

- contaminación
acuática
- modelos de simu-
lación.



ANALISIS DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN CUERPOS DE AGUA
COSTEROS. METODO DE SIMULACION MATEMATICA.

JUAN CARLOS VALLE L.
CENTRO DE INVESTIGACIONES SUBMARINAS
UNIVERSIDAD DEL NORTE
COQUIMBO - CHILE
- 1978 -

INTRODUCCION.

Una de las necesidades críticas en el manejo racional de las costas, y en particular en el diagnóstico, control y vigilancia de la contaminación costera es la de contar con herramientas de análisis descriptivo-predictivo para estudiar el comportamiento dinámico de los contaminantes en el mar.

En este artículo se presenta un método de simulación matemática de amplias posibilidades para el estudio descriptivo-predictivo de contaminación no accidental (descargas urbanas, industriales), en bahías y cuerpos de agua costeros. Este método se ilustra con una aplicación concreta realizada por el autor en USA. Sus características y limitaciones se discuten en función de su uso potencial en las costas de Chile.

A) GENERAL

Los problemas de contaminación costera no accidental presentan dos aspectos principales que es necesario abordar de manera complementaria. Estos son:

1. Transporte del contaminante
2. Interacción del contaminante con el ambiente.

1. Transporte del contaminante:

Se refiere al comportamiento dinámico del material descargado (su movimiento y distribución) en el medio costero. Este aspecto es de carácter netamente mecánico y puede abordarse con independencia de las características químicas o toxicológicas de las sustancias.

2. Interaccion del contaminante con el ambiente.

Se refiere a las implicaciones ambientales de contaminantes específicos, generalmente consistentes en daño indirecto y directo sobre la biota litoral, la salud humana y el uso recreacional del mar. Este aspecto cubre una amplia gama de problemas de índole químico, bioquímico, biológico, ecológico e incluso económico.

Este artículo trata únicamente del primero de los aspectos citados.

El transporte de contaminantes en el medio costero es un fenómeno esencialmente convectivo, es decir depende del campo de velocidades del agua de mar en los cuerpos de agua costeros. En ellos, el campo de velocidades está gobernado por las mareas, el régimen de vientos, la fricción del fondo y contribuciones gravitacionales debidas a gradientes horizontales y verticales de densidad. En cuerpos de agua someras, no estratificadas y de columnas homogéneas, las mareas son dominantes. Las irregularidades locales y temporales de estas velocidades calculadas como desviaciones de valores promediados espacial y temporalmente ponen de manifiesto contribuciones al transporte que se conocen como difusión turbulenta y dispersión.

Matemáticamente, el problema del transporte queda planteado por la ecuación de convección-difusión, ecuación de diferenciales parciales, parabólica de segundo grado, que sólo puede resolverse para casos muy

simples, excluyendo, por cierto, las bahías y cuerpos costeros.

El transporte puede también analizarse empíricamente, por medición directa, pero este método es aplicable sólo a situaciones existentes donde se persigue una descripción cuantitativa. Si el objetivo es resolver racionalmente los problemas actuales y prevenir problemas potenciales, se requiere de herramientas técnicas de tipo predictivo, que permitan evaluar a priori el comportamiento de fuentes contaminantes proyectadas o hipotéticas. Con estas normas se puede evaluar comparativamente diversas alternativas y tomar decisiones razonables. Este mismo objetivo implica además que los estudios in situ de situaciones existentes deben estudiarse a la luz de marcos teóricos generales. Es por lo tanto deseable, lograr la solución de las ecuaciones gobernantes del problema. El único medio de hacerlo al presente es recurriendo a modelos matemáticos con ayuda de computadores.

B) DEFINICION DEL PROBLEMA.

Dada una fuente que descarga ya sea instantánea, intermitente o continuamente contaminantes al medio litoral, interesa determinar el área de influencia de tal fuente, esto es, la extensión de mar afectada por la descarga y la distribución del contaminante dentro de esta área - curvas de iso-concentración.

La fuente en cuestión puede existir físicamente

(problemas actuales) o hipotéticamente (alternativas de descarga en proyecto). El objetivo es describir cuantitativamente el comportamiento dinámico de las fuentes existentes y predecir, cuantitativamente, el comportamiento de aquellas hipotéticas. Resuelto este punto mecánico, existirá base para el cálculo del daño ambiental por parte de biólogos y ecólogos. Combinados ambos juicios técnicos, puede elegirse soluciones razonables y sentarse criterios generales de control.

C) METODO DE SIMULACION POR ELEMENTOS FINITOS.

En principio, el problema consiste en resolver el sistema de ecuaciones diferenciales compuesto por las ecuaciones hidrodinámicas (Navier-Stokes) y la ecuación de convección-difusión sujetas a las condiciones de borde del cuerpo de agua costero particular. Analíticamente este problema es al presente insoluble.

Si los procesos de transporte no modifican sustancialmente el campo de velocidades del área, es posible desacoplar el problema en dos grupos. Resolver primeramente para el campo de velocidades (ecuaciones hidrodinámicas) y luego, utilizando estos resultados resolver la ecuación de convección-difusión. Todavía la materia es analíticamente insoluble. Sin embargo, utilizando las técnicas de elementos finitos, Wang y Connor (1975), y Leimhkuler et al (1976) han propuesto modelos numéricos exitosos de ataque a estos problemas. Aplicaciones específicas incluyendo verificación experimental del método han sido llevadas a cabo en Biscayne Bay (USA) por Swakon y Wang (1977) y Valle (1978). Estos trabajos ilustrarán la materia en el presente artículo.

Tanto el modelo de circulación como el de transporte resuelven las ecuaciones integradas sobre la vertical. Esta aproximación aumenta la eficiencia computacional y facilita la prescripción de condiciones de borde y la verificación experimental de los resultados, pero evidentemente impone una limitación al ámbito de casos que pueden atenderse por este método. No puede usarse en bahías con estratificación importante o cuando el transporte modifica sustancialmente las velocidades. Por ejemplo, descargas significativas de agua dulce crean gradientes horizontales de densidad. Si así sucede, debe resolverse el sistema de ecuaciones primitivo; en ello se trabaja actualmente. Afortunadamente, una gran cantidad de problemas puede atacarse razonablemente con el método.

La gran ventaja de las técnicas de elementos finitos está en la flexibilidad con que puede simularse la realidad y el detalle de las bahías. Factores tales como caprichosa morfología y profundidades variables, cambios locales en las características del fondo, etc., pueden considerarse sin dificultad. El dominio de integración se subdivide en elementos (por conveniencia triangulares) tantos según sea la precisión deseada y la disponibilidad de computador.

Hidrodinámica. La aplicación del modelo hidrodinámico a una bahía presupone conocer con exactitud el régimen mareal, los vientos dominantes y determinar razonablemente los diversos parámetros necesarios. Según la calidad de esta información elemental, los resultados serán más o menos exactos. El modelo proporciona cuadros

"euleurianos" de velocidad, un dato para cada centro de gravedad de los elementos. Tal información es archivada en memorias (discos, tapes) para consumo posterior por el modelo de transporte. Las figuras 1 y 2 muestran la simulación del campo de velocidades de Biscayne Bay (Swakon y Wang) para dos instantes del ciclo mareal.

Una idea de la exactitud del método puede apreciarse en las figuras 3 y 4 (Valle). En estas figuras se han dibujado rosas de velocidades para dos puntos de la Bahía (Figura 5). La línea continua representa las mediciones efectuadas con un correntómetro Aanderaa, y la línea intermitente la predicción correspondiente a esas condiciones obtenidas con el modelo. En la figura 5 se indica la ubicación de las dos estaciones de comparación y la malla de elementos triangulares utilizadas (Valle).

Transporte: Obtenido el campo de velocidades, es necesario determinar los coeficientes de dispersión que se incluyen en la ecuación de convección-difusión. Tales coeficientes parametrizan las contribuciones de la difusión turbulenta y dispersión; se obtienen mediante experimentos in situ con trazadores; en este caso utilizando rodamina B. El comportamiento de la rodamina es analizado estadísticamente (con arreglo a la proposición de Officer (1977), por ejemplo) con el objeto de estimar valores para los coeficientes. No es analizado, como acontece habitualmente, como analogía del transporte contaminante que se estudia. Sin embargo, y también a modo de ilustración, la figura 6 muestra una comparación entre las "manchas" correspondientes predichas por el modelo para uno de los experimentos realizados.

En este punto, se está en condiciones de aplicar el modelo de transporte a problemas específicos de interés para un cuerpo de agua costero.

Las figuras 7, 8 y 9 , prsentan los resultados de tres simulaciones efectuadas para determinar las áreas de influencia del Canal Snapper Creek. Las características de cada simulación (descarga, factor de decaimiento, coeficientes de dispersión, forzamiento dinámico) se incluyen en las figuras.

De la observación de las figuras se desprende que el modelo es particularmente sensible al "decaimiento". Este punto merece consideración separada.

Decaimiento. Por decaimiento de un contaminante se entiende la biodegradación y/o remoción geoquímica del mismo. Este es el retiro de cantidades de sustancia a causa de procesos naturales marinos. Todo contaminante sufre en mayor o menor medida de estos procesos de decaimiento. Si éstos no decayeran en absoluto, eventualmente envadirán toda la vastedad marina por bajo que fuera el nivel de concentración. El modelo ilustrado en este artículo considera estos procesos complejos y en general todavía poco conocidos, definiendo un factor de decaimiento (K) y un proceso de primer orden, expresado por

$$\frac{d c}{d t} = K c \quad (1)$$

Integrando esta ecuación, se obtiene:

$$c = c_0 e^{-Kt} \quad (2)$$

Esto significa que debido a causas naturales, una sustancia de concentración inicial c_0 disminuirá a concentración c después de un tiempo t de acuerdo con (2). Por vida media de la sustancia se entiende el tiempo necesario para que

$$c = 1/2 c_0$$

Y de las relaciones anteriores se desprende que la vida media ($t_{1/2}$), queda expresada por:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{K} \quad (3)$$

Una determinación precisa de K cae fuera del campo de acción de oceanógrafos físicos o ingenieros de costa. Los fenómenos involucrados abarcan toda la gama de problemas químicos, bioquímicos y biológicos relativos al mar costero. Sin embargo, su extrema importancia es difícil de soslayar.

La incertidumbre en K es la que hace, desde el punto de vista de ingeniería, adoptar valores extremos que se traducen en predicciones "conservadoras" de las áreas de influencia de las descargas continuas. Estas áreas de influencia representan un estado de equilibrio (que se obtiene después de un cierto tiempo y afectando una cierta área) entre el aporte de la descarga contaminante y la velocidad de retiro del material nocivo por parte de los agentes biológicos y geoquímicos.

D) CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La estrecha relación de los fenómenos de transporte y la circulación de las bahías y cuerpos de agua afectadas obligan, ineludiblemente, a estudiar en forma detallada, ya sea por medio clásico o por simulación, la circulación de las bahías, estuarios y cuerpos de agua costero de importancia. Todo esfuerzo de control racional de la contaminación no accidental en la costa es completamente inútil si se desconoce los campos de velocidades.

Es indispensable incentivar e impulsar los estudios químicos, bioquímicos y biológicos tendientes a determinar los factores de decaimiento de diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos en el mar litoral. Estos procesos naturales constituyen per se el recurso marino que se llama "capacidad de absorción de desechos". El uso legítimo de tal recurso es un derecho, el abuso de los mismo se traduce en contaminación con su secuela de daños.

Es fundamental transferir a la región herra - mientas analíticas tal como la presentada para construir los cimientos técnicos sobre los cuales debe descansar toda acción reglamentaria con respecto a la contaminación marina actual o potencial.

REFERENCIAS.

Leimkuhler, et al A two dimensional Finite Element Dispersion Model. Symposium on modeling techniques. American Society of Civil Engineers. California, 1975.

Officer, Charles Physical Oceanography of estuaries. John Wiley & sons, New York, 1977.

Swakon, E & Wang, J. Modeling of tide and wind induced circulation in South Biscayne Bay and Card Sound. University of Miami, Sea Grant, Technical bulletin. N° 37. 1977.

Valle, J. C. Modeling of dispersion in South Biscayne Bay. University of Miami, 1978.

Wang, J & Connor, J Mathematical modeling of near coastal circulation. R.M. Parsons Laboratory for water resources & hydrodynamic. Technical report N° 200. Massachusetts Institute of Technology, 1975.

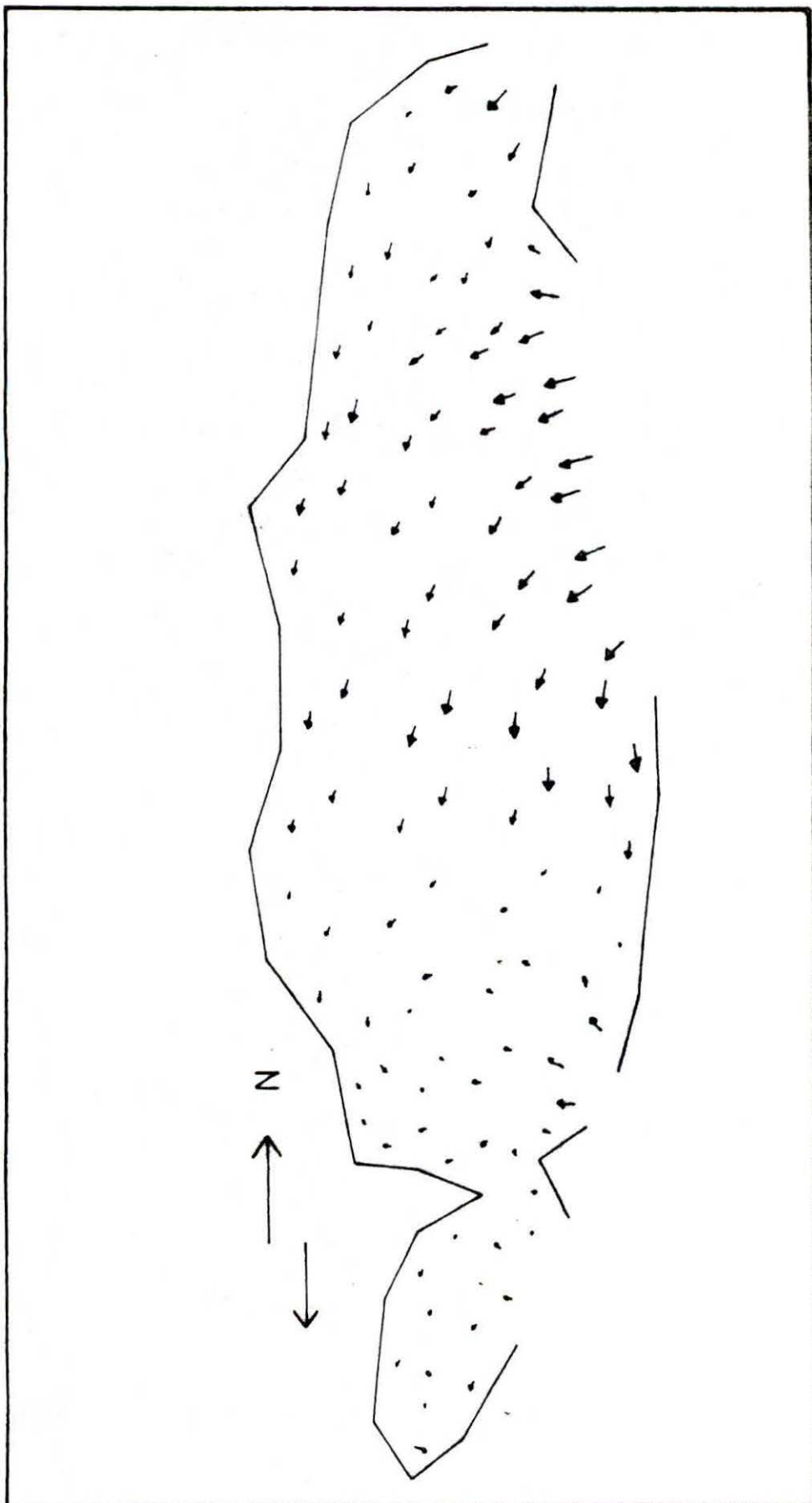


FIGURA 1: Ejemplo resultados modelo hidrodinámico para un instante ciclo mareal. Bahía Biscayne.

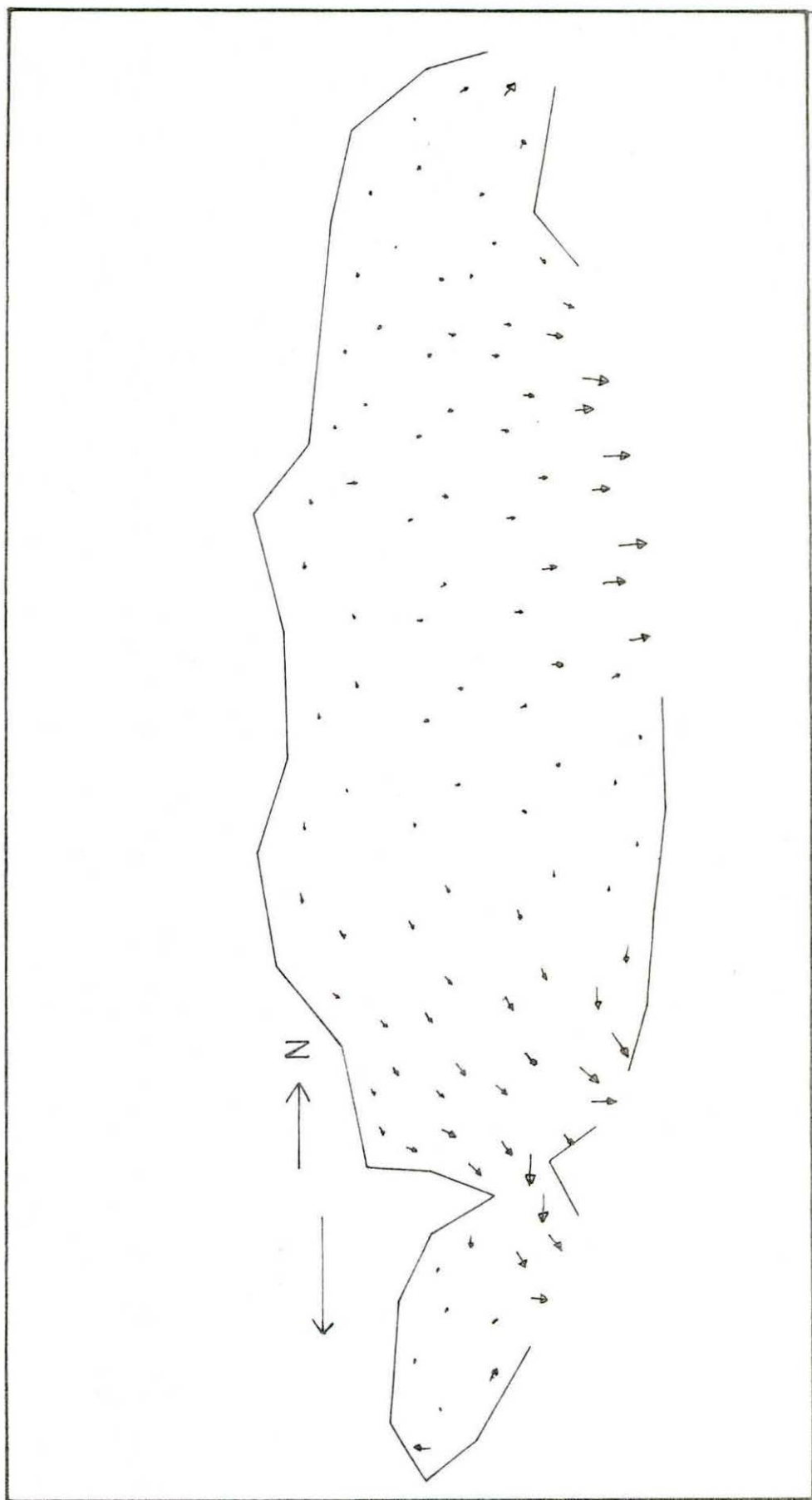


FIGURA 2 : Ejemplo resultados modelo hidrodinámico
para un instante ciclo mareal. Bahía Biscayne

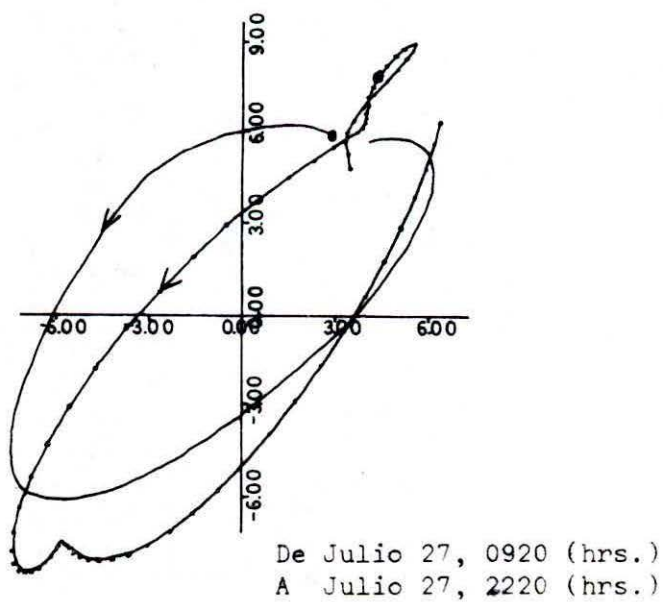
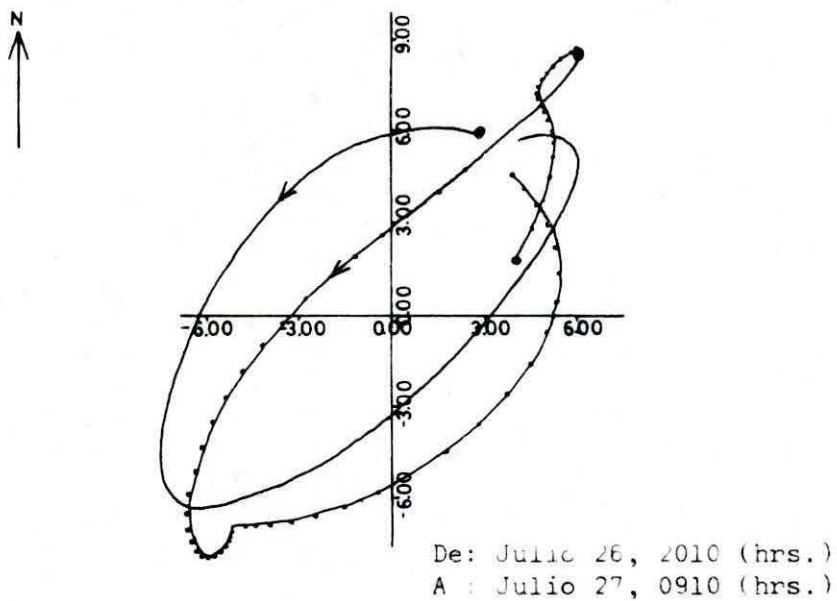
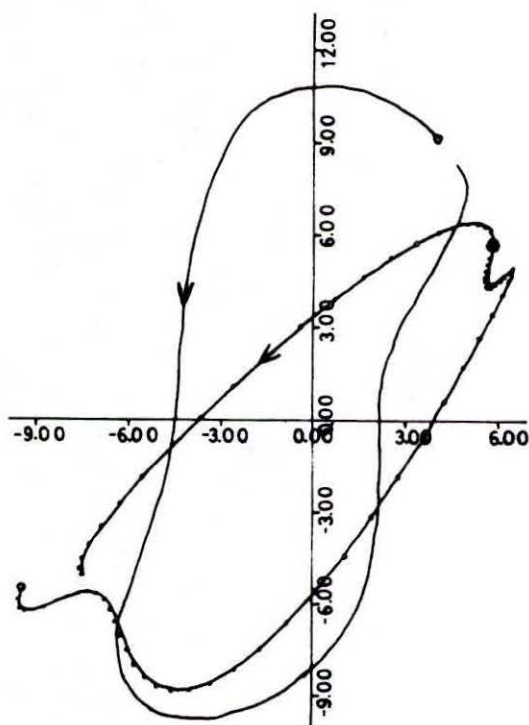


FIGURA 3: Comparación datos y modelo. Velocidades Estación A-1



De: Agosto 7, 1310 (hrs.)
A : Agosto 8, 0210 (hrs.)

FIGURA 4: Comparación datos y modelos. Velocidades
Estación A-2

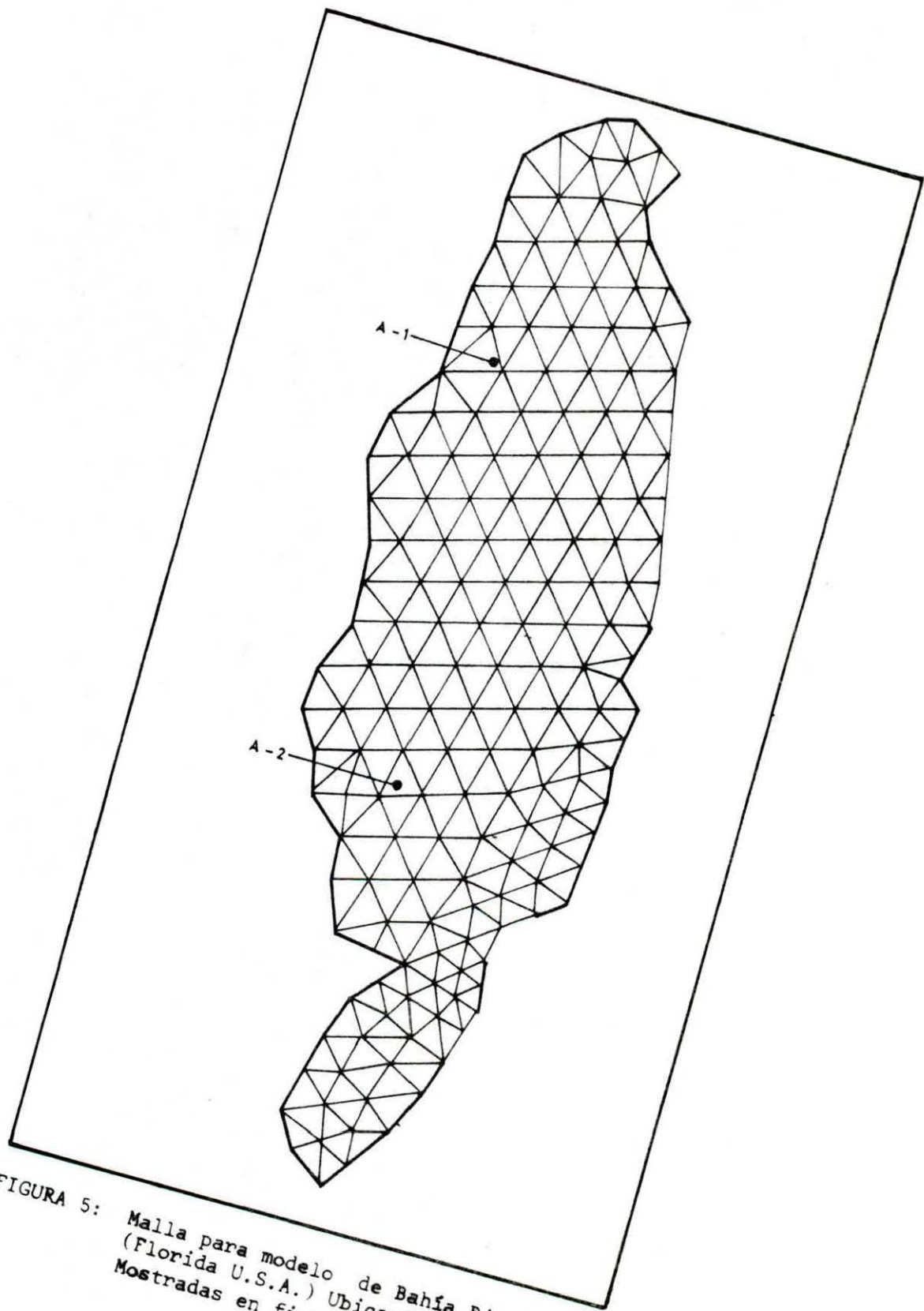


FIGURA 5: Malla para modelo de Bahía Biscayne
(Florida U.S.A.) Ubicación Estaciones
Mostradas en figuras 3 y 4.

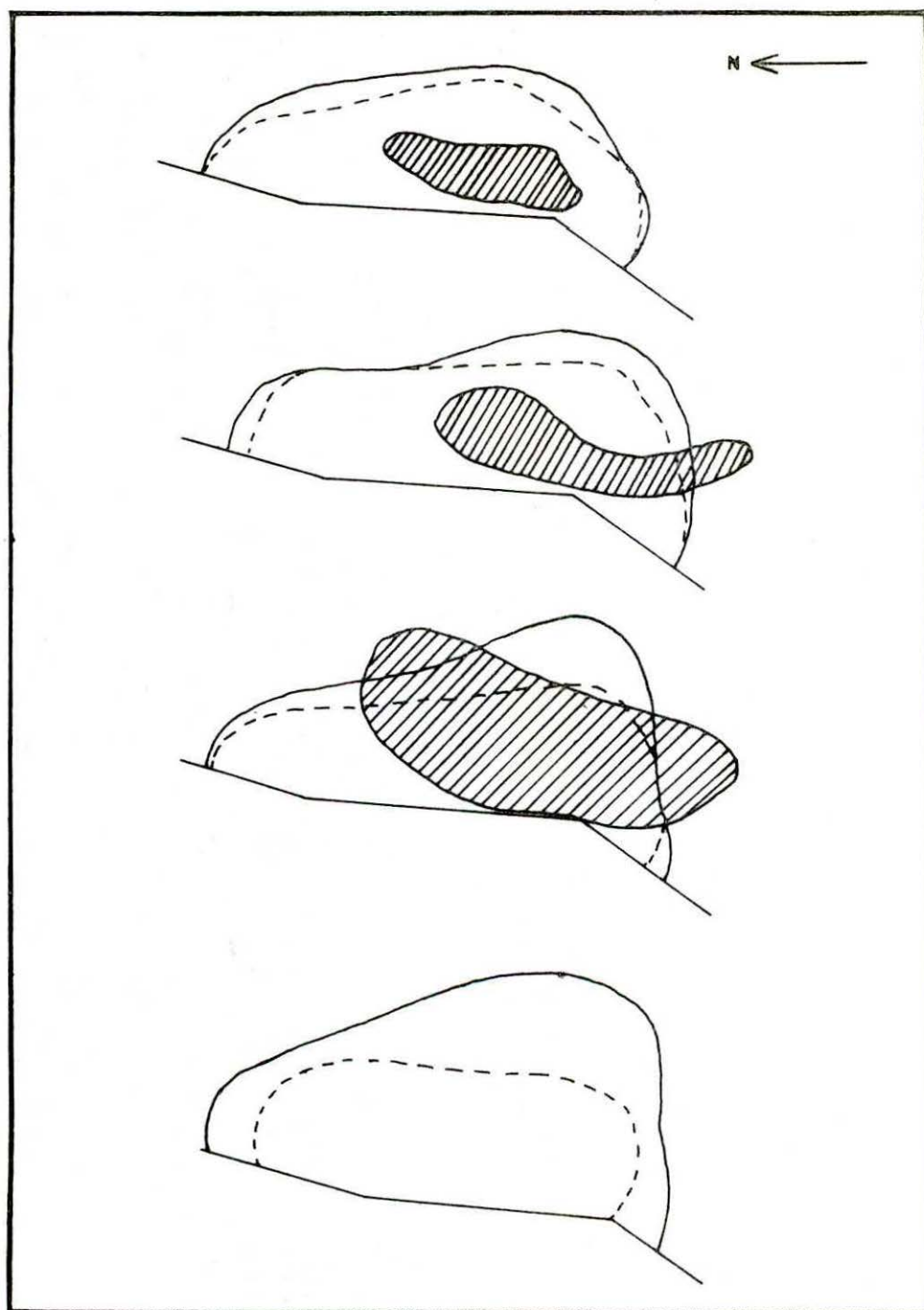


FIGURA 6: Simulación experimentos con trazadores.
achurado: experimentos. Línea: simulación

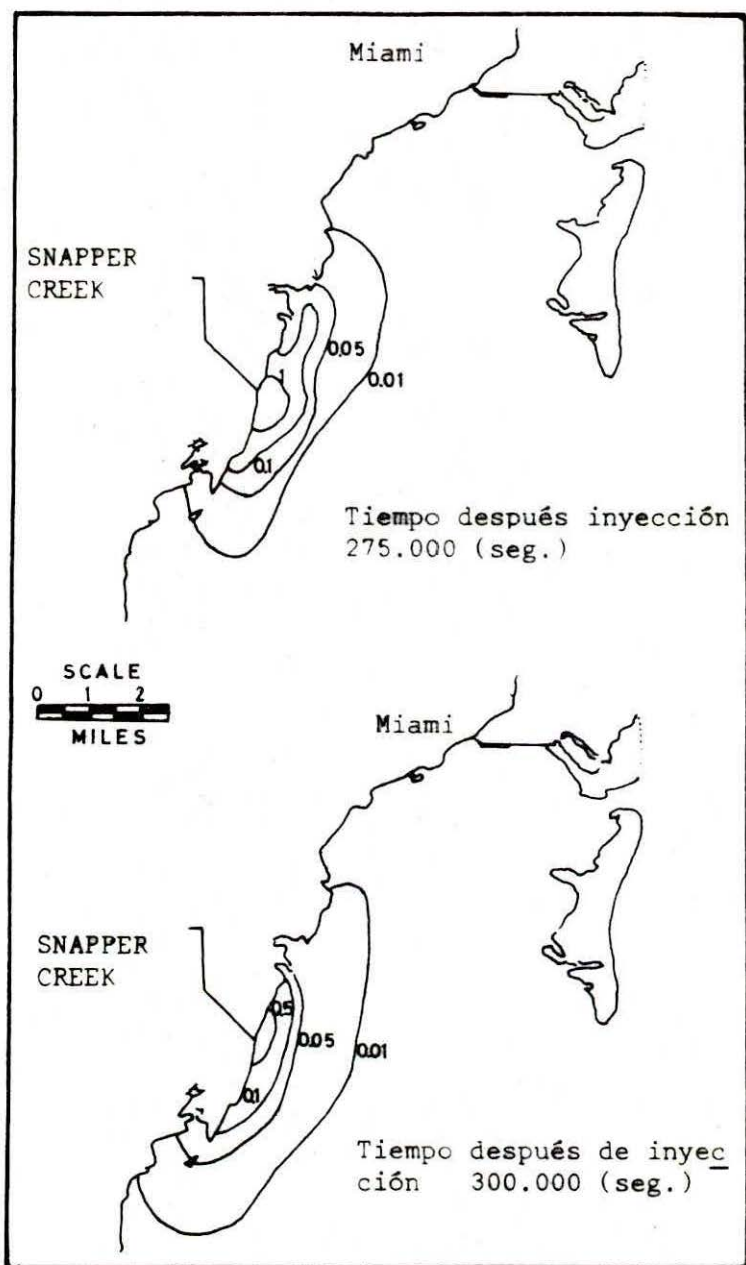


FIGURA 7: Simulación descarga canal Snapper Creek.
 Descarga: Continua, 100 (Kg./seg.)
 Coeficientes dispersión: long = 10, Lat. = 5
 (m²/seg)
 Decaimiento: 2×10^{-5}
 Concentraciones: (Kg./m³)

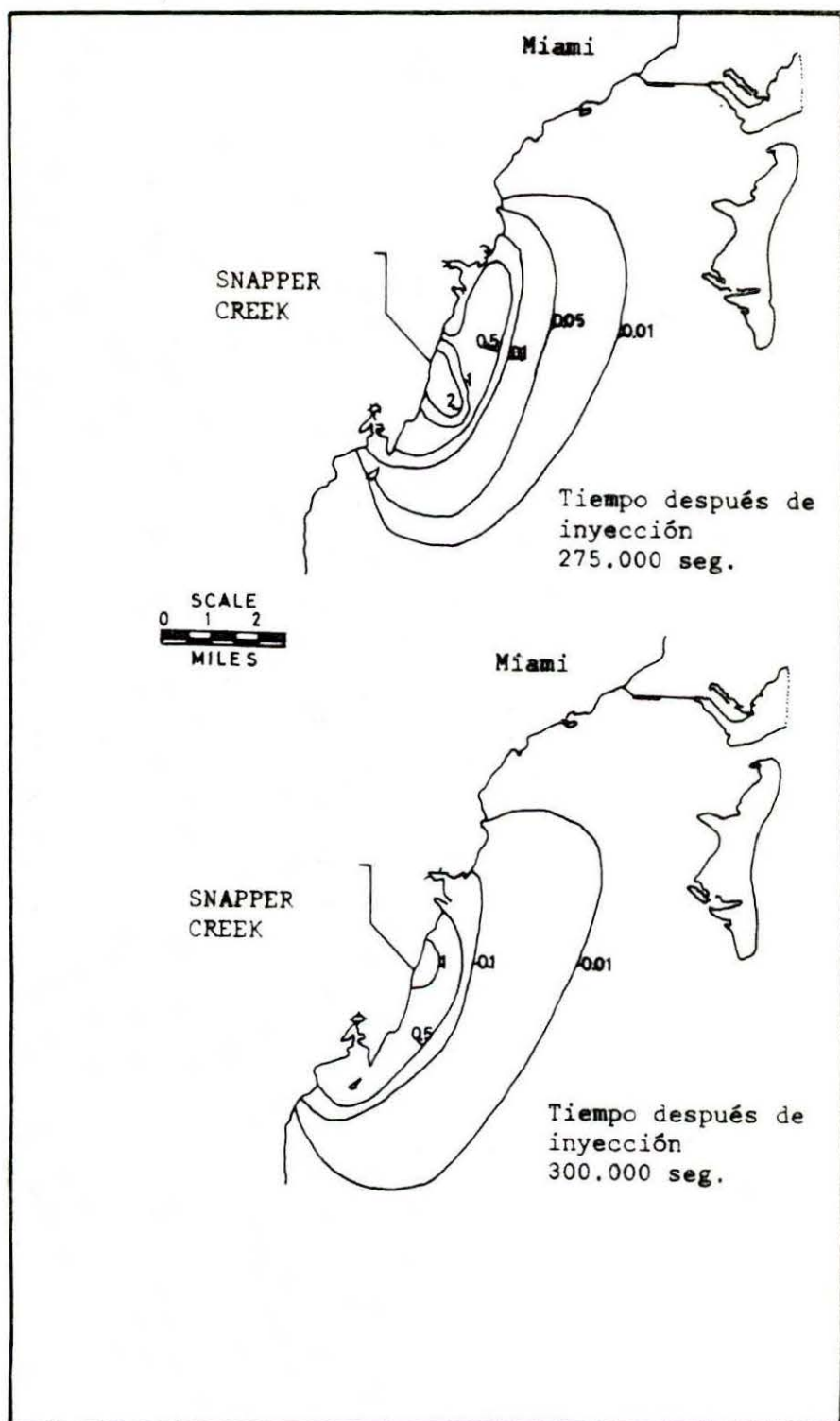


FIGURA 8: Descarga: Contínua, 100 Kg/seg.
Coeficientes: long = 10, Lat = 5
Decaimiento: 10-5

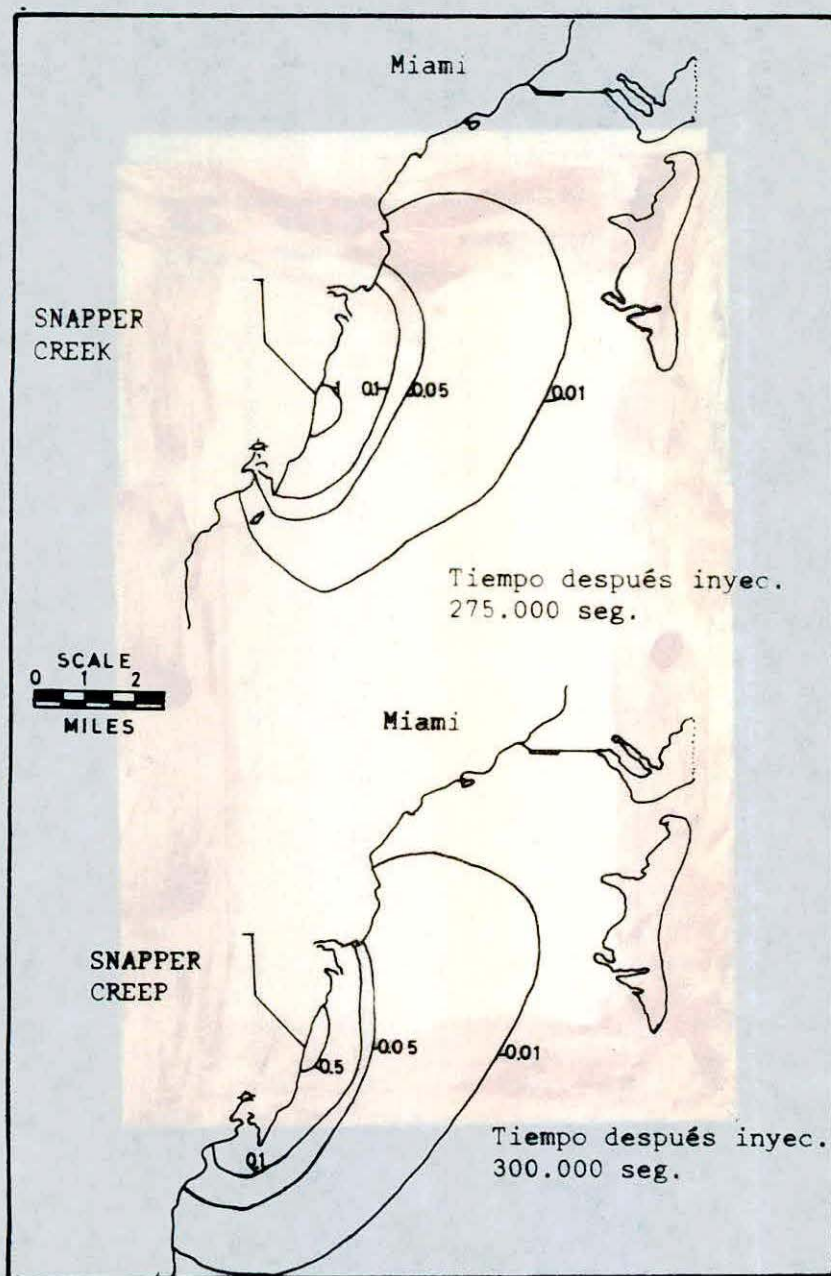


FIGURA 9: Descarga: Contínua, 100 Kg/seg.
Coeficientes: long = 25, Lat = 10
Decaimiento: 10-5

