

RESUMENES DE LAS TESIS DE MAGÍSTER

POSTGRADO EN APROVECHAMIENTO DE
RECURSOS HIDRAULICOS

FACULTAD DE MINAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
MEDELLIN

EQUILIBRIO EN PERFILES DE RIOS

Autor: Enrique Angel Sanint

Director: Oscar Mesa S

El concepto de equilibrio que se maneja en las ciencias físico-químicas se caracteriza por:

- Constancia en las condiciones de control,
- Balance perfecto entre tendencias opuestas,

pudiéndose citar el ejemplo del equilibrio entre la superficie de un líquido y el vapor que yace sobre ella. Lo interesante de anotar es que si bien a escala molecular y en períodos de tiempo del orden de magnitud de las interacciones moleculares, es posible que estas características no se den ni en el citado ejemplo del agua-vapor, --debida a la aleatoriedad intrínseca del movimiento Browniano, el equilibrio si existe cuando se habla de la escala molar y períodos del orden de segundos. Este salto de la molécula al mol o mejor aún, del enfoque entre sus escalas de tiempo relacionadas, es el correspondiente a pasar del "tiempo hidráulico" (días-semanas) a "tiempo gradado" (decenas-centenares de años) y es el necesario cuando se pretende estudiar el equilibrio de las corrientes naturales.

La Creciente a Sección Llena y el Problema de la Escala de Tiempos:

Para un punto dado de una corriente, el caudal es un proceso estocástico. Ante la imposibilidad de trabajar con las distribuciones completas, es cómodo tratar de caracterizar el caudal en ese punto por un solo parámetro. Cuál caudal es el más representativo? Si se tiene en mente el estudio del equilibrio lecho-flujo, se debe tomar aquel caudal que sea el principal encargado de la modelación del cauce, aquel que mayor cantidad de sedimento transporte en el largo plazo.

Se formula como hipótesis que cuando el interés está centrado en el trabajo geomorfológico, la distribución de caudales se puede representar por la descarga a sección llena (q_b), --que fluye llenando la sección transversal del río sin derramar sobre las llanuras de inundación-- con un período de retorno asociado T_r del orden de 2 años.

Al representar de este modo la distribución de caudales, se hace evidente un problema de tiempos, pues si se pretende modelar el transporte de sedimento sin modificar los tiempos del modelo, sería afirmar que por el río está fluyendo continuamente un caudal con un período de retorno de dos años. Para representar adecuadamente el fenómeno será necesario operar el modelo y corregir los tiempos para que estos se ajusten a la realidad. A partir de las curvas de duración de caudales sólidos y líquidos es posible estimar un factor de corrección (Ω) que permite hacer esta equivalencia entre tiempos de modelo y reales.

Formulación del Modelo:

Se representan los fenómenos:

- Continuidad de masa para el sedimento
- Continuidad de masa y momento para el agua
- Retardo del flujo por efecto de la fricción
- Transporte de sedimento
- Disminución del tamaño medio del sedimento en la dirección aguas abajo
- Efecto en la fricción del tamaño del sedimento y la profundidad hidráulica.

Para el estado de equilibrio se obtiene una expresión algebraica que permite estimar la pendiente como una función de los parámetros del flujo y del sedimento, igualmente permite avanzar conclusiones referentes a la concavidad de los perfiles.

igualmente permite avanzar conclusiones referentes a la concavidad de los perfiles.

Para estados transitorios se desarrolla el programa "PERFIL" que utiliza un esquema de diferencias finitas.

Conclusiones:

El sistema lecho-flujo, representado por las ecuaciones de continuidad de agua y sedimento, la aproximación de onda cinemática a la ecuación de momento y la relación de transporte de Einstein-Graf, es un sistema estable con un único punto de equilibrio.

El sistema lecho-flujo, al ser alejado de su posición de equilibrio, retorna a ella de manera asintótica, siguiendo una forma exponencial.

Partiendo de ecuaciones de la mecánica clásica y algunas relaciones empíricas desarrolladas para condiciones de escalas de tiempo y longitud de los órdenes de magnitud de segundos y metros, se llegan a aproximar o a validar relaciones empíricas desarrolladas para escalas de tiempo y longitud de órdenes de magnitud de años a decenas de años y kilómetros respectivamente.

Se obtiene una expresión analítica para la forma del perfil de equilibrio como función del caudal, ancho del canal y características del sedimento.

Se introduce el uso de la creciente a sección llena como parámetro principal en la caracterización del régimen de caudales, dadas sus implicaciones en el transporte de sedimento a largo plazo.

Se plantea una metodología para calcular el factor de escala de tiempos (Ω) con el que se pueden convertir tiempos de modelo en tiempos reales.

Se muestran casos tanto analíticos como numéricos en los que se observan perfiles cóncavos o concavo-convexos, en condiciones de equilibrio y en ausencia de controles geológicos.

Se desarrolla el programa "PERFIL" que permite la integración numérica del perfil de equilibrio cuando la presencia de discontinuidades en las condiciones de control la hacen analíticamente tediosa, permite además el cálculo de tiempos de retorno al equilibrio.

ANALISIS DE LAS TERRAZAS ALUVIALES DEL RIO CAUCA PRODUCIDAS POR EL DESLIZAMIENTO EL GUASIMO CERCA A SANTA FE DE ANTIOQUIA.

Autor : Alfonso Arrieta Pastrana.

Director : Michel Hermelín.

En el departamento de Antioquia se están estudiando varios proyectos hidroeléctricos (Ituango y Cañafisto) que consideran la construcción de embalses sobre el Río Cauca. Para el estudio de estos proyectos una de las mayores limitaciones es la escasez de información hidrológica. Adicionalmente, en la zona de Santa Fé de Antioquia y en las inmediaciones de los proyectos se encuentran tres terrazas : Obregón (3100 B.P.), San Nicolás (1500 B.P.) y Olaya (800 B.P.); sobre cuya formación se tiene la hipótesis de que son el resultado del represamiento del Río por el deslizamiento del Guásimo.

En este estudio se utilizó el análisis de las secuencias estratigráficas en la terraza de Olaya, como una alternativa para afrontar el problema de información escasa en hidrología e hidráulica fluvial, obteniéndose los siguientes resultados:

- Se encontraron evidencias que refuerzan la hipótesis sobre la formación de la terraza a causa del Río Cauca por el deslizamiento el Guásimo.

- Se encontró la asociación de láminas de materia orgánica a varios estratos de limos y arcillas que definen un período de tiempo de un año, dentro del cual se encuentran cambios en la secuencia de material que pueden corresponder a variaciones en la intensidad del flujo. Aunque no existe un número de estratos homogéneo para todos los períodos, en los estratos inferiores se observa la tendencia a presentar de cuatro a seis tipos de material, lo que implicaría que cada estrato se formó en un intervalo de tiempo comprendido entre dos o tres meses.

- A partir de la información de la columna estratigráfica y de la suposición de caudales en el Río del mismo orden de magnitud que los actuales, se puede estimar una concentración del material en suspensión entre 0.1 y 2.4 kg/m³, similar a la obtenida por el HIMAT en la estación Cañafisto.

Por tanto, se estima que la carga total de sedimentos transportada por el Río Cauca es de 82 millones de toneladas al año, lo que correspondería a una tasa de denudación media anual en la cuenca de 0.8 mm/año.

Lo anterior conduce a un estimativo del tiempo de colmatación del embalse formado por el deslizamiento el Guásimo de 15 años.

Este trabajo presenta una metodología útil para la estimación del período de colmatación de embalses.

EVALUACION DE LA CONTAMINACION DEL ACUIFERO COMPRENDIDO ENTRE LOS RIOS PARRAGA Y AMAIME EN EL VALLE DEL CAUCA

Autor: Marina Barrera C.

Director: María Victoria Vélez O.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la contaminación del acuífero ubicado en el Valle del Cauca, entre los ríos Párraga y Amaime. Se pretende hacer un análisis de la información relacionada con las características del agua del acuífero, con el fin de detectar posibles contaminantes, su origen, las áreas donde se manifiestan; dar algunas explicaciones relacionadas especialmente con el aspecto geológico y dar recomendaciones para evitar problemas en el futuro, y hacer un mejor manejo del recurso hídrico.

Desafortunadamente, la falta de información obligó a restringir un poco el objetivo, y a reorientar los métodos de análisis: la posibilidad de trazar una historia fina del acuífero se disolvió, y hubo que conformarse con describir tendencias de comportamiento muy globales; y el análisis se tornó primordialmente de índole físico-químico, perdiendo algunos apoyos claves que pudiera haberle brindado la buena información, con consecuencias históricas suficientes, con líneas de pozos y aljibes bien seleccionadas para fines hidráulicos, geológicos, estadísticos.

No obstante la físico-química rindió sus frutos, la descripción que aquí se ofrece del acuífero estudiado es bastante precisa porque recoge toda la información consistente sobre calidades del agua del acuífero, y permite diagnosticar las zonas problemáticas del valle para consumo de las aguas extraída de pozos y aljibes, lo que -al fin y al cabo- era el propósito inicial de la investigación. De paso, pudo encontrarse la traza de dos zonas subsuperficiales, que alteran la evolución de las aguas del acuífero. Una de ellas, un manto especialmente arcilloso que ejerce su poder adsorativo sobre los iones disueltos, el cual concuerda con la

"unidad B", indicada por Alvarez y Tenjo (1971) con base en el análisis estratigráficas del valle. La otra denominada "zona de cambio" donde se presenta claramente un cambio en la composición mineralógica del material del acuífero, y que al parecer se debe al aporte de un depósito sedimentario localizado en la cordillera occidental. Se corroboraron las caracterizaciones globales de las aguas subterráneas hechas por los investigadores de la C.V.C., con uno que otro aporte a la interpretación de los datos. En resumen, se logró lo buscado, pero dando un rodeo, por razones estratégicas, y aproximándose al objetivo sólo de una manera indirecta y paulatina.

El primer capítulo presenta una introducción sobre el manejo del recurso subterráneo, y sobre los conceptos de calidad y contaminación. En el segundo se incluye la metodología seguida en la realización del estudio, y algo sobre las normas de calidad establecidas por el Ministerio de Salud. Luego el capítulo tercero recoge la información geológica, hidrológica, físico-química sobre el acuífero. Presentan los fundamentos teóricos relacionados con los constituyentes químicos del agua y su evolución, con base en los cuales se analiza esa información, en los capítulos cuarto y quinto. Finalmente se hace la evaluación de los datos con parámetros físico-químicos, bacteriológicos, geológicos, litológico, en los capítulos sexto y séptimo, para producir criterios ciertos sobre la calidad y contaminación de las aguas, y sobre la evolución reciente del acuífero vallecaucano. Mapas, cortes, tablas diversas resumen la información más valiosa.

ESTUDIO DETALLADO SOBRE DISEÑO DE REDES DE MEDICION DE LLUVIAS.

Autora: Leonor Cecilia Cortes Badillo

Director: Ricardo Smith Q

Este trabajo tiene como propósito hacer una breve revisión bibliográfica acerca de algunas de las metodologías usadas para el diseño de redes de medición de lluvias, y aplicar dos de ellas a una región del departamento de Antioquia.

Las metodologías encontradas son:

- La técnica de ajuste local
- La técnica de Kriging

- El análisis espectral
- La técnica de las componentes principales
- El modelo lluvia-escurrimiento
- Los modelos de teoría de decisiones
- Las técnicas de estimación de la lluvia promedio sobre un área.

De todas las anteriores se estudiaron y aplicaron la técnica de ajuste local y la de las componentes principales. Estas metodologías se escogieron ya que ambas son métodos relativamente sencillos y la información que requieren es factible de conseguir en nuestro medio. Por otra parte es uno de los primeros trabajos que se ocupan de este tema en nuestro medio y con el se pretende obtener una idea de las ventajas que trae evaluar una red de medidores de lluvia.

La técnica de ajuste local se basa en la interpolación de la lluvia en un punto dado, como el promedio ponderado de los valores conocidos; los factores de ponderación se estiman con base en la función de correlación espacial y la distribución de las estaciones. Con base en el promedio del cuadrado del error de los estimados se toman decisiones acerca de la ubicación de las estaciones, haciéndolos pequeños de acuerdo a las necesidades de los usuarios en cuanto a calidad de información.

La técnica de las componentes principales está orientada a la búsqueda de la tipología tanto del fenómeno físico como de los datos, y consiste en transformar una matriz de datos (X_{pn}) con p estaciones y n años de registro, en otra matriz (Z_{pn}), cuyos elementos se obtienen de aplicar a la matriz (X_{pn}) p relaciones lineales, los coeficientes de las cuales son las coordenadas de los vectores propios de la matriz de coeficientes de correlación calculados en la matriz original. Los coeficientes de las p relaciones lineales o componentes principales se analizan en el dominio del espacio, con el fin de evaluar la red; por medio de las elipses de proximidad, de mapas y gráficos donde se relaciona el fenómeno con otros parámetros físicos y por medio de gráficos entre componentes principales buscando encontrar una tipología de los datos.

Las metodologías de técnica de ajuste local y análisis de las componentes principales, se aplicaron a la red existente en la zona de jurisdicción de CORNARE, o sea, el Oriente Antioqueño. La zona cuenta con 25 municipios y 52 estaciones de registros de lluvias.

Las metodologías de técnica de ajuste local y análisis de las componentes principales, se aplicaron a la red existente en la zona de jurisdicción de CORNARE, o

sea, el Oriente Antioqueño. La zona cuenta con 25 municipios y 52 estaciones de registros de lluvias.

Para la aplicación de la metodología de las componentes principales se escogieron 35 estaciones. Por este método se recomienda una red de medidores de lluvia de 22 estaciones, con doce estaciones existentes y cinco estaciones nuevas.

Para la técnica de ajuste local se trabajó con 42 estaciones y los registros de los totales anuales de la precipitación. Por este método la recomendación general es densificar más toda el área, es decir, colocar aún más estaciones de las 42 existentes. La estructura de la lluvia en la región, para el caso de los totales anuales, no se puede representar bien, mediante una función de correlación basándose en los datos existentes, por lo que la metodología recomienda una densificación de la red.

O sea que la técnica de ajuste local requiere un alto grado de homogeneidad, para representar bien el fenómeno de la precipitación, por medio de la estructura de correlación de la lluvia mediante la función de correlación. Es por esta razón que se obtienen resultados diferentes por las dos metodologías usadas.

MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS BAJO CRITERIOS MULTIOBJETIVOS.

Autor: José Eusebio De la Hoz de Castro

Directores: Ricardo A. Smith, Lilian Posada G.

En los últimos años, la cuenca hidrográfica ha adquirido una gran importancia como unidad de planeamiento, pues en ella se tienden a formar sistemas físico-bióticos y económico-sociales relativamente coherentes, por ello con la planificación integrada se busca incluir, además de los recursos agua y suelo, otros aspectos de planificación socio-económica y regional.

En general, no existe una solución estándar a los problemas de manejo en las cuencas hidrográficas; se precisa de una visión integral de los problemas, que incorpore todos los factores de interés para el funcionamiento de la cuenca. Por esta razón, el planificador de cuencas deberá evaluar cuidadosamente distintas alternativas, desde el punto de vista técnico, económico y social, es decir, dentro de un contexto de múltiples objetivos.

El propósito de este trabajo es el de ilustrar el uso de algunas de las técnicas de Análisis Multiobjetivo para la comparación de alternativas, y no el de sugerir la escogencia de alguna alternativa en particular. Esto último, es de competencia de los entes decisores.

Las técnicas sugeridas se utilizaron para comparar y evaluar alternativas de manejo integral de la Microcuenca La Quebrada La Bolsa, en el Oriente Antioqueño. En este estudio se analizaron 7 alternativas de manejo para producir un completo ordenamiento de las mismas, mediante el uso de los métodos ELECTRE II y Promedios Ponderados. Estos métodos son particularmente adecuados para aquellos problemas de planeamiento de cuencas en donde el número de alternativas a considerar es discreto, y en donde las alternativas deben ser evaluadas en términos de criterios cualitativos y cuantitativos.

La planificación del Manejo Integral de Cuencas mediante el Análisis Multiobjetivo, representa un enfoque innovador con relación a las metodologías utilizadas hasta el momento, en las cuales se escoge la alternativa de manejo enfocándola respecto a un sólo criterio, por lo general económico. En el Análisis Multiobjetivo se escoge entre diferentes alternativas de manejo, aquel o aquellos planes que sean satisfactorios, considerando objetivos de naturaleza diversa tales como económicos, sociales, ecológicos, conservacionistas, entre otros; de manera tal que el plan adoptado sea integral, y que armonice objetivos tan disímiles y en ocasiones en franco conflicto entre sí, teniendo en cuenta la estructura de preferencias de los entes decisores con respecto a las metas deseadas.

Para una adecuada utilización de las metodologías propuestas, es necesario ser cuidadoso al evaluar los criterios de comparación de alternativas, pues realmente no existe un patrón que indique qué ponderación debe asignarse a cada criterio; por lo general, ésta evaluación es subjetiva y depende de la estructura de preferencias del decisor.

DETERMINACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD EROSIVA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SANTA ISABEL.

Autor: Jaime Danilo Duque Martínez

Director: Alvaro Salazar

La quebrada Santa Isabel drena directamente sus aguas al embalse Troneras ubicado sobre el río Guadalupe. La cuenca de la quebrada sufre un proceso de erosión acelerado y de sedimentación, presentándose: un levantamiento gradual del lecho de la quebrada, elevación del nivel freático, inundaciones, retención de aguas servidas, deterioro en la infraestructura, ambiente y paisaje en los alrededores cercanos de la zona urbana del municipio de Carolina del Príncipe. En este estudio se aplica una metodología para evaluar cualitativamente la susceptibilidad relativa a la erosión de la cuenca de esta quebrada.

Se utilizaron, principalmente, planos topográficos de la zona de estudio en escala 1:10.000 y fotografías aéreas en escala aproximada 1:28.000 tomadas en 1983. La metodología aplicada incluye consideraciones geomorfológicas e hidrológicas propias de la cuenca.

Se definieron los factores del suelo y el clima que caracterizan la erosión en la cuenca, a saber: la geología, el suelo, la cobertura vegetal, la precipitación y la pendiente. Para cada factor se elaboró por medio de fotointerpretación y reconocimiento de campo un mapa temático en escala 1:10.000. Este incluye la clasificación específica de los distintos estados de cada factor presentes en la cuenca y su clasificación relativa asignada con base en su capacidad de posibilitar o impedir la erosión del suelo. La cuenca se subdividió en cuadrículas de 100 x 100 metros cuadrados. Cada cuadrícula se identificó con sus coordenadas geográficas y se determinó la distribución porcentual de los estados de cada factor. Finalmente, por ensayo y error, se procedió a calibrar tanto los coeficientes de contribución de cada uno de los factores incluidos como los intervalos asociados al grado de erosión, de tal forma que reprodujeran el estado de erosión relativa presente en la cuenca.

Los coeficientes de contribución obtenidos para describir el estado de erosión relativa son:

$$\begin{aligned} \text{Erosión relativa} = & 0,27 * (\text{suelo, geología}) \\ & + 0,51 * (\text{cobertura vegetal}) \\ & + 0,05 * (\text{lluvia}) + 0,17 * (\text{pendiente}) \end{aligned}$$

La metodología permite definir la erosión relativa de la cuenca y la contribución porcentual de cada uno de los factores relacionados. Permite también evaluar el beneficio, desde el punto de vista de la erosión relativa, de posibles cambios en los factores y particularmente en la cobertura vegetal.

PREDICCIÓN DE NIVELES FREÁTICOS A PARTIR DE LA PRECIPITACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES. CASO DE APLICACIÓN: MESETA DE BUCARAMANGA

Autor: Sully Gómez Isidro

Director: María Victoria Vélez O.

La llamada Meseta de Bucaramanga, conformada por Depósitos Aluviales ha sido tradicionalmente afectada por grandes movimientos de tierra originados en su mayor parte por la presencia de aguas subterráneas. Ante la ocurrencia de estos movimientos y a partir de la información disponible, se relacionaron los eventos de lluvias, ascensos de niveles freáticos y deslizamientos, con el fin de obtener ciertos parámetros que permitan conocer cuales son los eventos de precipitación causantes de deslizamientos, en que tiempo es posible su ocurrencia y cuales son las zonas más críticas.

Se encontró que la mayor parte de los deslizamientos ocurren en épocas de verano, un mes después de los ascensos de los niveles freáticos y dos o tres meses después de las épocas de mayor lluvia. Los movimientos se encontraron asociados principalmente a épocas de inviernos prolongados que constituyen más del 49% de la precipitación anual. A partir del análisis de las variaciones de los niveles freáticos se determinaron los sectores de la ciudad que presentan mayor riesgo a los movimientos.

El reconocimiento cuantitativo de estos fenómenos se realizó a través de la aplicación de un modelo matemático de aguas subterráneas que permitió: Evaluar el efecto que producen los mecanismos externos sobre el comportamiento de los niveles freáticos y determinar sus características generales. Como complemento al problema de estabilidad de taludes, se logró inferir las diferentes salidas medias que tiene el acuífero en los sectores de las escarpas y medir la sensibilidad de las obras de drenaje construídas para el control de la estabilidad.

Las permeabilidades hidráulicas obtenidas en la aplicación del modelo son valores propios de la calibración y ofrecen una idea sobre las magnitudes relativas de este parámetro en el acuífero superior de la Meseta de Bucaramanga. Se pudo además ampliar el rango de valores de la permeabilidad respecto a valores obtenidos en otros estudios.

El modelamiento permitió observar la tendencia general del comportamiento de los niveles freáticos, y concluir en forma general sobre la influencia que presentan los efectos externos o recargas sobre las formaciones acuíferas, sin embargo este modelo no debe tomarse como definitivo, puesto que debe ser mejorado en el futuro en la medida en que se cuente con mayor información geológica e hidrológica, lo cual permitirá obtener respuestas más detalladas en el comportamiento de dichos niveles.

FORMULACIÓN DE UN MODELO DENDROCLIMATOLÓGICO PARA DOS CUENCAS DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO.

Autor: Luis Fernando Hoyos Osorio

Director: Oscar J. Mesa

El objeto de este trabajo es evaluar en nuestro medio ambiente tropical un nuevo método de cuantificación de recursos hídricos: la dendroclimatología y la dendrohidrología, de gran utilización en países ubicados en las zonas templadas de la tierra. La dendroclimatología nace como una respuesta a la inquietud de muchos investigadores que desearon conocer las interrelaciones entre los anillos de crecimiento de los árboles y los fenómenos climáticos como precipitación, radiación solar, temperatura, evaporación, contenido de humedad del aire, así mismo las interacciones de estos anillos y la escorrentía.

Para cumplir con los objetivos se tratará de establecer un modelo matemático basado en el análisis de regresión múltiple que relacione los fenómenos climáticos y los anillos de crecimiento de dos especies forestales como el pino patula, como especie foránea, y el roble como especie nativa, en dos cuencas del oriente antioqueño: la quebrada Piedras Blancas y el río Guadalupe.

La importancia del trabajo radica en que regiones del país con enormes recursos hídricos, ven disminuídas sus

posibilidades de desarrollo debido a la escasez de información hidrológica, encareciendo los proyectos dada la necesidad de estudios adicionales, a sabiendas de la disponibilidad de un indicador biológico de la historia climática como son los anillos de crecimiento de los árboles; método que ha sido utilizado con éxito en países de climas templados y que aun no ha sido lo suficientemente investigado en el trópico.

Las siguientes son las conclusiones emanadas del trabajo:

-De las dos especies investigadas, el roble es la especie que más se aproxima a los objetivos del trabajo de investigación, cual era la de formular un modelo dendroclimatológico con fines de reconstrucción de registros hidroclimatológicos. El pino patula no proporciona resultados adecuados.

-Si bien se obtuvieron resultados aceptables cuando se operó la función de transferencia para la especie roble, o sea la función donde los espesores de anillos actúan como variables dependientes, también es cierto que los modelos hallados deben investigarse más para ser utilizados ampliamente en la práctica, pues no ofrecen todavía la confiabilidad necesaria en el desarrollo de proyectos de recursos hídricos, si se tiene en cuenta sus costos y los usos y propósitos para los cuales son construídos.

-Al parecer la función de transferencia opera indistintamente para la variable precipitación como para la variable caudal, ya que el coeficiente multivariado obtenido en ambos casos es aproximadamente el mismo.

A pesar de haber trabajado sólo con las variables hidroclimáticas precipitación y caudal anual, se trató de introducir a los modelos las variables evapotranspiración, brillo solar, temperatura y correlacionarla con los espesores de anillos. Esto no fue posible ya que la información en lo que se refiere a evaporación para las cuencas es poca, como puede verse en el Anexo 12.

-Los modelos dendroclimatológicos acá tratados, aun son modelos muy incompletos, si tenemos en cuenta las muchas variables que pueden intervenir en un modelo de este tipo tal como se indica en el capítulo de Revisión de Literatura.

-En cuanto a los métodos de regresión múltiple, con y sin vectores propios propuestos por Fritts (1976) los resultados indican que la regresión múltiple con vectores propios no muestra más resultados que la regresión

múltiple sin vectores propios, lo cual puede verse para un mismo modelo cuando se compara el resultado del coeficiente multivariado.

-Se corrobora lo expuesto por otros investigadores en lo que tiene que ver con la dificultad para identificar y posterior datación de los espesores de anillos de crecimiento en especies tropicales como las utilizadas en este trabajo.

-Se seleccionan como modelos con posibilidades de aplicación en nuestro medio los modelos PB-6 y PB-7, aunque todavía no ofrecen la confiabilidad necesaria, si tenemos en cuenta los valores obtenidos para el coeficiente multivariado de 0.656 y 0.688.

-Si bien en los modelos PB-6 y PB-7 se tiene como variable dependiente el caudal y la precipitación rezagados un período, lo cual no es representativo, debido tal vez a los problemas asociados con la lectura e identificación de los anillos, los mismos pueden cambiarse por una forma equivalente, así:

PB-6: $Q_t = f(EAR_t, EAR_t + 1)$

pb-7: $PPT_t = f(EAR_t, EAR_t + 1)$

-Los modelos dendroclimatológicos hallados en este trabajo, tienen su aplicación práctica en la reconstrucción de registros hidroclimatológicos. Nunca será posible utilizarlos como modelos predictores. De ahí la definición que se hace de la dendroclimatología.

-Se recomienda continuar la investigación de este tipo de modelos, teniendo en cuenta eso si de refinar el método de conteo y datación de anillos de crecimiento y vinculado otro tipo de variables como pueden ser contenido de humedad del suelo, evapotranspiración entre las más opcionadas y claro está otras especies forestales.

REPRESENTACION FUNCIONAL Y MEDIDA DE LA LINEALIDAD DE SISTEMAS LLUVIA-ESCORRENTIA.

Autor: Luis Fernando López F.

Director: Lilian Posada G.

Se utiliza en el presente trabajo la representación de la relación lluvia-escorrentía mediante series de funcionales

hasta el segundo término y se simplifican los métodos matemáticos que se usan en la solución del problema de identificación de las funciones Kernel de primer y segundo orden.

Se emplea un método de búsqueda sin restricciones de continuidad y sin la noción de gradiente.

Se construye además una forma de medición del grado de no linealidad del conjunto de eventos de lluvia-escorrentía usados.

El modelo construido encuentra los Kernels óptimos para un conjunto de eventos de lluvia-escorrentía simultáneamente.

APROXIMACION AL PLANEAMIENTO REGIONAL UTILIZANDO PROGRAMACION ENTERA MIXTA

Autor: José Francisco Manjarrés I.

Directores: Darío Valencia R., Ricardo Smith Q.

La tarea de seleccionar, de entre un gran número de proyectos inversión, aquel grupo de proyectos que produzcan la máxima utilidad social, es un problema demasiado complejo como para que los planificadores del desarrollo regional intenten resolverlo sin la ayuda de procedimientos formales de análisis.

Esta situación ha llevado a que los entes decisorios presten una mayor atención a la utilización de métodos cuantitativos como instrumentos de ayuda al proceso de decisión, en espera que los resultados obtenidos con la aplicación de tales métodos permita el aceptar o rechazar proyectos, señalando prioridades de inversión, sobre la base de indicadores que revelen las contribuciones de éstos a los objetivos sociales y económicos.

En el presente trabajo se propone un modelo de optimización con base en la Programación Entera Mixta, aplicado a la región del Oriente Antioqueño. Se espera que este modelo se convierta en una herramienta de análisis que contribuya a la toma de decisiones más racionales para la asignación de recursos económicos, en los planes de inversión que CORNARE desee implementar en el área de su jurisdicción.

La metodología del trabajo realizado ha sido la siguiente. En primer lugar, se efectuó una revisión de

los conceptos básicos de planificación, y sobre las técnicas de programación matemática utilizadas en los problemas de asignación de recursos. En segundo lugar, se presenta una breve descripción de la región escogida para la aplicación de la metodología propuesta, y del problema al que se enfrenta la Corporación en el ejercicio de sus facultades legales, haciendo énfasis en las inversiones requeridas en el sector de electrificación rural. En tercer lugar, se analizan los proyectos identificados y se establecen las contribuciones de los mismos en cuanto a viviendas atendidas, e incrementos en la cobertura regional y municipal.

Por último, se hace la aplicación del modelo matemático propuesto para la resolución del problema, a fin de encontrar la "ruta de expansión óptima" de los recursos económicos de la Corporación, en el sector específico que se estudia, haciendo una comparación entre diferentes estrategias de inversión. El modelo matemático propuesto se aplica a dos formulaciones diferentes, que se supone representan sendos deseos del decisor, a fin de articular las preferencias de éste, y establecer relaciones de intercambio entre los objetivos.

Los resultados obtenidos establecen el secuenciamiento e itinerario de implementación de los proyectos de electrificación rural, en veredas y municipios del área estudiada, y le permiten establecer al decisor que tanto debe sacrificar en el objetivo de máxima cobertura regional, para lograr un cierto nivel de equidad regional en la prestación del servicio y asegurar su presencia política en los municipios del área.

Así mismo, los resultados muestran la flexibilidad de la metodología para acomodarse a circunstancias en el tiempo, como son cambios en las limitaciones presupuestales, cambios en los costos y beneficios esperados de los proyectos, e indican como es posible jugar con la información disponible, planteando diversas estrategias de inversión, de manera que la solución que se adopte sea aquella que mejor satisfaga los objetivos del decisor.

MODELO HIDRODINAMICO BIDIMENSIONAL POR CAPAS PARA EVALUAR EL TRANSPORTE POR DIFUSION EN MASAS DE AGUA

Autor: Saúl Marín

Director: Mauricio Toro

(Ver artículo en esta revista)

PRECIPITACION MAXIMA PROBABLE EN ZONAS TROPICALES.

Autor: Carlos Alberto Mesa Gómez

Director: Lilian Posada G.

Teniendo en cuenta las diferentes variables meteorológicas y físicas que influyen en la formación del fenómeno de la precipitación como lo son la velocidad del viento, la cantidad de agua precipitable existente en las nubes, la humedad relativa de la zona, la temperatura del punto de rocío y la altura sobre el nivel del mar, se buscó, un modelo, que una vez optimizado, sirviera para estimar precipitaciones máximas en zonas tropicales.

En la etapa inicial de la investigación se observó cómo estaban relacionadas las variables físicas con respecto a la precipitación mediante un análisis gráfico y se pudo apreciar que estas variables en su mayoría tenían un comportamiento no lineal. Esta posibilidad dio pautas para utilizar técnicas estadísticas como el método de regresión múltiple -REM- para la obtención de los modelos.

Se utilizaron registros de precipitación, velocidad del viento, temperatura del punto de rocío, humedad relativa, de varias estaciones climatológicas localizadas a diferentes alturas sobre el nivel del mar, a través de toda Colombia y a partir del año 1972, debido a que en años anteriores a éste casi no existen registros de velocidad del viento, además son muy pocas las estaciones que cuentan con registros de esta variable.

Se conforman series de los máximos registros de precipitación por año con sus correspondientes variables independientes, agrupados en duraciones de 6 y 12 horas por separado y luego, 6 y 12 horas simultáneamente para aplicar el modelo de regresión múltiple. Los resultados del programa de regresión indicaron el grado de significancia del modelo y la participación de cada variable en el modelo representado. Se eliminaron secuencialmente las variables poco representativas para cada grupo y se conformaron nuevos modelos (4 por cada grupo) a los que se les determinó los límites superior e inferior de las variables independientes para cada discretización de la altura sobre el nivel del mar (H).

Posteriormente se llevó a efecto la prueba de los modelos que se consideraron más representativos de acuerdo con los coeficientes de determinación y correlación múltiple (P_1, P_2, P_5, P_6, P_9 , y P_{10}). Esta prueba consistió en evaluar la suma de los errores

cuadráticos para cada modelo, resultando en la selección del modelo P_6 que a continuación se describe como el modelo P o modelo propuesto para la estimación de la precipitación máxima.

$$P = 2.29 \frac{W_p^{0.81632}}{H^{0.06615}}$$

Donde P, lámina de agua precipitada en mm; WP, cantidad de agua precipitable, en mm y H, altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m).

Este modelo se puede aplicar para estimar precipitaciones en regiones con estaciones climatológicas localizadas hasta una altura (H) de 2.400 m.s.n.m y presenten una cantidad de agua precipitable (Wp) comprendida entre 23.8 y 454.0 mm.

Al comparar los resultados obtenidos en la estimación de la Precipitación máxima mediante el modelo seleccionado con el método tradicional de Hershfield y el método de Hershfield aplicado a Colombia, se dedujo que el modelo hallado en la investigación sirve para estimar precipitaciones máximas pero no sirve para estimar la Precipitación Máxima Probable.

CALIBRACION EN UNA CAPA CON CANALES DE PRUEBA DE MODELO HIDRODINAMICO MULTICAPA EN ELEMENTOS FINITOS

Autor: José Guillermo Molina Vélez

Directores: Carlos A. Valencia E., Juan Caicedo Reyes

Esta tesis presenta la disertación teórica, las experiencias de laboratorio y los resultados obtenidos en la calibración en una capa del modelo hidrodinámico multicapa en elementos finitos desarrollado por Marín (1990). La calibración se realiza en canales de laboratorio con la inclusión de condiciones de borde, tales como la presencia de espolones. El modelo resuelve con la técnica de los elementos finitos las ecuaciones de Navier-Stokes obteniéndose un esquema bidimensional integrado en la profundidad, considerando además las velocidades en las paredes y la fricción entre capas, fricción en el fondo, esfuerzos cortantes y términos de transferencia vertical entre capas. La calibración se hace básicamente para dos situaciones: un canal recto con flujo uniforme y un canal recto con un espolón; el análisis de los resultados arroja una buena

concordancia entre resultados teóricos y mediciones, que permiten verificar la capacidad del modelo para simular campos de flujo unidimensionales, los efectos que sobre los resultados tiene el refinamiento de la malla de cálculo y el comportamiento del parámetro de turbulencia ("EDDY") que está presente en las ecuaciones constitutivas del modelo. Además se hace un análisis de estabilidad para las distintas situaciones y se hace una identificación de los valores de los parámetros: EDDY, CHEZY y LUMP, que son reportados en la literatura con rangos de valores muy amplios. Para los parámetros se hizo también un análisis de sensibilidad.

EVALUACION SOCIOECONOMICA DE PLANES DE EXPANSION EN EL SECTOR ELECTRICO

Autor: Carlota M. Nicholls E.

Directores: Ricardo A. Smith Q. y Oscar J. Mesa

(Ver artículo en esta revista)

EVALUACION DE CENTRALES DE GENERACION-BOMBEO DE TIPO ESTACIONAL EN SISTEMAS HIDROTERMICOS

Autor: Carlos Osorno G.

Director: Hernán Darío Ramírez D.

(Ver artículo en esta revista)

UN NUEVO MODELO DE DESAGREGACION EN HIDROLOGIA.

Autor: Luis Oscar Pachón Niño

Director: Darío Valencia R.

Los modelos de desagregación se han constituido en las últimas dos décadas, en una herramienta alternativa para la modelación de series de tiempo hidrológicas. Su principal ventaja está relacionada con la preservación de estadísticos importantes en más de un nivel de agregación, los cuales no se preservan cuando se utilizan modelos markovianos o similares.

En el presente trabajo se propone un nuevo modelo de desagregación en hidrología, el cual requiere de un menor número de parámetros con respecto a modelos tales como el de Valencia-Schaake, el de Mejía-Rousselle, el de Berdugo, García y Valencia; adicionalmente el esquema propuesto, permite la preservación de la correlación entre la primera estación de un año y la última del año previo, estadístico que ha servido de motivación para los diferentes estudios del Campo, que han propuesto diversas modificaciones al modelo Básico, esquema que no está diseñado para preservar dicha correlación.

Se hace una presentación del modelo recientemente propuesto por Santos y Salas y se hace una evaluación crítica del mismo, el esquema de la desagregación por etapas, no simétrico, ha servido como guía para el diseño del esquema del modelo propuesto.

Un modelo simplificado igualmente se propone, a diferencia de otros modelos simplificados, éste preserva la propiedad de la transformación lineal, la correlación entre estaciones de años consecutivos y un valor significativo de las correlaciones espaciales entre estaciones de diferentes sitio.

Con el fin de verificar los modelos propuestos, se construyeron respectivos programas de computador, que permitieron efectuar una aplicación práctica; se utilizaron los registros históricos de las estaciones RG6 y RG8 ubicadas en la cuenca del Río Grande, departamento de Antioquia, Colombia, y sus resultados se comparan con los obtenidos en la referencia [8].

EL FENOMENO DE HURST.

Autor: Germán Poveda Jaramillo

Director: Oscar Mesa S.

(ver artículo en esta revista)

CONFIABILIDAD EN EL PLANEAMIENTO DE LA EXPANSION DE LOS SISTEMAS HIDRO-TERMICOS

Autor: Medardo Prieto S.

Director: Oscar Mesa S. y Darío Valencia R.

(Ver artículo del autor en esta revista)

MODELO MATEMATICO PARA LA SIMULACION DE UN SISTEMA DE AGUAS SUBTERRANEAS

Autor: Luis Fernando Puerta Correa

Directores: Jorge Polanco F., María Victoria Vélez O.

El método de los Elementos Finitos es utilizado en el presente trabajo, para hacer la simulación del flujo de aguas subterráneas en un acuífero semiconfinado, en la cuenca acuífera comprendida entre los Ríos Párraga y Amaime, en la zona sur del Valle del Río Cauca, en el Suroccidente Colombiano (Municipios de Candelaria, Palmira y Pradera).

El flujo del agua subterránea en el Acuífero Aluvial formado parte por una zona de inundación del Río Cauca, y otra parte por los conos aluviales de Amaime, Nima y Pradera, fue modelado como un acuífero semiconfinado, constituido por las unidades A y B identificadas en estudios anteriores para la litoestratigrafía de la zona. La unidad B constituye la base impermeable del modelo, y la unidad A forma el acuífero en cuestión, una capa acuitarda, y un acuífero superficial o freático, entre los cuales se produce flujo vertical debido a la diferencia de alturas piezométricas entre los acuíferos.

El modelo utilizado, aplica la técnica de los elementos finitos para resolver las ecuaciones que gobiernan el flujo bidimensional del acuífero. El punto de partida es un programa de computador denominado "NAPPE", desarrollado en L'ecole Nationale des ponts et chaussées de París (Humbert, 1984, y Polanco, 1987) el cual considera el flujo de aguas subterráneas en acuíferos libres o freáticos. A dicho modelo se le adicionó el funcionamiento de acuíferos confinados y semiconfinados, utilizando para este último problema, los desarrollos de Pinder y Huyakorn (1984), que consideran el flujo vertical entre un acuífero superficial y un acuífero semiconfinado, a través de una capa acuitarda que los une, y teniendo en cuenta el almacenamiento en dicha capa acuitarda.

La calibración efectuada para los parámetros hidrogeológicos de la cuenca acuífera en cuestión, utilizando los registros de alturas piezométricas disponibles para 16 períodos comprendidos entre Mayo de 1978 y Octubre de 1988, permiten concluir que el flujo vertical que se produce entre el acuífero superficial y el acuífero semiconfinado, es vital para el funcionamiento actual del aprovechamiento del recurso de agua subterránea a través de pozos profundos, en la zona estudiada; igualmente se puede concluir, que el descenso de los niveles piezométricos reportados en algunos puntos de la región, se deben a la necesidad de obtener una diferencia de alturas piezométricas adecuada para lograr el flujo vertical que provea el agua que entra a los pozos, pues en dichos puntos, el flujo regional proveniente de la recarga que se produce en la región Oriental, en el contacto entre los conos aluviales y la formación montañosa de la cordillera Central ya no es suficiente para suministrar el agua requerida por el bombeo.

Para la utilización posterior del modelo calibrado, se plantea la necesidad de modelar por separado el acuífero superficial, las lluvias, la evapotranspiración, y la recarga que se produce en la frontera Oriental, así como el nivel piezométrico en la zona del Río Cauca. También se sugiere la necesidad de que se hagan estudios a menor escala, que analicen el flujo vertical, como la gran fuente de abastecimiento para la explotación del agua subterránea en el acuífero.

De acuerdo con estimativos preliminares, utilizando los parámetros estudiados, y los balances globales efectuados, es posible predecir la necesidad de racionamiento de la explotación del agua subterránea en un futuro cercano, considerando un crecimiento promedio de la construcción de pozos.

El modelo no pretende ser una representación fiel y exacta de la realidad física del acuífero, sino una simulación de su funcionamiento, y se debe entender como una herramienta para implementar un manejo adecuado del recurso de agua subterránea en la zona, más que como una descripción del acuífero.

PREDICCIÓN DE CAUDALES DIARIOS Y SEMANALES MEDIANTE MODELOS PROBABILÍSTICOS.

Autor: Jorge Eduardo Rodríguez Amaya

Director: Luis F. Múnera L.

En la planeación de la operación de sistemas de recursos hidráulicos, se emplean modelos matemáticos que representan el comportamiento del sistema estudiado. Para la adecuada utilización de éstos, se requiere disponer de estimativos de algunas variables, entre ellas los caudales de los ríos incluidos en el modelo. Debido a la forma como se han implementado estos modelos en el Sector Eléctrico Colombiano, se requiere de pronósticos mensuales, semanales y diarios para todos los ríos del sistema de generación hidroeléctrica. Se presenta en este trabajo un conjunto de modelos determinísticos y probabilísticos, tendientes a resolver el problema de estimación puntual de caudales (pronóstico) diarios y semanales, para efectos de operación de proyectos de suministro de agua en general. Se plantea en el capítulo 2, cuales son algunas de las condiciones básicas que se debe tener presentes para seleccionar la información histórica, con la cual se adelantar la calibración de los diferentes modelos que se utilicen. En el capítulo 3, se presenta un esquema de organización de la información histórica recolectada, que permita su rápido y eficiente manejo. Se presenta también una metodología determinística y de fácil implementación, para validar la información básica y efectuar relleno de datos cuando se detecten inconsistencias o faltantes en los datos fuente. En el capítulo 4, se propone la metodología estadística y un esquema de descomposición temporal y muestral de la información histórica, la cual es requerida para una adecuada caracterización de las series bajo estudio. Con base en los resultados de esta caracterización, se determinan las propiedades fundamentales de cada una de las series y se infiere que tipo de modelo resulta más adecuado para la predicción. Se fijan también los valores de los parámetros que posteriormente indicarán si el modelo es adecuado. En el capítulo 5, se menciona el fundamento de varios enfoques estocásticos que tradicionalmente se han utilizado para resolver este tipo de problema, los modelos ARMA Y ARIMA, y adicionalmente se proponen algunos modelos de pronóstico de tipo: tanto determinístico como probabilístico con el mismo objetivo. Los modelos propuestos, si bien tienen una característica heurística, también tienen una importante relación física con el fenómeno estudiado y presentan la particularidad de no exigir a las variables bajo estudio el que éstas sean gaussianas. El capítulo 6, contiene una propuesta metodológica de cómo evaluar la calidad de los

resultados obtenidos por los diferentes modelos que se formulen; allí se indica cuales son los criterios fundamentales del ambiente operativo en los cuales tiene aplicación el empleo de los modelos. Con base en estos criterios se puede establecer cuál de ellos responde en mejor forma desde el punto de vista estadístico y del objetivo trazado. Los resultados de las evaluaciones efectuadas sobre una muestra de control, correspondientes a las metodologías analizadas, se presentan en los capítulos 7 y 8.

MODELO DE SAINT-VENANT APLICADO AL TRANSITO DE CRECIENTES

Autor: Luis Fernando Rodríguez Arbeláez.

Director: Francisco Mauricio Toro B.

El flujo no permanente gradualmente variado en canales abiertos puede representarse matemáticamente por un sistema de dos ecuaciones diferenciales desarrollado en 1871 por el ingeniero francés Barrè de Saint-Venant. Por no poseer solución analítica en forma cerrada, su aplicación a los problemas de tránsito de crecientes sólo es posible mediante el uso de técnicas numéricas programables para su integración en forma aproximada y discreta.

Con el fin de desarrollar una herramienta para el estudio de crecientes en ríos o canales, se seleccionaron, implementaron y evaluaron los métodos de diferencias finitas más representativos de cada uno de los tres grupos en que se han clasificado las técnicas de solución: el Método Iterativo de la Malla de Características, el Método Implícito de Preissman y el Método Explícito Leap-Frog. Después de desarrollar y programar los respectivos algoritmos de solución, se evaluaron mediante la simulación de numerosas condiciones de flujo en un canal de geometría simple analizando la sensibilidad ante la variación de los parámetros de cálculo. Se concluyó que el método implícito satisface ampliamente los requerimientos inherentes a este tipo de estudios, mientras que los otros métodos presentaron serios problemas de aplicabilidad y programación (m. de las características) o de estabilidad y tiempo de cálculo (m. explícito).

Se procedió entonces al refinamiento del programa de computador basado en el método implícito de Preissman de tal forma que permitiera la simulación del mayor

número posible de condiciones de flujo en canales o ríos con cualquier tipo de geometría y que además posibilitara avanzar la solución a través de aquellos puntos particulares dentro del tramo en estudio en los cuales no se verifica la validez de las ecuaciones de Saint-Venant, tales como vertederos (libres o sumergidos) cambios bruscos de sección (estrechamientos o ensanchamientos) y confluencias o derivaciones. Dicho programa fue verificado mediante la simulación de numerosos casos que consideraban diferentes condiciones de flujo en un río natural (río Escalante, en la República de Venezuela), suponiendo, para cada condición de flujo, todas las combinaciones posibles de puntos interiores particulares o, en otras palabras, todas las configuraciones físicas posibles del sistema fluvial.

MODELO DE SIMULACION DE CRECIMIENTO VEGETAL.

Autor: Luis Carlos Rubiano Ortegón

Director: Ricardo A. Smith Q.

La carencia de fuentes de energía en algunas regiones, bien sea por condiciones geográficas, económicas y/o técnicas crean las necesidades de buscar nuevas alternativas para suplir esta deficiencia. La biomasa vegetal se plantea entonces como un mecanismo de posible solución a este problema; el adoptar la biomasa como fuente energética requiere de un previo estudio de factibilidad económica. Esta evaluación debe considerar tanto los costos de producción y de transformación de la materia vegetal así como los beneficios esperados bajo condiciones climatológicas y agrológicas reinantes en una región determinada.

El conocimiento de los niveles de producción esperada (beneficios) se pueden determinar a través de granjas experimentales, lo cual requiere de grandes inversiones económicas, otra forma alterna mucho más económica es la modelación matemática del crecimiento de los cultivos. Esta última metodología es el objetivo del presente estudio y para su desarrollo se subdividió en dos partes principales dependiendo del grado de satisfacción hídrica a que se pueden someter los cultivos: sin o con restricción en la disponibilidad de agua.

El modelo de evapotranspiración (ET) y crecimiento sin restricciones hídricas es básicamente el desarrollado por

Norero (1973), el cual involucra variables climatológicas, del suelo y del cultivo.

El segundo modelo implementado (con restricciones hídricas) considera el balance hídrico en la columna de suelo, en el cual los aportes al sistema provienen de la infiltración del agua precipitada y las salidas son la ET real y la percolación profunda. El modelo de balance hídrico del suelo posee una componente determinística (ET real y percolación) y una aleatoria (volumen de infiltración y contenido de humedad del suelo).

La capacidad de infiltración y la tasa de percolación para un contenido de humedad del suelo son modeladas de acuerdo a las relaciones desarrolladas por Eagleson (1978c). La ET real, cuando el suministro de agua al cultivo se hace insuficiente, se calculó por medio de la expresión experimental obtenida por Norero (1982) que relaciona la ET real con el potencial hídrico del suelo.

La estructura probabilística del volumen de agua infiltrada durante una tormenta se deriva a partir de las funciones de distribución de la intensidad y duración de la lluvia de acuerdo al modelo descrito por Eagleson (1978a). La función de densidad de probabilidades del contenido de humedad del suelo se considera como la combinación de un modelo matemático determinístico (ET real y percolación) que describe el proceso de agotamiento de la humedad y la descripción probabilística de la entrada aleatoria (volumen infiltrado) a la columna de suelo. El comportamiento de la humedad del suelo es representado por un proceso markoviano.

Dado que el contenido de humedad del suelo al inicio del período de desarrollo del cultivo presenta un carácter aleatorio, su estructura probabilística se ajustó a una función de distribución Beta, para así finalmente obtener el valor esperado de la ET y crecimiento real.

Para la aplicación de estos modelos se tuvo en cuenta que la región seleccionada contara con los registros climatológicos necesarios para su implementación. El período de desarrollo del pasto alemán (especie vegetal seleccionada), se ha estimado en 90 días, de acuerdo a los trabajos realizados en Venezuela (Norero 1985), lográndose de esta forma cuatro cortes al año. Con el fin de conocer el ciclo anual de mayores rendimientos de acuerdo a la época de inicio del desarrollo, se establecieron cuatro fechas de iniciación.

De estos ciclos anuales, el que mayores rendimientos presentó bajo condiciones en que no existe restricciones

hídricas al cultivo, corresponde al que inicia en Febrero 15; a nivel individual los períodos más eficientes corresponden a los comprendidos durante los tres primeros meses del año.

La producción real esperada de biomasa al año, una vez considerado el carácter aleatorio del volumen de infiltración y de la humedad del suelo al inicio de cada período de desarrollo, alcanzó su máximo rendimiento en el ciclo 1 (inicio Enero 05). Individualmente los períodos de desarrollo con mayor producción de biomasa corresponden a aquellos que coincidieron con los meses de mayor precipitación.

La producción esperada en estos períodos fue de 600 g/m^2 ($3,7 \text{ Tn/Ha}$), valor que representa el 44% de la producción potencial. Este porcentaje establece que durante ningún período de desarrollo se contó con la precipitación suficiente para la plena satisfacción hídrica de los cultivos y los déficit a nivel anual superiores a los 2.000 m^3 por hectárea e inferiores a los $3.500 \text{ m}^3/\text{Ha}$.

En cuanto a la producción energética anualmente se podría esperar un promedio de 62.000 kw-Hr/Ha , encontrándose una variación cercana al 30% entre el ciclo de mayor producción y el de menor.

PREDICCIÓN DE CAUDALES A NIVEL MENSUAL.

Autor: Trino Salinas Garnica

Director: Luis F. Múnera L.

Desde que el modelo de desagregación fue propuesto por Valencia y Shaake (1971), se solucionó el problema que presentaba la simulación de caudales mensuales al modelarse el proceso por medio de estructuras autorregresivas y de promedios móviles ARMA (p,q), que preservan correlaciones cruzadas en un solo nivel de agregación.

Sin embargo, a pesar de haberse solucionado el problema de simulación poco se había realizado en esta dirección con respecto a la predicción de caudales estacionales.

En esta investigación se plantea una forma alternativa de modelamiento que requiere la inclusión, al igual que en la simulación, de diferentes niveles de agregación en las estructuras de dependencia que condicionan el estimador óptimo.

El modelo que se propone además de presentar una estructura de dependencia muy flexible que se acomoda a las características de cada región modelada, ofrece la posibilidad de incorporar variables explicativas del fenómeno representado de diferentes niveles de agregación. Explícitamente, el algoritmo de evaluación del modelo considera variables potenciales de nivel mensual, estacional y anual, que surgen principalmente de involucrar los principios de causalidad física en el análisis. El proceso de selección que se utiliza en la identificación final del modelo proporciona la suficiente flexibilidad a la representación para incluir estructuras de dependencia diferentes al nivel mensual cuando se requiera. Esta selección se efectúa con base en los niveles de significancia y a la capacidad explicativa de cada una de las variables potenciales y finaliza al conformar el subgrupo de regresores óptimos para la representación de la serie modelada.

Por lo anterior, se concluye que el enfoque dado a la modelación de caudales mensuales en este trabajo, combina un esquema puramente físico (lluvia-escurrimiento) con uno eminentemente estadístico, característica que mejora su capacidad de modelamiento.

La aplicación práctica del modelo propuesto se realizó en dos cuencas de Antioquia, la correspondiente al río Grande y la cuenca de los ríos Tenche y Concepción. El modelo cumplió satisfactoriamente con las hipótesis de normalidad e independencia hechas en relación a las series de residuos y operó bastante bien en su fase de verificación aunque presentó algunas fallas en la representación de los meses húmedos como era de esperarse.

OBTENCIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE DESAGREGACIÓN PARA LA POLÍTICA ÓPTIMA DEL EMBALSE AGREGADO.

Autor: Carlos Mario Tamayo Saldarriaga

Director: Oscar Mesa S.

En la planeación de la expansión del sistema hidrotérmico Colombiano, se utiliza la técnica agregación-operación-desagregación para analizar el comportamiento de las diferentes secuencias factibles. Esta técnica es utilizada para reducir la dimensionalidad del sistema de múltiples embalses.

Esta investigación se centra en la etapa de desagregación, y se busca obtener un procedimiento heurístico, que sea eficiente y fácil de aplicar, obteniendo un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles, tanto hidráulicos como térmico, para atender, en forma confiable las demandas. Además, permite analizar el comportamiento del sistema hidrotérmico para de esta forma seleccionar las secuencias de expansión óptima, desde el punto de vista que atiende la demanda proyectada con cierta confiabilidad en la forma más económica posible.

Las metodologías propuestas se basan en el procedimiento heurístico de la regla de los espacios, la cual determina las descargas en los distintos embalses de acuerdo al valor de los aportes que se esperan en cierto período de tiempo, para lo cual se implementó un modelo de pronóstico de caudales. Como este procedimiento se definió para embalses en paralelo, se presenta dos formas de considerar la configuración de embalses en serie.

Las metodologías propuestas se aplican para una secuencia seleccionada del sistema hidrotérmico Colombiano y los resultados se comparan con los obtenidos al aplicar el procedimiento heurístico utilizado actualmente y al realizar la simulación del sistema agregado.

OPTIMIZACION DE UN SISTEMA HIDROTERMICO DE GENERACION POR RECOMPOSICION

Autor : John Jairo Uribe Segura.

Director : Oscar Mesa Sánchez.

Este trabajo se presenta como un esfuerzo metodológico en la búsqueda de modelar ciertos aspectos del planeamiento operativo a largo plazo.

Básicamente este esfuerzo se centró en mantener, en todo momento del análisis, el sistema real, recurriendo al menor número de simplificaciones en la topología del mismo.

También se encaminó la investigación hacia la aplicación de nuevas herramientas matemáticas de tal forma que se pudiera medir, o al menos vislumbrar, la eficiencia de otros algoritmos de optimización diferentes a la

programación dinámica, que sin lugar a dudas es la panacea para el modelaje de problemas secuenciales, no lineales y con alta dosis de aleatoriedad en ciertas variables, pero con el agravante práctico, al menos para la tecnología computacional actual, de la dimensionalidad que encierra este algoritmo.

Desde el inicio no se pretendía competir con las metodologías existentes y menos aún con aquéllas que han resistido muchos cuestionamientos prácticos y que han sido el resultado de progresivos avances en el transcurso de sus aplicaciones.

La tarea iniciada en esta tesis es trabajar el mismo problema desde un punto de vista metodológico diferente, con el ánimo investigativo de seguir mirando nuevos caminos en la búsqueda de la solución a un problema que dista todavía de estar completamente resuelto.

Los resultados, aunque son importantes, y de hecho son los que permiten medir la eficacia de una nueva herramienta, deben mirarse como alguno de los primeros frutos de una metodología muy reciente.

Lo central de este trabajo es el aporte de seguir mirando nuevos mecanismos de solución en la medida en que esta es la tarea del hombre si desea conocer mejor su entorno natural.

MODELO HIDRODINAMICO, POR CAPAS, EN ELEMENTOS FINITOS

Autor: Carlos Alberto Valencia E.

Director: Francisco Mauricio Toro B.

En este proyecto se implementa un programa de computador para el modelo hidrodinámico por capas en elementos finitos de M. Kawahara.

Se presenta un informe del trabajo realizado, que parte de las ecuaciones básicas hasta la verificación del modelo en un caso real, haciendo inicialmente una revisión bibliográfica de los modelos hidrodinámicos integrados en la profundidad que utilizan la técnica de los elementos finitos.

Se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes-Reynolds-Orr, que son las que rigen el

fenómeno, para deducir el modelo. No se entra en detalles que se encuentran en las referencias, pero si en los que son poco claros en ellas. Al modelo por capas se le aplica la técnica de los elementos finitos, para obtener las ecuaciones matriciales a integrar en el tiempo. Se expone el esquema de integración en dos pasos de Lax-Wendroff, reformado por Kawahara, que al aplicarlo proporciona las bases para el programa de computador, del cual se da un diagrama de flujo.

La prueba teórica del modelo se realiza en tres casos; un canal con una capa, el mismo canal con tres capas y una bahía hipotética que presenta todas las posibles relaciones que se dan en el modelo implementado.

En este proyecto se desarrolla un modelo hidrodinámico para la Bahía de Cartagena. Se exponen los criterios y parámetros utilizados en la creación y se presentan los resultados obtenidos para un caso de simulación, que comprueban la validez del modelo.

En el capítulo de conclusiones y recomendaciones, se dan una serie de directrices a seguir en el futuro desarrollo del modelo, así como también, posibles estudios con el modelo de la Bahía de Cartagena.

ESTUDIO DEL LAHAR OCURRIDO EL 13 DE NOVIEMBRE DE 1985 EN EL RIO CHINCHINA COMO CONSECUENCIA DE LA ERUPCION DEL VOLCAN NEVADO DEL RUIZ.

Autor : Jaime Ignacio Vélez Upegui.

Director : Michel Hermelín.

El 13 de Noviembre de 1985 una erupción pliniana, freato-magnética del Volcán Nevado del Ruiz favoreció la fusión de parte del casquete glaciar dando origen a grandes lahares (flujos de lodo y fragmentos de roca), que descendieron de la alta montaña por los cauces de los ríos devastando las zonas aledañas en decenas de kilómetros aguas abajo, a causa de estos flujos perdieron la vida más de 20.000 personas y se produjeron millonarias pérdidas materiales en obras de infraestructura y campos de cultivo.

Estos flujos por su formación bastante rápida y por correr generalmente sobre cauces bastante pendientes, se presentan como un gran frente de onda (flujo rápidamente variado) que se desplaza velozmente, sin dar tiempo para evacuar la zona.

La necesidad de una zonificación de la región en cuanto a niveles de riesgo ante este tipo de evento, así como la implementación de medidas de prevención mediante sistemas de alarma, ha motivado a varios investigadores a la formulación matemática de modelos que permiten estimar los niveles de inundación aguas abajo y los tiempo de viaje del flujo.

Para estas formulaciones generalmente se han utilizado las ecuaciones para el tránsito de crecientes en hidráulica (flujo gradualmente variado), algunas de ellas en combinación con modelos reológicos para considerar la resistencia al flujo de un fluido que difiere sensiblemente del agua limpia, ya que presenta altas concentraciones de sedimento en suspensión.

En este trabajo se desarrolla un modelo unidimensional, para un canal no prismático de sección irregular y fronteras rígidas, que combina las ecuaciones para el flujo rápidamente variado del frente de onda con ecuaciones para flujo gradualmente variado aguas arriba y aguas abajo del mismo (ecuaciones de Saint Venant), y con una ecuación constitutiva (modelo pseudoplástico de Cheng) para representar el comportamiento del fluido, compuesto por agua y grandes cantidades de sedimento en suspensión. Conformando así un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, que puede resolverse por el método de las características.

Para su aplicación en el río Chinchiná este modelo resulta bastante complejo y exigente en cuanto a calidad y cantidad de información requerida. Por esta razón y teniendo en cuenta las características del río, del fluido y del flujo, y la información disponible se formuló un modelo simplificado que permite su simulación.

Este modelo considera la pendiente de la línea de energía igual a la pendiente del cauce, debido a los altos valores de ésta última. Igualmente, incluye la ecuación de la onda monoclina para el desplazamiento del frente de onda y la ecuación de la onda cinemática aguas abajo y aguas arriba de este frente; además el flujo se ha supuesto turbulento y para su resistencia se ha considerado una ecuación tipo Manning.

Debido a la falta de información y para comparar los resultados se implementó un modelo similar pero que no considera el movimiento rápidamente variado en el frente de onda.

Se simuló el flujo mediante los dos modelos, se compararon los resultados obtenidos y éstos a su vez con los presentados por otros autores. Este análisis permite concluir que las simulaciones con el modelo propuesto

son satisfactorias, teniendo en cuenta la información existente sobre el evento.

Se observa en el modelo que considera el frente de onda, que este frente necesariamente se forma en el río Chinchiná y que determina significativamente la dinámica del mismo, razón por la cual se presentan sensibles diferencias en los resultados.

Los niveles máximos y los tiempos de viaje obtenidos bajo la presencia del frente de onda, son superiores a los simulados mediante el modelo que no lo tiene en cuenta. Por tanto, no parece recomendable utilizar modelos que no consideren el movimiento rápidamente variado en el frente de onda para simular este tipo de eventos.

CRITERIOS DE OPTIMIZACION DE LOS PARAMETROS BASICOS DE UN PROYECTO HIDROELECTRICO.

Autor: Gloria Stella Villa Palacio

Director: Carlos Saldarriaga T.

El objetivo central de este trabajo es desarrollar una metodología y definir criterios para evaluar y optimizar los parámetros básicos relacionados con el esquema de desarrollo y con la producción energética de un proyecto hidroeléctrico, de tal manera que se maximicen los beneficios netos del aprovechamiento. Se define como parámetros básicos aquellos que determinan los costos y los beneficios del proyecto, es decir, el volumen útil y el caudal de diseño.

La metodología utiliza como herramienta un modelo matemático para realizar la simulación de la operación aislada del aprovechamiento y obtener los beneficios energéticos y económicos para cada alternativa de desarrollo. La simulación de la operación del embalse se hace mediante la regla de operación, característicos de cada aprovechamiento, los cuales se optimizan como función de las afluencias hidrológicas, el volumen de almacenamiento del embalse y los beneficios netos.

Dicho modelo requiere como información básica los aportes hidrológicos al embalse, las características físicas del aprovechamiento, información de costos, y factores que representen la política de operación del embalse y los costos marginales de la producción energética.

La evaluación de la simulación se realiza mediante índices probabilísticos. El más representativo de estos índices es la confiabilidad crítica, es decir, aquella asociada al mes con mayor probabilidad de incurrir en racionamiento. En la evaluación energética y económica de este trabajo se consideró adecuado un valor de 95% para este índice.

Los costos y presupuestos son datos de importancia básica en la evaluación económica de los aprovechamientos, pero como su elaboración no es objeto de este trabajo, se adoptaron aquellos usados por las entidades del sector eléctrico Colombiano.

El modelo no dispone de un algoritmo de optimización como tal, es necesario que el usuario explore resultados en términos de beneficios de alternativas ingenierilmente viables. La metodología de optimización se compone de dos partes; evaluación técnica y optimización económica. La optimización técnica se hace con base en la producción energética; la optimización económica tiene como función objetivo la maximización de los beneficios netos, como variables de decisión los parámetros básicos del aprovechamiento (volumen útil y caudal de diseño) y como restricciones las limitaciones físicas y operacionales del mismo. Se explora un amplio rango de variación de los parámetros a optimizar y finalmente se selecciona aquel valor para el cual son máximos los beneficios netos del aprovechamiento.

La metodología fue aplicada a tres proyectos hidroeléctricos con estudios de factibilidad terminada que se consideraron representativos: el Proyecto Fonce localizado sobre el río Fonce en el departamento de Santander, el cual es un desarrollo a filo de agua; el Proyecto Ituango localizado sobre el río Cauca en el departamento de Antioquia, también es un desarrollo a filo de agua pero su operación se realiza en cadena con el proyecto Cañafisto; y el Proyecto Neme localizado sobre el río Saldaña al sur del departamento del Tolima, es un desarrollo con embalse regulador.

ESTUDIO DE LAS TECNICAS DE ANALISIS DEL PROBLEMA DE EXPANSION

Autor : Ana Mercedes Villegas M I.E.

Director : Ricardo Smith Q. y Oscar Mesa S.

Debido a la importancia y complejidad de la expansión de un sistema de recursos hidráulicos, es necesario utilizar herramientas de optimización que permitan hacer la mejor distribución de los recursos escasos. Actualmente, existen un gran número de metodologías para llevar a cabo este análisis, por esta razón, se quiso realizar una comparación tanto a nivel teórico como práctico de diferentes metodologías, como son la programación dinámica (tradicional y del estado embebido), métodos heurísticos (regla TMR, programación dinámica combinada con una regla heurística) y programación entera mixta.

Adicionalmente, se analizaron los métodos propuestos por Erlenkotter, Kuiper y Ortolano y Smith para considerar la interdependencia existente entre los proyectos hidráulicos.

Se presentó también una metodología denominada programación dinámica del estado objetivo, en la cual se consideran las restricciones financieras en forma explícita dentro del modelo de optimización.

Por último, se analizó el problema de expansión desde el punto de vista multiobjetivo, presentando varias propuestas de solución.

Como caso de aplicación se consideró el Sector Eléctrico Colombiano, para un horizonte de largo plazo, en el cual se busca determinar la selección, secuenciamiento e itinerario de un conjunto de proyectos en forma preliminar.

A nivel general, se encontró que los métodos heurísticos pueden convertirse en alternativas muy atractivas, puesto que en forma sencilla y rápida encuentran soluciones similares a las obtenidas con métodos mas complejos.

En cuanto a la programación entera mixta, se encontró que la consideración de interdependencia entre proyectos hidráulicos llevaba a tener problemas de dimensionalidad, como en el caso de la programación dinámica, siendo necesario considerar métodos de agregación.

Aunque teóricamente la programación dinámica no garantiza la solución óptima, se observó que en el caso analizado, las dos metodologías (tradicional y del estado embebido) encontraban la solución óptima.

Se propone como esquema de análisis, utilizar el modelo heurístico TMR (desarrollado en Interconexión Eléctrica S.A. -ISA-) como una primera aproximación para la determinación de la secuencia óptima. Como un segundo paso, utilizar el modelo actualmente en operación en ISA para análisis de largo plazo (programación dinámica utilizando el método de Kuiper y Ortolano para considerar la interdependencia), adicionándole los conceptos de la programación dinámica en el estado objetivo, con el fin de involucrar las restricciones financieras, que cada vez adquieren mayor importancia dentro del análisis de expansión.

En este trabajo, se consideraron modelos que tenían como objetivo la minimización de los costos de capital y operación, atendiendo una demanda con una confiabilidad determinada; sin embargo, se recomienda que el análisis de expansión considere las condiciones de riesgo e incertidumbre presentes y las implicaciones, tanto económicas como sociales y ecológicas.

Es necesario considerar otras medidas que no sean estructurales, como leyes, bonificaciones, gestiones sobre la demanda, etc. Por último, es importante considerar que el proceso de planificación como tal, es un proceso que involucra múltiples decisores, múltiples demandas y múltiples objetivos.

EL PROBLEMA DE LA INFORMACION ESCASA EN LA SIMULACION DE LA OPERACION DE UN SISTEMA HIDROTERMICO.

Autor: Alvaro Delio Zapata Rendón

Directores: Oscar Mesa S. y Darío Valencia R.

En el planeamiento de la operación del sistema hidroeléctrico Colombiano, la información hidrológica juega un papel importante y en especial la concerniente con el comportamiento de los caudales de entrada al sistema. Este tipo de información es el principal estímulo en la cuantificación de la participación porcentual sobre la demanda a satisfacer, de las diferentes componentes de un sistema hidrotérmico dado.

Dado el carácter aleatorio de la mayoría de las ocurrencias hidrológicas, aun largos registros pueden no ofrecer una absoluta seguridad en cuanto a evitar errores y desviaciones de la alternativa "óptima". Esta investigación se centra entonces en establecer

metodologías y soluciones al problema de la información escasa en la operación y simulación de un sistema hidrotérmico, tanto cuando el planificador desconoce la realidad o naturaleza del fenómeno fundamental de generación de caudales o cuando se ve enfrentado al problema de contar con registros hidrológicos cortos e inadecuados.

Para ello se plantean dos esquemas que tratan de dar solución a los anteriores problemas. El primero parte de la base de que la serie histórica de caudales, se puede alternativamente "representar" por varios modelos hidrológicos propuestos, realizando la optimización y la simulación de la operación bajo tal supuesto y estimando las estadísticas pertinentes sobre la operación. En el segundo se considera que se cuenta con un determinado volumen de registros históricos con el cual se realiza la

estimación del modelo de caudales, la optimización y simulación obteniendo como en el caso anterior, los estadísticos más pertinentes sobre el comportamiento del sistema.

Con base en el análisis de los resultados obtenidos al considerar las anteriores metodologías, se concluye que el volumen de información mínimo requerido para una cuantificación confiable de los diferentes estadísticos depende del modelo que mejor represente la serie histórica de caudales y que en ausencia de información hidrológica, el utilizar modelos sencillos hidrológicos puede ofrecer tan buenos estimados de los estadísticos como un modelo de memoria larga.

