyecto N° 1941033 denominado «Diseño de un DSS para la Predicción y Alerta de Crecidas en Tiempo Real en el río Biobío, VIII Región», del cual es parte el trabajo presentado en este artículo.

Se destaca, además, que este artículo es el fruto de un trabajo a distancia inter-continental, que ha sido posible gracias a INTERNET, aunque la transferencia de archivos e informaciones no ha estado exenta de dificultades.

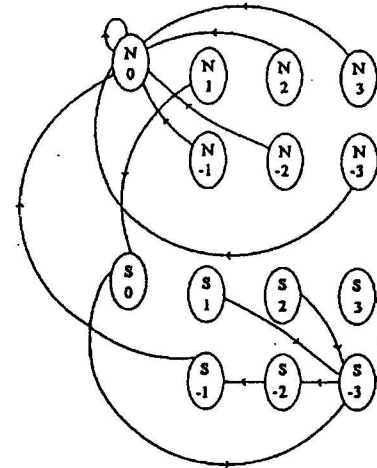
V.- BIBLIOGRAFIA

- 1) Guariso G. and Wethner H. (1989) Environmental Decision Support Systems. Ellis Horwood John Wiley, NY, USA.
- 2) Haines Y., D. Li y E.Z. Stakhiv (1991) Optimal Flood Warning Threshold and a Case Study in Milton, Pennsylvania. En Water Resources Engineering Risk Assesment, Ed. J. Ganoulis. NATO ASI Series, Vol. G29, Springer-Verlag.
- 3) Luenberger D.G. (1973) Introduction to Linear and Nonlinear Programming. Addison-Wesley, Reading, Mass.
- 4) Nardini A., A. López (1995) Planteamiento de un modelo Matemático para la predicción en tiempo real de crecidas en el río Biobío. Actas XII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.
- 5) Nardini A. y A.López (1993) Criterios de Diseño de un Sistema de Gestión de Alerta para la Protección contra Inundaciones Fluviales. Actas Terceras Jornadas CONAPHI, Manejo Integral de Cuencas. Valdivia, Chile.
- 6) Pandyal G. (1994) Bangladesh Flood Management Model: towards a Spatial Decision Support System. Journal of Hydrology.



Con $u_t^* = s$

(b)



Con $u_t^* = N$

Figura 1a) Grafo de la decisión de alertar y b) Grafo de la decisión de des-alertar

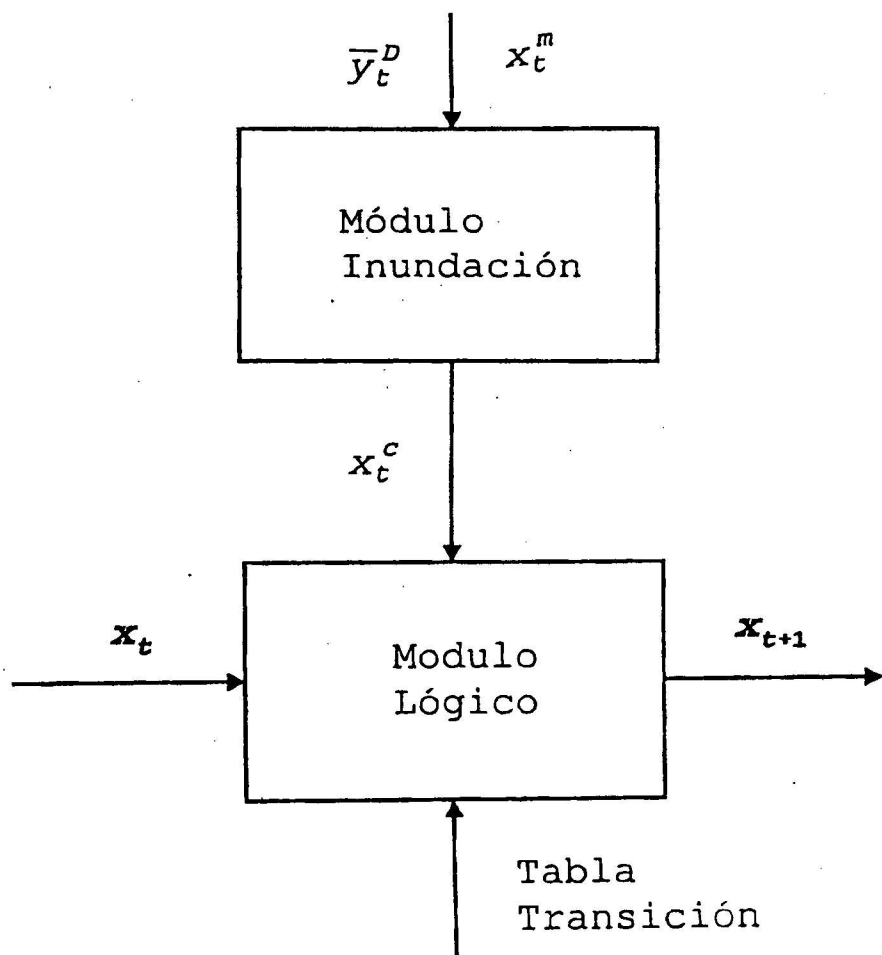


Figura 2 Estructura del Modelo Dinámico del Sistema Antrópico

PLANTEAMIENTO DE UN MODELO MATEMATICO PARA
LA PREDICCIÓN DE CRECIDAS EN TIEMPO REAL EN EL
RÍO BIOBIO

ANDREA NARDINI (1)
ANDRES LOPEZ (2)

RESUMEN

Este artículo es el primero de una serie de cuatro en que se describe la problemática abordada y parte de la actividad desarrollada dentro del proyecto FONDECYT N° 1941033 que tiene como objetivo desarrollar un Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones (DSS, Decision Support System) para dar alertas de crecidas.

Se entregan en este artículo las bases para desarrollar un modelo matemático de predicción de crecidas en tiempo real en un tramo de río.

Este modelo se compone de un modelo de predicción ingreso-salida conectado a un modelo

(1) Ingeniero Civil, Centro EULA-Chile y Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción

(2) Ingeniero Civil M. Cs., Centro EULA-Chile y Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción