

USO DE TÉCNICAS NUCLEARES EN LA EVALUACIÓN DE LA CUENCA ALMENDARES-VENTO PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE SUS RECURSOS HÍDRICOS.

Autores: José Luis Peralta Vital¹; Reinaldo Gil Castillo¹; Dennys Leyva Bombuse¹; Leslie Moleiro León²; Manuel Pin³

Colaboradores: J. Carrazana Gonzales¹, E. Capote Ferrera¹, G. Rodríguez Castro¹, N. Martínez Ricardo¹, O. Domínguez Ley¹, O. Ramos Viltres¹, Mery⁴

¹ *Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones. CITMA, Guanabacoa.*

² *Compañía especializada en soluciones integrales geográficas y medioambientales, CESIGMA, Playa.*

³ *Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Ciudad Habana. INRH, Marianao.*

⁴ *Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas (CENHICA).*

2005

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	4
DESARROLLO	6
DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO DE TRITIO EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CUENCA DE VENTO.....	6
Objetivos	6
Geología, geomorfología e hidrogeología.....	6
Hidrología.....	9
Parámetros de diseño de la obra.....	10
Hidrógrafos de avenidas y su transformación en el embalse	10
Precipitaciones	10
Análisis de tendencia y regularidad de las precipitaciones	10
Análisis de lluvias máximas asociadas a fenómenos extremos y su influencia en los volúmenes del embalse	12
Análisis de cotas de inundación y sus posibles afectaciones	13
Volúmenes de infiltración por el vaso del embalse	15
Diseño de la red de monitoreo de tritio	16
Análisis correlatorio y espectral	17
Análisis multivariado (componentes principales y análisis de cluster).....	20
Validación geomorfológica de los resultados	22
Conclusiones del Resultado 1	28
MODELOS DE COMPUTO PARA LA INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS ISOTÓPICOS Y LA ESTIMACIÓN DE LOS BALANCES DE MASA ISOTÓPICOS.....	30
Objetivo específico de la salida planificada.....	30
Resumen	30
Introducción	31
Tritio (³ H). Generalidades	31
Características generales del objeto de estudio (Cuenca Vento).....	36
<i>Geología general</i>	36
Descripción de los modelos seleccionados para la interpretación de los datos isotópicos en la caracterización del agua subterránea	38
<i>Generalidades de los modelos y la modelación</i>	38
<i>Diseño, desarrollo y aplicación de modelos</i>	39
Consideraciones sobre el modelado.....	40
Principales modelos seleccionados.....	40
<i>Modelos de Caja negra</i>	40
<u>Modelo de flujo de pistón</u>	41
<u>Modelo exponencial</u>	43
<u>Modelo combinado de flujo Pistón-Exponencial</u>	44
<u>Modelo de dispersión</u>	44
Aplicación de los modelos	45
<i>Aplicaciones del modelo para casos de entrada constante de trazadores.</i>	45
<i>Aplicación de los modelos para caso de entrada variable de trazadores</i>	45
<u>Método de Tritio</u>	45
<i>Modelo de Compartimento para la simulación del agua subterránea</i>	47
<u>Modelo simple</u>	47
<u>Balance de maza del trazador</u>	48
<u>Flujo transiente</u>	49
<u>Datación</u>	49
<i>Modelo de celdas mezcladas para la simulación del transporte de isótopos ambientales.</i>	50
<i>Modelo de flujo y transporte dinámico en sistemas acuíferos cársicos.</i>	53
<i>Modelo hidrológico</i>	54

<i>Modelo de transporte</i>	56
<i>Modelos determinísticos para la simulación del agua subterránea</i>	56
<u>Balance de masa en los modelos determinísticos</u>	57
<u>Códigos de computo (Software) que incluyen los modelos seleccionados para la interpretación de datos isotópicos y del agua subterránea</u>	58
<u>Software (agua subterránea)</u>	59
<u>Software (Calidad del agua)</u>	60
<u>Software (geoquímico)</u>	60
<u>Software (uso hidrológico general)</u>	60
Conclusiones del Resultado 2	61
CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA VENTO ..	62
Introducción	62
Características generales de la Cuenca Vento.....	63
<i>Geología</i>	63
<i>Relieve. Descripción General</i>	63
<i>Hidrología</i>	64
<i>Hidrogeología</i>	64
<i>Calidad del Agua</i>	65
<u>Parte alta del río Almendares</u>	65
<u>Parte media del Río Almendares</u>	66
<u>Parte baja del río Almendares</u>	67
Características principales del embalse “Ejército Rebelde”	70
Caracterización físico-químicas de las aguas de la Cuenca Almendares-Vento	70
<i>Metodología empleada</i>	70
<u>Métodos y técnicas utilizadas para el muestreo y análisis de agua</u>	70
Resultados obtenidos en el monitoreo de agua de la Cuenca Vento	73
<i>Interpretación de cada uno de los parámetros estudiados</i>	73
<u>Macrocomponentes y parámetros físico-químicos</u>	73
Interpretación de los resultados obtenidos	75
Conclusiones del Resultado 3	76
Recomendaciones	76
APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS NUCLEARES EN LA EVALUACIÓN	77
Tritio en las aguas subterráneas. Fundamento teórico.....	77
<i>Velocidad del pico de 1963</i>	77
<i>Particularidades de la estimación del tiempo de residencia de las aguas subterráneas en el carso</i>	78
Función de entrada: Tritio en las aguas de lluvia	81
Análisis de tendencia y regularidad de las precipitaciones	83
Función de salida: Tritio en las aguas subterráneas.....	85
Modelo de desintegración radioactiva con input conocido.....	88
Piezometría. Relaciones de Saturación.....	90
<i>Modelo exponencial</i>	90
Estudios empleando isótopos estables (^2H y ^{18}O).....	92
<i>Composición isotópica (^2H y ^{18}O) en las aguas de la cuenca Almendares-Vento</i>	94
Conclusiones del Resultado 4	96
APORTE CIENTÍFICO Y SOCIAL	97
CONCLUSIONES FUNDAMENTALES GENERALES	98
RECOMENDACIONES	99
BIBLIOGRAFÍA	100

INTRODUCCIÓN GENERAL

La creciente preocupación por evaluar los posibles impactos de una determinada actividad humana en el medio y el hombre, ha potenciado el desarrollo de diferentes metodologías que permitan determinar el posible riesgo asociado a una práctica cualquiera. La esfera nuclear, en su conjunto, no ha estado alejada de esta preocupación y su inserción en la vida diaria, asociado a un determinado riesgo percibido por el público, a obligado a implementar un grupo de herramientas que permiten estimar dentro de determinados rangos, los posibles impactos de una determinada práctica.

El resultado que se muestra, ha sido obtenido mediante el desarrollo de un Proyecto de Investigación-Desarrollo del Programa Ramal Nuclear, el cual fue financiado por la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada (AENTA). Este proyecto tuvo una duración de 3 años y fue desarrollado en el período comprendido entre los años 2002-2004.

El Proyecto desarrollado “Caracterización del acuífero cársico de la Cuenca de Vento utilizando técnicas nucleares. Propuesta de medidas para su mejor explotación”, siguiendo los 2 primeros objetivos generales de este Programa Nuclear, (Contribuir a la dinamización del desarrollo económico y social del País a partir de las aplicaciones concretas de las tecnologías nucleares y Estimular la integración de las tecnologías nucleares con otras para el impacto económico y social de su aplicación), se enmarca en particular, en el tema del Medio Ambiente físico, con el desarrollo e implantación de métodos analíticos y de evaluación aplicables a los estudios de impacto ambiental para la instauración de paquetes tecnológicos, mediante el uso de técnicas nucleares para la evaluación hidrográfica del País.

El objetivo fundamental de este trabajo, fue el de optimizar la gestión más segura y sostenible de los recursos hídricos de la Cuenca Almendares-Vento, aportándole al principal Gestor (Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Ciudad de la Habana), tomar las necesarias medidas para minimizar la contaminación ya existente, evitar la sobreexplotación, el consumo excesivo y el agotamiento de las fuentes de abasto. La caracterización de este importante reservorio de agua subterránea, fue posible mediante el uso de las técnicas nucleares (determinaciones de las concentraciones de ^3H , ^2H y ^{18}O en aguas subterráneas y superficiales) y la determinación de macro-componentes y parámetros físico-químicos del agua. Se tienen en cuenta, durante la caracterización e interpretación de los resultados, todos los valores obtenidos, las características físicas del lugar en que se ubica el punto de muestreo, los sucesos ocurridos en el momento de la toma de muestra y las características del medio geológico presente en la región de estudio.

Las evaluaciones realizadas, tomaron en cuenta los sucesos y/o eventos más cercanos a la realidad física ambiental de una zona hidrológica de mucha importancia para el país, dada la función social de abastecer y suministrar el mayor volumen de agua ($8,8 \text{ m}^3/\text{s}$), para todos los usos, que consume y utiliza la capital (ciudad de la habana); nos referimos a la cuenca Almendares-Vento, en la cual proponemos el estudio por tratarse de un acuífero cársico, extendido sobre una superficie de 370 km^2 y cuyos recursos hidráulicos subterráneos (estimados en $278 \text{ hm}^3/\text{año}$) exhiben una elevada vulnerabilidad a la contaminación de todo tipo, viéndose manifiesta, en la actualidad, en el deterioro sistemático de la calidad de sus aguas.

RESUMEN

El trabajo muestra la caracterización de los recursos hídricos de la Cuenca Almendares- Vento, evaluándose, tanto las características físico-química del agua subterránea como la estimación de los tiempos de tránsito de estas en el acuífero, mediante la aplicación de técnicas nucleares.

Para el logro de los objetivos propuestos, fueron realizados distintos trabajos investigativos, los cuales por si mismos, constituyen resultados científicos, dado el alcance y nivel de importancia de los mismos para la gestión sostenible de los recursos hídricos de la capital del país. Entre otros resultados, el trabajo muestra en detalle el desarrollo de los siguientes:

- Resultado 1: Definición y optimización de la red de monitoreo. Estudio geo-matemático y estadístico que permitió obtener el Diseño optimo de la Red de monitoreo de las aguas, realizándose este durante un año y de forma mensual en 11 puntos de muestreo.
- Resultado 2: Identificación y selección de los modelos de computo para la interpretación de los datos isotópicos y la estimación de los balances de masa isotópicos de las concentraciones de ^3H en la Cuenca estudiada .
- Resultado 3: Caracterización físico-química del agua en el acuífero. El monitoreo de los parámetros que aportaron nuevos datos a la caracterización de las aguas en su calidad y posibles fenómenos que acontecen, como son los macro componentes químicos (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) en meq/l y mg/l, parámetros físico químicos (conductividad eléctrica, pH, SST).
- Resultado 4: Aplicación de las técnicas nucleares para la caracterización de la dinámica, zonas de recarga, tiempo de residencia los flujos subterráneos del acuífero en estudio, así como la definición de la vulnerabilidad a la contaminación y la zona de protección sanitaria de la Cuenca. Determinación de las concentraciones de Tritio (isótopo radiactivo del agua) mediante la técnica del centelleo líquido, previamente enriquecido mediante el método de enriquecimiento electrolítico y concentraciones de ^2H y ^{18}O (isótopos estables del agua) mediante las mediciones de relaciones isotópicas a través de la espectrometría de masas con triple colector y sistema de introducción múltiple. Las concentraciones fueron determinadas tanto en las muestras tomadas en los puntos representativos, previamente seleccionados, como en el agua de lluvia caída en la región de estudio.

Los resultados físico-químicos mostraron que las aguas subterráneas de la Cuenca clasifican como bicarbonatadas cálcicas. Se observó, en el lado Oeste de la Cuenca, la presencia de contaminación, ya sea por intrusión salina o por acción antrópica. Los valores anómalos obtenidos en el Embalse “Ejército Rebelde”, demuestran que este es una importante fuente de alimentación de aguas contaminadas a la Cuenca.

Para la interpretación de los datos del Tritio, luego de un estudio de los posibles modelos de computo a utilizar, fue seleccionado el “Modelo de desintegración radioactiva con input conocido”, para el cual fueron definidos sus funciones de entrada y salida. Los resultados de la técnica nuclear empleada, permitieron identificar, en tan importante Cuenca, las mezclas de agua, zonas de recarga del acuífero, áreas de vulnerabilidad a la contaminación, zonas susceptibles a la explotación del recurso, lográndose además definir incertidumbres hidrogeológicas referentes a la función de la Presa Ejército Rebelde. Se logró además corroborar los resultados obtenidos a partir el tritio, con los obtenidos mediante la interpretación de los isótopos estables. Se demuestra la efectividad del empleo de las técnicas nucleares para la evaluación de la sostenibilidad de la gestión de los Recursos hídricos.

DESARROLLO

DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO DE TRITIO EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CUENCA DE VENTO

Objetivos

Satisfacer el primer resultado del Proyecto destinado al Diseño de la Red de Monitoreo de Tritio en la cuenca. Para ello, se completaron las etapas siguientes [58]:

- Búsqueda bibliográfica de la información existente sobre las características geológicas, químicas, ingeniero-geológicas e hidrogeológicas de los acuíferos cársicos de la Cuenca y su asentamiento.
- Completamiento de la información general y detallada necesaria y no existente.
- Caracterización de las variables meteorológicas importantes para el análisis.
- Selección de puntos primarios de muestreo para análisis de laboratorio en agua y roca.

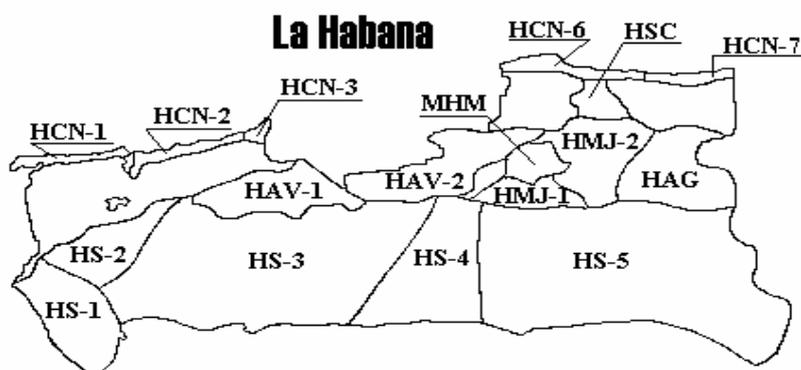


Fig. 1. Mapa de la provincia de La Habana mostrando las cuencas Vento (HAV-1).

Geología, geomorfología e hidrogeología

La Cuenca Almendares–Vento (Ver Figura1), [29,81,90,101], está conformada por sedimentos carbonatados, carbonatados terrígenos y terrígenos del Mioceno Inferior (representado por las formaciones Guíñes, Husillo, Cojímar y Jaruco) y compuesto sedimentos areno-arcilloso, arcillas y depósitos lacustres del Cuaternario. Desde el punto de vista estructural constituye una cuenca de base Paleogénica rellena por potentes series de sedimentos Neogénicos, en la que se ha desarrollado una llanura denudativa de edad $N_{2-3} Q$.

La geomorfología (Ver Figura 2) de la cuenca la caracteriza como una región de llanura estructuro-fluvial, *carsificada*, cuya altitud disminuye desde los bordes hacia el interior; por ejemplo, desde cota de +90 a +100 m al SW, en el área de Santiago de las Vegas, o desde cota de +120 a +130 m cerca de Tapaste, hasta una cota de +60 a +70m, o menos, hacia el centro en Boyeros. En la región predominan las pendientes planas (hasta 1^0) y de llanuras onduladas (3^0).

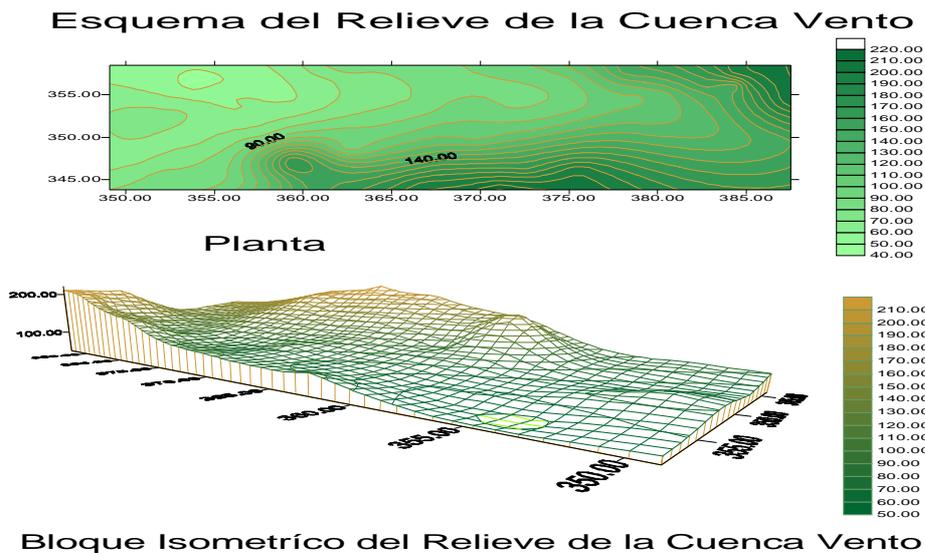


Fig. 2. Esquema del relieve de la Cuenca de Vento

Está regada por el sistema fluvial del Río Almendares, que le da nombres, y sus afluentes Limón, Lechuga, San Francisco, Chico, Pancho Simón y otros. En las inmediaciones de los poblados de Managua y Cuatro Caminos se encuentran dolinas y otras depresiones cársicas – sufosivas, que se inundan en épocas de lluvias, por lo que constituyen dolinas lacustres (Ver Figura 3).

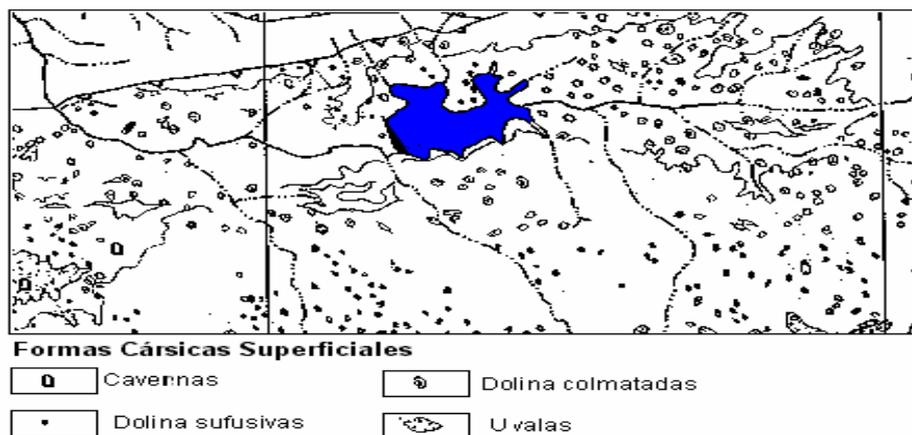


Fig. 3. Campos de dolinas de la parte central de la Cuenca de Vento

La cuenca es un polje [78,79,81,83,85], en cuya porción oriental se alcanzan algunos mogotes aislados como las Lomas de Somorrostro, Bejucal (+200 m) y la Serranía de Tapaste (+152 m).

En el fondo del polje se encuentran depósitos lacustres del Pleistoceno Superior, correspondientes a la posible extensión de la laguna Ariguanabo pre-actual. De acuerdo con su comportamiento hidrodinámico la región constituye un holocarso bien evolucionado [78]. En la región, E. Flores ha reconocido hasta 10 niveles de cavernamiento, que se desarrollan entre las cotas de + 125 m a + 110 m; en el vaso de la presa se reportaron cavernas entre las cotas 0 y + 50 m. La zona de mayor intensidad de la carsificación en el embalse la tiene el hombro izquierdo (Ver Figura 4). La Figura 5, muestra las direcciones medias de flujo subterráneo.

En superficie, la carsificación se manifiesta por gran diversidad de formas en la que predominan las dolinas sufosivas (por hundimiento de cavernas), dolinas colmatadas (reellenas por sedimentos no consolidados), y dolinas lacustres (inundadas por las aguas subterráneas).

Los más importantes parámetros hidrogeológicos, se ofrecen a continuación:

- Transmisividad entre **1000-5000 m² /d**
- Permeabilidad entre **15-200 m/d**
- Espesor de la zona no saturada entre **0 - 25 m**
- Espesor de la zona saturada **80 - 200 m**
- Nivel Estático el 90% menor a **25m**
- Potencia entre **300- 400 m**

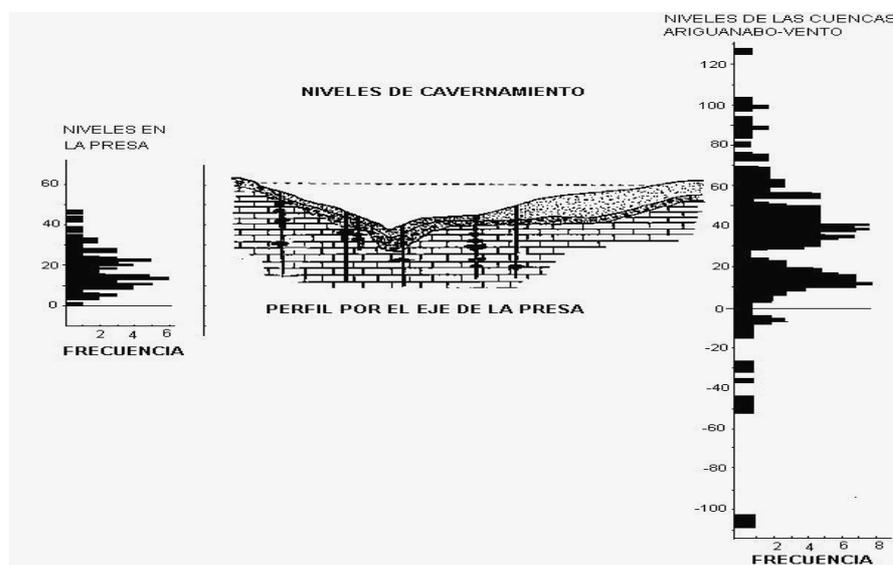


Fig. 4. Niveles de cavernamiento en la cuenca de Vento (según Flores, s/f)

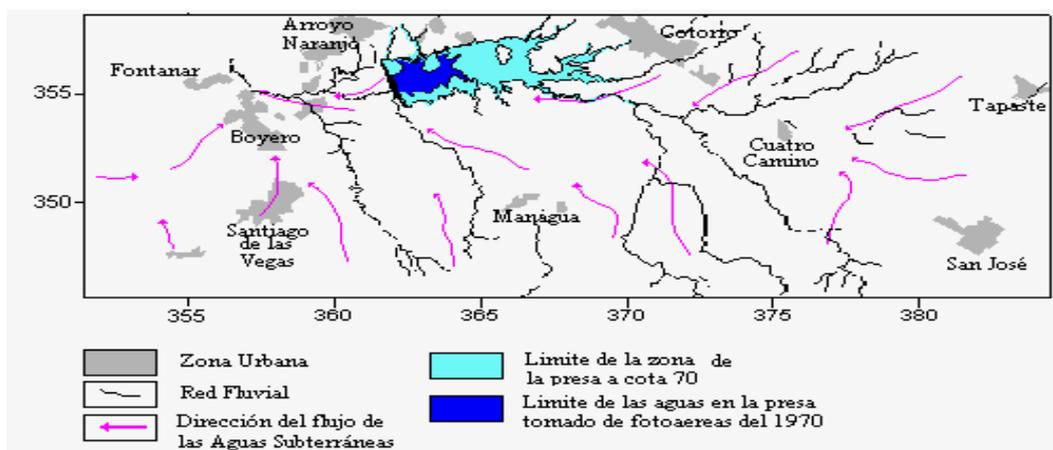


Fig. 5. Direcciones promedio de flujo subterráneo en la Cuenca de Vento

En el área de la presa los valores se comportan de la forma siguiente (la transmisividad entre 1000-5000 m² /d; la permeabilidad entre 15-200 m/d; el espesor de la zona no saturada entre 0-25 m, el espesor de la zona saturada 80-200 m; el nivel estático el 90% menor a 25m; la potencia entre 100-200 m.

Los caudales específicos en toda la cuenca oscilan entre 10 – 50 a 100 l/s x m de abatimiento, y las relacionados con los complejos carbonatados-terígenos (margas) del orden de los 5 l/s x m de abatimiento. La oscilación anual de los niveles de las aguas subterráneas es del orden de los 2- 4 m hasta 5 m. La amplitud máxima registrada es de 8 – 9 m para muchos años. Las Figuras 6 y 7 muestran, como ejemplo los espesores de la Zona no saturada y las hidroisohipsas del período seco de 1984.

Mapa de la potencia de la zona no saturada

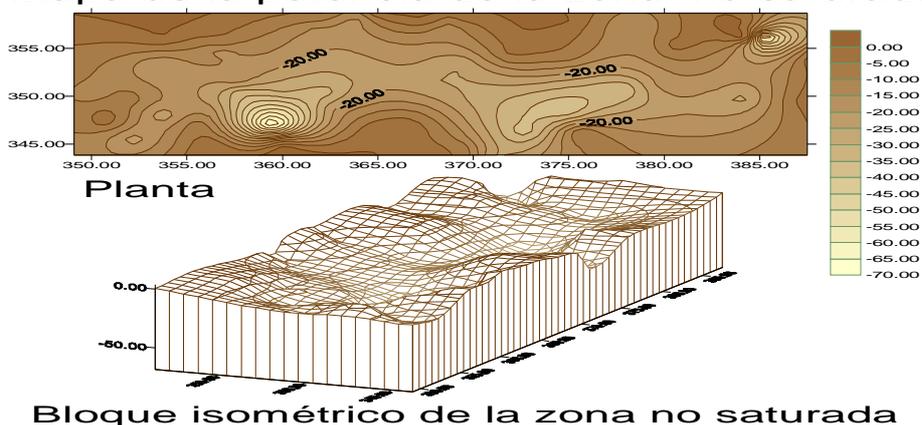


Fig. 6. Potencia de la Zona No Saturada del acuífero (1984)

Hidroisohipsas de periodo seco (abril 84)

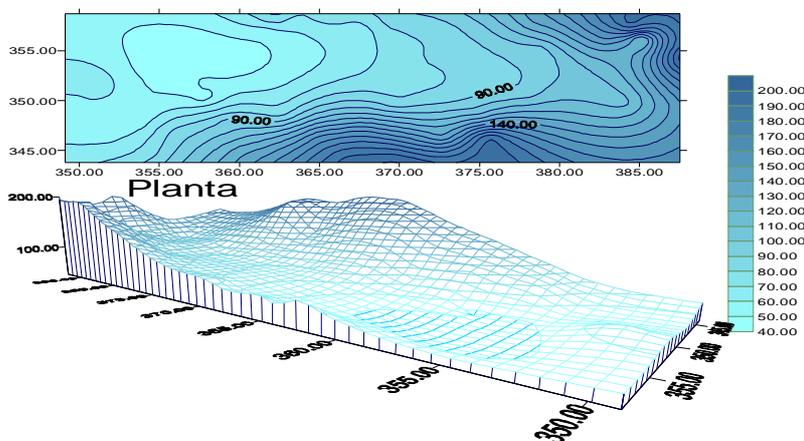


Fig. 7. Hidroisohipsas del período seco de 1984.

Hidrología

Para el desarrollo de este capítulo se realiza un estudio del escenario hidrológico de la cuenca del río Almedares, hasta el cierre de la presa Ejército Rebelde. En la Tabla 1, se presentan los parámetros principales del embalse. En las inmediaciones de la presa Ejército Rebelde se localiza un tramo de la calle 100, la cual se encuentra en la cota 61.00 m del embalse, por debajo del nivel de operación en cota 66.00 m. Por esta razón, esta calle se ha inundado en aquellas ocasiones que el nivel del embalse ha superado la cota de 61.00 m [82]. Para un análisis del cierre del embalse se calculan los valores de escurrimiento máximo de las avenidas de diseño, teniendo en cuenta que estamos en presencia de una obra de Categoría I, según legislaciones vigentes (Tabla 2).

Tabla 1. Parámetro del Conjunto Hidráulico Ejército Rebelde, cierre hidrométrico seleccionado para este estudio

Parámetros	Valores
Cota NM (m)	53,05
Cota del Nivel de Operación (m)	66,00
Cota NAM para 1 % de probabilidad (m)	71,45
Cota NAM para 0,1 % de probabilidad (m)	72,90
Cota cimacio aliviadero (m)	70,50
Volumen muerto (Hm ³)	1.0
Volumen útil (Hm ³)	51.0
Volumen en la cota del nivel de operación (Hm ³)	52.0
Volumen en el NAM para 0.1 % de probabilidad (Hm ³)	131.0
Volumen en la cota de la cresta del vertedor (Hm ³)	97.4
Reserva entre la cota del nivel de operación (66.00 m) a la cota del cimacio del aliviadero (70.50 m).	4.5 m con volumen de 45.8 Hm ³

Tabla 2. Parámetros del escurrimiento máximo.

Escurrecimiento máximo de avenidas			Parámetros de diseño de la obra			
Prob. (%)	Q _{máx.} (m ³ /s)	Volumen (Hm ³)	Prob. (%)	Cota (m)	Carga aliv. (m)	Q _{transf} (m ³ /s)
1	1100.0	57.6	1	71.45	0.95	268.0
0.1	2260.0	78.8	0.1	72.90	2.40	1136.0
0.01	4350.0	140.0				

Hidrógrafos de avenidas y su transformación en el embalse

Los hidrógrafos de avenidas y su transformación en el embalse, representan la variación de los caudales o volúmenes de las avenidas en el tiempo para las probabilidades del 0.1, el 1 y el 10 %. La determinación de los parámetros que se presentan son imprescindibles para dimensionar sistemas que permitan el control de inundaciones en zonas aledañas a la presa, como es el caso del vertedor del aliviadero, el cual fue diseñado para una probabilidad del 1%.

Precipitaciones

Para el análisis del comportamiento del régimen pluviométrico de la cuenca del río Almendares hasta el cierre del embalse Ejército Rebelde, se ha tomado como patrón la serie de 63 años del pluviómetro Hb-26 (período 1937-1999), ubicado en las coordenadas Norte - 350.4 y Este - 376.4. Este pluviómetro es considerado uno de los más representativos de la cuenca ya que está localizado en la cabecera del embalse y tener la mayor longitud de serie entre los pluviómetros evaluados (Hb-26, Hb-303, Hb-126).

Análisis de tendencia y regularidad de las precipitaciones

En el análisis de series de cualquier índole existen criterios por los que se hace necesario regirse, los fundamentales en hidrología son: la tendencia y la regularidad. La tendencia de una serie de precipitaciones depende del período de tiempo que se esté analizando y esta puede manifestarse como un incremento o una disminución de valores. La regularidad consiste en la frecuencia con que se presentan los años húmedos y los años secos consecutivos. En la Figura 8, se muestran las desviaciones de la lluvia anual respecto al valor promedio P_0 de 1588 mm para la serie pluviométrica escogida. Sobresalen dos períodos representativos de 30 a 31 años, donde se

alternan años húmedos y años secos. El primero de ellos se extiende desde 1937 hasta 1968, con tendencia a ascender, y el segundo, de 1968 hasta 1999, con tendencia a descender.

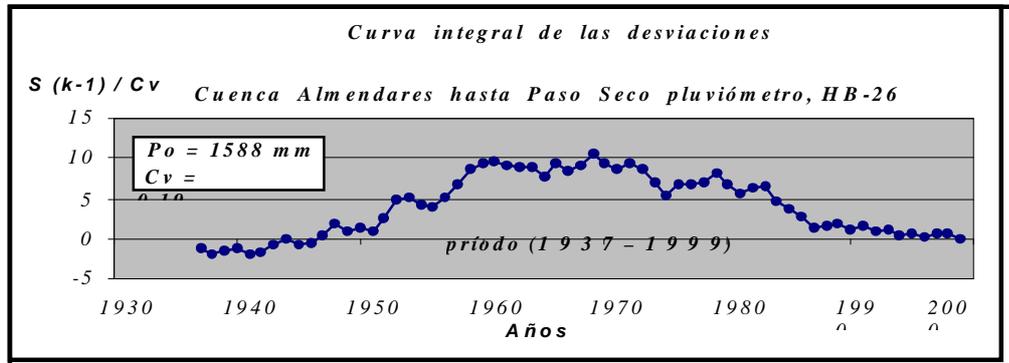


Fig. 8. Desviaciones de las precipitaciones

La Figura 9, muestra las desviaciones transformadas a láminas (mm). La regularidad observada muestra que de 1937 a 1962, la frecuencia de años consecutivos húmedos es 2 – 3 y secos de 1 – 2. A partir de 1963 el comportamiento del régimen se modifica, con una tendencia no sólo al aumento del número de años consecutivos por debajo del valor promedio de la cuenca, sino al aumento de la magnitud de las láminas (período seco).

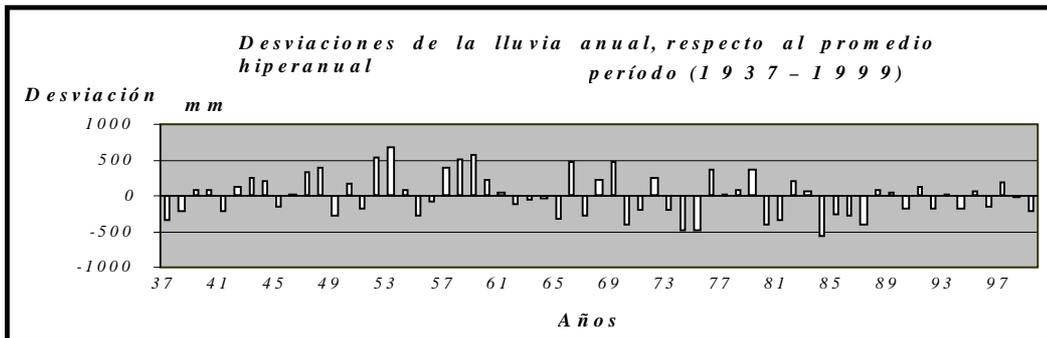


Fig. 9. Lámina de las desviaciones

Los déficit que se representan en la Figura 9, como regla, no son superados por las láminas de los años subsiguientes. Por ejemplo, el comportamiento desde el año 1973 hasta el año 1975 presenta un déficit acumulado ascendente de -1190 mm, valor que no es superado por el acumulado de los 4 años posteriores que fue de sólo 834 mm por encima de la media. El período de 1984 a 1987 (años secos) muestra un déficit sumario de -1546 mm, aproximadamente la misma lámina de lluvia que como promedio debe precipitar en la cuenca en un año (1588 mm). Los dos años siguientes (1988 y 1989) fueron húmedos, pero el acumulado de las láminas por encima del valor promedio o norma de la cuenca, fue sólo de 111 mm; este valor no suple el déficit de los años secos que le anteceden.

La Figura 10, muestra la tendencia descendente de las desviaciones de la lluvia anual respecto a la lluvia media en el período de 33 años, comprendido entre 1967 y 1999.

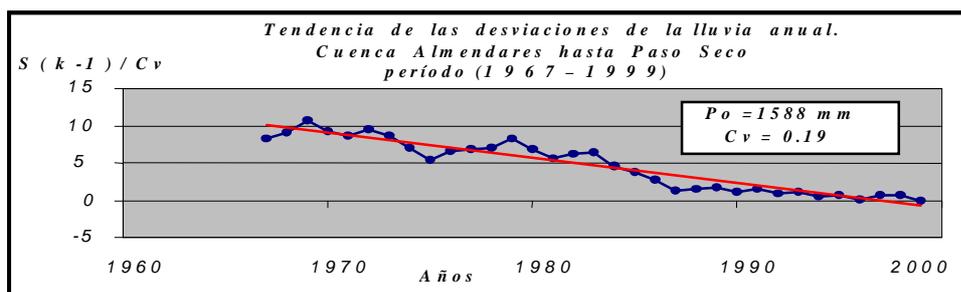


Fig. 10. Tendencia de las desviaciones de la lluvia

En la Figura 11, se aprecia que el comportamiento anual de lluvia, a partir del 1988, se regulariza y la tendencia promedio se caracteriza por la alternancia de años húmedos y secos consecutivos.

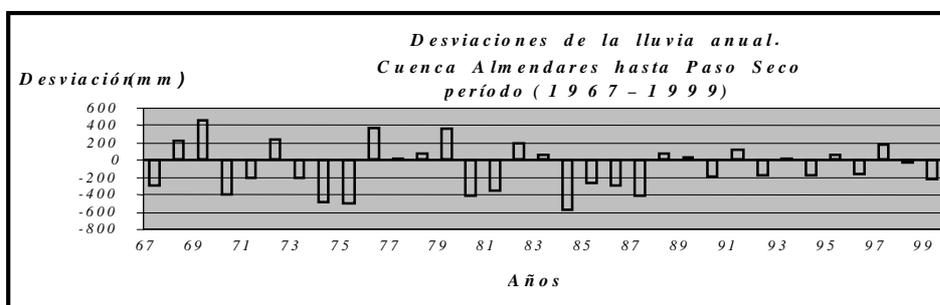


Fig. 11. Desviaciones de la lluvia anual

Análisis de lluvias máximas asociadas a fenómenos extremos y su influencia en los volúmenes del embalse

La Tabla 3, muestra las láminas de lluvia (pluviómetro HB – 26) para los años correspondientes a los eventos extremos, la fecha en que ocurren, así como las cotas iniciales y finales de cada uno (registro de niveles del embalse). Todos los volúmenes que se presentan en esta Tabla, fueron determinados mediante la curva del embalse, y la variación de estos volúmenes durante la avenida, dieron como resultado el gasto promedio.

Tabla 3. Eventos pluviométricos extraordinarios

Año	Lámina anual (mm)	Evento extremo Fecha Día/mes	Respuesta del embalse en 24 horas					
			Cotas (m)		Volúmenes (Hm ³)			Q _{prom} Avenida (m ³ /s)
			inicial	Final	inicial	final	Dif.	
1969	2048	1 - 2/10	63.93	64.14	37.166	38.552	1.386	16.0
1972	1827	17 - 18/06	58.10	61.05	10.70	21.225	10.525	122.0
1979	1946	9 - 10/09	58.60	67.22	12.20	62.034	49.834	576.0
1980	1171	30/04 - 1/05	57.92	61.72	10.174	24.150	13.976	162.0
1982	1784	18-19/06						

La avenida provocada por el huracán Frederick en Septiembre de 1979, produjo en 8 días un incremento de volumen en el embalse de 66.94 Hm³, de lo cual se infiere un gasto promedio, en ese lapso de tiempo, de 96.8 m³/s. En el año 1982 se produjeron dos fenómenos extraordinarios en 11 días, el ciclón Alberto y una onda tropical, los cuales afectaron la cuenca y ocasionaron

incrementos notables en los volúmenes del embalse. Sin embargo, no se cuenta con datos que posibiliten la determinación de esos incrementos así como los correspondientes gastos de las avenidas asociadas.

Análisis de cotas de inundación y sus posibles afectaciones

En el análisis del problema de las posibles afectaciones por inundaciones, hay que tener en cuenta que a partir de la construcción del embalse se ha producido la expansión de objetivos económicos, sociales, y preferentemente habitacionales, los que de forma anárquica han llegado a ocupar áreas de potencial peligro que se encuentran dentro de los niveles de inundación tanto aguas arriba como aguas abajo de la presa. La Tabla 4, muestra los niveles máximos más significativos registrados entre los años 1969 -1996 y se comentan los casos extremos para las probabilidades del 10, el 1 y el 0.1 %.

Tabla 4. Niveles significativos de la Presa Ejército Rebelde

Año	Nivel (m)	Volumen (Hm ³)
1969	64.14	38.55
1972	62.98	31.28
1976	61.54	23.43
1979	68.90	79.14
1982	66.96	57.58
1983	62.30	27.27

Tomando como base a los parámetros de diseño referidos en la Tabla 1, se muestran a continuación los casos extremos siguientes:

Caso 1: Si el embalse recibe una avenida del 1 % de probabilidad (57.6 Hm³) estando en la cota 66.00 m (nivel de operación), alcanza una cota 71.45 m y un volumen de 109.6 Hm³. Esta avenida produce vertimientos con un gasto máximo de 268.0 m³/s, como se puede apreciar en la curva de capacidad de servicio del vertedor (Ver plano de Curva de Capacidad de Servicio)

Caso 2: Si estando el embalse en esa misma cota 66.00 m la avenida fuera del 0.1 % de probabilidad (78.8 Hm³), entonces alcanza la cota 72.90 m y un volumen acumulado de 130.8 Hm³. Para este caso el gasto máximo de vertimiento es de 1136.0 m³/s.

De acuerdo con la Tabla 4, la frecuencia promedio de ocurrencia de eventos extremos que han afectado a la cuenca Almendares, es de 1 cada 5 años, trayendo como consecuencia la afluencia de notables volúmenes al embalse.

Las cotas máximas referidas en los casos citados, producen inundaciones considerables, producto del incremento de los niveles y por ende del área de espejo en el embalse ubicado en Paso Seco. Esta situación implica que los volúmenes de vertimiento sean superiores a la capacidad de evacuación de las obras de fábrica y de algunos tramos del río Almendares aguas abajo de la presa, además de reportar un peligro potencial para variados objetivos económicos, sociales y residenciales que se encuentran ubicados en una cota menor.

Aguas arriba: El área de inundación del embalse está habitada (parte del Reparto Eléctrico) y cubre además un tramo de calle 100, así como algunos objetivos económicos (Ver mapa de cotas de inundación).

Aguas abajo: Se afecta el área comprendida por el Parque Lenin, el poblado de Calabazar y algunas zonas críticas, donde el río Almendares provoca inundaciones, como es el caso del puente de Coppelia, localizado en la avenida de Boyeros.

La ausencia de información sobre la presa Paso Sequito y fundamentalmente de su vertedor, hace temer que tales caudales puedan producir inundaciones considerables en el área del Parque Lenin (entre Paso Seco y Paso Sequito). El vertedor de ésta tiene una longitud de 130.0 m y una diferencia entre el NAN (cota 49.94 m) y el NAM para el 1 % de probabilidad (cota 50.77 m), de aproximadamente 0.83 m. Estas dimensiones no aseguran que el vertedor evacue un vertimiento de la presa Ejército Rebelde, para una avenida del 1 %, pero tampoco descarta la posibilidad de que esto ocurra.

El gasto de vertido del aliviadero de la presa antes mencionada, para una probabilidad del 1 %, es de 268 m³/s, valor que supera al gasto de vertido del aliviadero de Paso Sequito para la misma probabilidad (158.12 m³/s). A priori, esto significa que el aliviadero de Paso Sequito no es capaz de evacuar el vertimiento de la presa Ejército Rebelde. Sin embargo, en Abril del año 2000 se entregó por la obra de toma de la presa Ejército Rebelde un volumen de aproximadamente 4.0 Hm³, de los cuales solamente llegaron a Paso Sequito 0.25 Hm³, según versión oral de técnicos de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Ciudad de la Habana.

Este hecho evidencia la capacidad de infiltración de la zona comprendida entre ambos embalses, que pudiera no hacer tan crítico lo aseverado en el párrafo anterior. Por las afectaciones que se producirían, tanto aguas arriba como aguas abajo de la presa, se recomienda el no vertimiento de la misma, por lo que se hace necesario regular a partir de una cota determinada el embalse. En la Figura 12, se presentan los niveles máximos alcanzados por el embalse en el período comprendido entre (1969 - 2000).

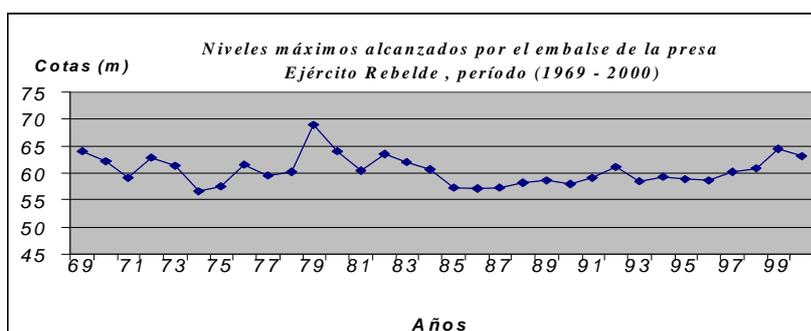


Fig. 12. Niveles máximos reportados en el Conjunto Hidráulico Ejército Rebelde.

La Tabla 5, muestra la frecuencia en que ocurren los niveles más altos en el embalse, para un período aproximado de 30 años.

Tabla 5. Frecuencia de niveles altos en el Conjunto Hidráulico Ejército Rebelde.

Cotas (m)	Ocurrencia	Frecuencia
> 64.00	4	2 / 15 años
> 63.00	6	1 / 5 años
> 62.00	10	1 / 3 años

Para el caso de la cota 64.00 m, el embalse alcanza un volumen de 57.6 Hm³ y al recibir una avenida del 1%, el mismo acumularía un volumen de 95.2 Hm³ alcanzando la cota 70.30 m, lo que garantiza que no se produzcan vertimientos. Para el caso que reciba una avenida del 0.1% el volumen sería de 116.4 Hm³ para una cota de 71.89 m y por tanto un vertimiento sería inevitable.

Si el embalse estuviera en cota 63.00 m el mismo tendría un volumen de 32 Hm³ y al recibir una avenida del 1% (V = 57.6 Hm³), alcanzaría un volumen de 89.6 Hm³ lo que representa una cota de 69.85 m, la cual garantiza el no vertimiento; aunque si se produce una avenida del 0.1% el volumen acumulado sería de 110.8 Hm³ para una cota de 71.50 m.

En la cota 62.00 m se alcanza un volumen de 25 Hm³. Si el embalse recibiera una avenida del 1% se acumularía un volumen de 82.6 Hm³ alcanzando una cota de 69.25 m por lo que no se produce vertimiento. Dado el caso en que se produzca una avenida del 0.1% el volumen ascendería a 103.8 Hm³ para una cota de 71.05 m. Para todos los casos, si se producen avenidas del 0.1% traen consigo un vertimiento por el aliviadero.

Volúmenes de infiltración por el vaso del embalse

La base de los cálculos corresponden a los cálculos preliminares del proyecto reportados en el informe realizado por Talikov y Luege, que lo estiman en 7.345 Hm³/mes, como valor de la recarga promedio del embalse a la cuenca Vento. Este resultado fue obtenido del cálculo del balance hídrico asumiendo valores de las componentes para un año hidrológico medio, para una amplitud de los niveles entre las cotas 61.00 m y 66.00 m. La magnitud de la recarga reportada por Bruno corresponde al balance realizado para el intervalo de tiempo comprendido entre el 2 y el 23 de octubre de 1969. Como gasto promedio de infiltración para ese período el autor reporta 3.09 m³/s, valor que representa un volumen de 5.873 Hm³/mes.

Por su parte, los resultados de Llanusa y Moussa se avalan por el empleo del modelo AQUIMPE, con el que se resuelve la ecuación de flujo del agua subterránea para régimen impermanente bidimensional utilizando el método de Elementos Finitos. El período de simulación empleado abarca desde Noviembre de 1983 hasta Abril de 1985 (2 años y medio). El valor del promedio de recarga obtenido para dicho período es de 3.68 Hm³/mes para una amplitud de cotas en entre 55.86 m y 61.35 m; este valor se aleja del cálculo preliminar de proyecto Talikov y Luege en 3.665 Hm³/mes.

Llanusa y Moussa cita en su estudio a Batista y Pin, dando como referencia un valor de 5 Hm³/mes como volumen de infiltración calculado al inicio de la construcción de la presa; este valor lo contrasta con la recarga calculada en su trabajo (3.68 Hm³/mes), de lo que se concluye que los volúmenes de infiltración del embalse han disminuido. En la Tabla 6, se resumen los valores de recarga reportados en las referencias citadas.

Tabla 6. Valores de recarga determinados por diferentes autores.

Referencia	Amplitud de niveles (m)	Carga Promedio (m)	Infiltración promedio (Hm ³ /mes)	Diferencia respecto a (Talikov y Luege)
Talikov y Luege (1968)	61.0 - 66.0	5.0	7.345	-
Bruno, L. (1969)	62.74 - 64.17	1.43	5.873	-1.472
Batista y Pin (1996)	-	-	5.0	-2.345
Llanusa y Moussa (1997)	55.86 - 61.35	5.49	3.68	-3.665

Para una aproximación preliminar en cuanto a la aparente disminución de los volúmenes de recarga del embalse, tomando como base los resultados comparados en la Tabla anterior, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

La diferencia de $-1.472 \text{ Hm}^3/\text{mes}$ entre el balance de Bruno y el de Talikov es comprensible debido a que el valor obtenido por Bruno corresponde a 22 días, con una amplitud de niveles de 1.43m entre los valores mínimo y máximo. Las diferencias entre las amplitudes de los niveles de uno y otro balance son, en valores absolutos, de 1.74 m para el mínimo y de 1.86 m para el máximo, por lo que también hay que tener en cuenta el área de espejo que esto representa.

Para la diferencia de $-3.665 \text{ Hm}^3/\text{mes}$, los valores de la carga promedio en los balances de Llanusa – Moussa y de Talikov son semejantes; sin embargo, entre las amplitudes de los niveles extremos de uno y otro, las diferencias en valores absolutos son de 5.14 m para el mínimo y de 4.65 m para el máximo, lo cual le adiciona al factor área de espejo de agua, un mayor peso en el análisis.

Se afirma que los volúmenes de infiltración por el vaso del embalse han disminuido desde su construcción hasta la fecha, lo cual puede o no asegurarse. Hasta tanto no se disponga de datos confiables de balance hídrico, de conjunto con el análisis espacial del cavernamiento asociado a las amplitudes de los niveles del embalse, no se podrá evaluar con exactitud la colmatación de éste y por lo tanto, tampoco los volúmenes de recarga. Esto se justifica porque en 1968, año en el cual Talikov y Luege realizan el Informe Hidrogeológico preliminar sobre la presa Ejército Rebelde, llueve poco más de 200 mm por encima del valor medio anual en 63 años (1588 mm). Sin embargo, en el período analizado por Llanusa y Moussa (Noviembre de 1983 – Abril de 1985), se registra un déficit de lluvia con respecto al valor medio de aproximadamente 800 mm. Por tanto, Talikov y Luege analizaron la recarga en un año húmedo, mientras que Llanusa y Moussa lo hicieron para un período seco.

Talikov y Luege determinaron la capacidad de recarga con una amplitud de niveles entre 61.00 m y 66.00 m, resultando una carga promedio de 63.50 m. Por otra parte, Llanusa y Moussa trabajaron con una amplitud de niveles entre 55.86 m y 61.35 m, resultando una cota promedio de 58.61 m que significa una carga hidráulica menor a la citada anteriormente.

Diseño de la red de monitoreo de tritio

La red informativa (mensual) **actual** consta de doce pozos que son:

HV-19; HV-28; HV-29; HV-39; HV-431; HV-645; HV-648; AL-3; AL-4; AL-5; AL-6; AL-7.

De un primer análisis con la serie completa de los datos se decidió **no incluir** en el estudio los pozos HV-39 y HV-648, ya que presentaban una serie de datos muy corta e incompleta que provocaba datos faltantes e imprecisiones en el análisis de la serie temporal. Con un total de 10 pozos se conformó una serie congruente, con la máxima información posible, que data de enero 1982 hasta diciembre del 1994.

El limnigrama de la Figura 13, muestra el comportamiento de los niveles para los 10 pozos de la red en el período escogido y fue una de las vías para la validación de las series, identificando valores y comparándolos con los comportamientos de otros pozos en la fecha deseada. Una vez obtenida una base de datos congruente y validada, de 13 años de longitud, se analizó su

comportamiento y se identificaron las características y propiedades de la misma a través de diferentes técnicas estadísticas [96,98].

Análisis correlatorio y espectral

En el trabajo con bases de datos de comportamientos similares, uno de los primeros pasos a seguir es el análisis correlatorio para obtener las relaciones de las series de niveles en cada punto de observación. Mediante el análisis correlatorio es posible estudiar cuantitativamente la existencia de componentes periódicas o estacionales en la serie con el objeto de retener la componente estacionaria de la misma [86, 87].

La **matriz de los coeficientes de correlación lineal** ha sido interpretada siguiendo el criterio de buenas relaciones, es decir significativas cuando menos al 95% y con valores mayores de ± 0.6 del coeficiente de correlación lineal, y es la que se muestra en la Tabla 7.

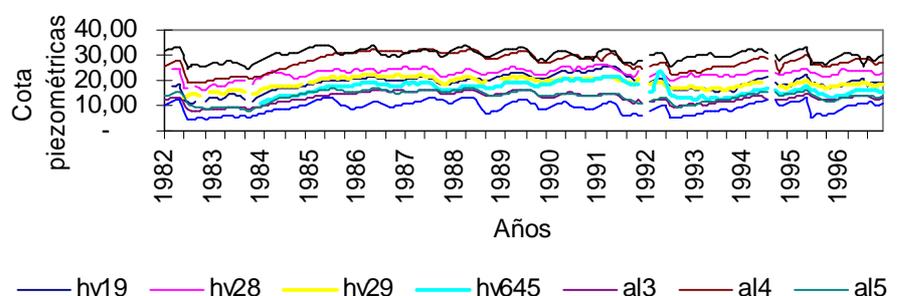


Fig. 13. Variación de los niveles de agua subterránea de los pozos de la red actual de monitoreo

Tabla 7. Matriz de los coeficientes de correlación lineal

	HV-19	HV-28	HV-29	HV-431	HV-645	AL-3	AL-4	AL-5	AL-6	AL-7
HV-19	1	0.78	0.12	0.95	0.94	0.66	0.64	0.52	0.39	0.19
HV-28		1	0.24	0.82	0.74	0.71	0.68	0.56	0.54	0.46
HV-29			1	0.31	0.19	0.65	0.71	0.75	0.59	0.50
HV-431				1	0.92	0.80	0.78	0.69	0.55	0.38
HV-645					1	0.66	0.66	0.54	0.41	0.18
AL-3						1	0.98	0.92	0.81	0.56
AL-4							1	0.94	0.80	0.57
AL-5								1	0.88	0.67
AL-6									1	0.80
AL-7										1

Como se observa, la correlaciones más bajas están entre los pozos AL-5, AL-6 y AL-7 con los restantes; es decir, se presentan comportamientos distintos con el resto de la serie. La Tabla 8, muestra diferentes estadígrafos para cada pozo durante el período de estudio. El **autocorrelograma** es otra de las técnicas estadísticas utilizadas para la caracterización de la serie, ya que brinda información relacionada con la modulación de la respuesta del sistema a los estímulos, es decir, el tiempo que dura la influencia de estímulos externos sobre el sistema (efecto de memoria), así como la ciclicidad de la serie, entre otras [96,98]. El sistema cársico, por definición, puede asimilarse a un filtro que modula y permite pasar, en mayor o menor medida, la información de entrada, toda vez que los caudales y niveles piezométricos pueden definirse como realizaciones de una variable aleatoria pero cuya evolución en el tiempo no es más que una secuencia cronológica de una sucesión temporal ordenada de un parámetro que presenta,

simultáneamente, un aspecto o componente **estructural**, que explica la dependencia entre los sucesos y una componente **aleatoria**, que refleja la independencia entre ellos.

Tabla 8. Estadígrafos de la serie temporal de niveles

	HV-19	HV-28	HV-29	HV-431	HV-645	AL-3	AL-4	AL-5	AL-6	AL-7
Longitud de la serie	145	145	140	130	124	148	148	148	147	148
Promedio	47.89	47.44	38.27	48.97	47.85	41.3	46.99	81.54	103.4	78.42
Mediana	46.89	47.09	41.83	47.77	47.36	40.86	46.18	80.89	103.2	78.13
Varianza	11.21	4.46	67.20	10.80	7.44	6.01	14.13	5.89	5.62	4.97
Desviación Estándar	3.35	2.11	8.20	3.28	2.73	2.45	3.76	2.43	2.37	2.23
Valor mínimo	41.45	43.85	27.4	43.73	41.47	37.75	42.02	78.12	99.22	74.34
Valor máximo	55.87	53.78	48.97	56.77	54.07	46.26	55.41	87	108.16	84.24

El correlograma simple elaborado a partir de los datos de niveles traduce la dependencia entre los sucesos para intervalos de tiempo cada vez mayores. Cuando el correlograma tiende rápidamente hacia cero, caracteriza una sucesión de eventos independientes y el fenómeno analizado puede considerarse como un proceso **cuasi-aleatorio**. Por otro lado, cuando el correlograma decrece lentamente, indica un fenómeno con una estructura muy marcada y una importante dependencia memoria de los sucesos. En el caso en que los valores del coeficiente de autocorrelación experimentan un decrecimiento gradual y únicamente alcanzan valores significativos para intervalos de tiempo pequeños, el proceso es **autorregresivo o de tipo markoviano**.

En particular, como se trata de los casos aquí estudiados, en que la serie alcanza varios ciclos hidrológicos, el correlograma adquiere una forma sinusoidal que identifica una marcada periodicidad en la serie debida, en lo fundamental a variaciones estacionales.

En la autocorrelación, los pozos muestran, en general, un **alto efecto de memoria**, siendo los valores extremos el del pozo HV-29 (Ver Figura 14) con un total de 28 meses, y el AL-7 con un efecto de memoria de sólo 15 meses (Ver Figura 15), tiempos máximo y mínimo en que el acuífero mantiene información del estímulo. Esto muestra el tiempo que se ha visto influenciado el sistema por un estímulo externo así como sus reservas, características que están relacionadas entre si, ya que un mayor efecto de memoria conlleva altas capacidades del acuífero para captar las grandes avenidas y por consiguiente un mayor tiempo para regular toda la masa de agua que el encierra.

AUTOCORRELOGRAMA HV-29

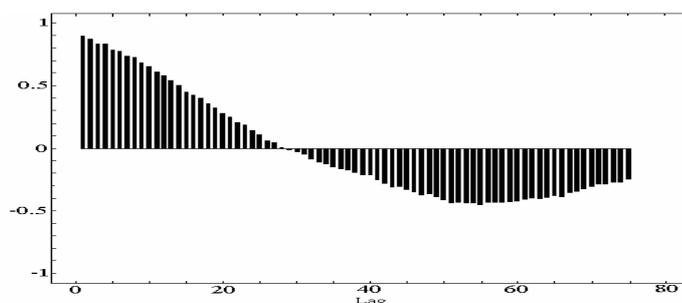


Fig. 14. Autocorrelograma de la estación HV-29

AUTOCORRELOGRAMA AL-7

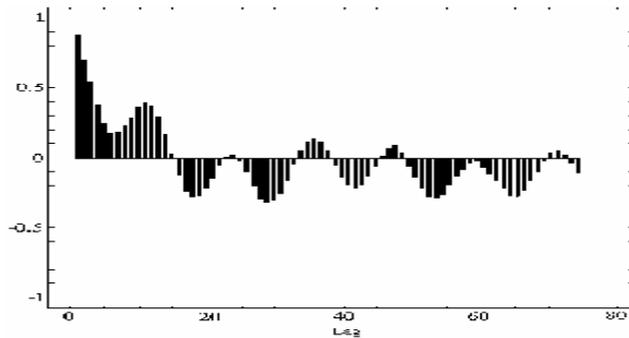


Fig. 15. Autocorrelograma de la estación AL-7

Los restantes gráficos de autocorrelación pueden verse en el Anexo #1.

La técnica del **espectro de varianza** permite obtener la ciclicidad que ha influido en el sistema durante los trece años de datos. Por este análisis se puede redefinir la frecuencia de muestreo de los pozos en la cuenca, a través del último ciclo que influye sobre el sistema. El **espectro de densidad de varianza** permite obtener una descomposición de la varianza total de la serie para diferentes frecuencias y, por ello, pone de manifiesto la componente aleatoria en relación al período y al paso de tiempo considerado y que es asimilable a un ruido de fondo; la varianza que corresponde a fenómenos estacionales o periódicos y, finalmente, la varianza debida a la componente secular.

Las Figuras 16 y 17, muestran dos ejemplos de espectro de varianza y los restantes se incluyen en el anexo 2.

ESPECTRO DE VARIANZA HV-19

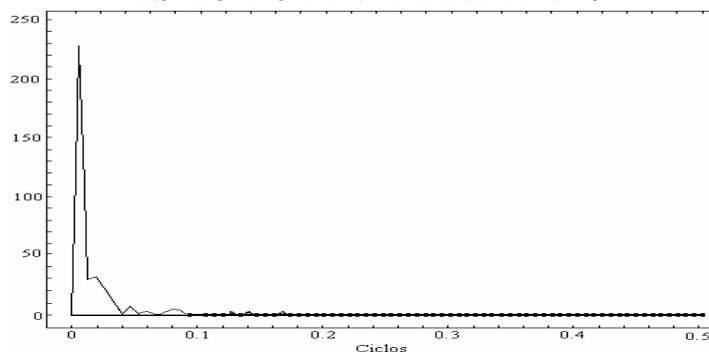


Fig. 16. Espectro de varianza de la estación HV-19

Como se observa en este gráfico la serie de datos del pozo HV-19 logra estabilizarse a partir del valor de abcisas de 0.085, calculándole el inverso a este valor nos da que este último ciclo que ha influido en el sistema lo hace con una frecuencia de 11 meses y es por esto que proponemos que el pozo pase de frecuencia mensual a semestral ya que no hay eventos que influyan en el con menor frecuencia y no se corre el riesgo de perder información.

En este caso el pozo AL-7, su serie de datos no se estabiliza hasta el valor de abcisa de 0.36 que corresponde a 2.7 meses de frecuencia del ciclo, por lo que proponemos que mantenga su frecuencia mensual.

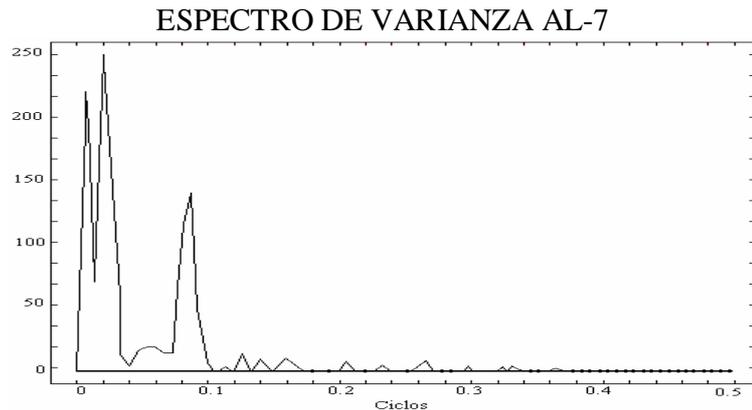


Fig. 17. Espectro de varianza de la estación AL-7

A continuación se muestran las frecuencias obtenidas para cada pozo, siguiendo los criterios antes mencionados:

HV-28 mensual; HV-19 semestral; AL-3 semestral; AL-4 semestral; AL-5 semestral; AL-6 cada dos meses; AL-7 cada dos meses. Se debe señalar que a los tres pozos faltantes, no les fue posible obtener el espectro de varianza por falta de datos en su serie.

Análisis multivariado (componentes principales y análisis de cluster)

El análisis multivariado, incluye métodos estadísticos muy desarrollados, como lo son la taxonomía numérica (Análisis Cluster) y componentes principales. Además brinda la posibilidad de confeccionar la matriz de correlación de los elementos o variables que se utilizan para la aplicación de estos métodos.

Este tipo de análisis pretende definir informatividad o relaciones entre variables y cuáles son los factores que consideran los geosistemas en estudio, a través de técnicas potentes de reconocimiento de patrones. Los pasos del análisis son los siguientes:

- Conformación de la matriz observacional o de evidencias
- Estandarización y/o normalización de la matriz
- Solución de la matriz en términos de valores y vectores propios
- Selección del criterio de valor propio mínimo permisible
- Definición del límite aceptable de varianza explicada
- Cálculo de las comunalidades
- Selección del método de extracción de factores
- Selección del método de rotación de la matriz

El **Análisis de Cluster** es un método de clasificación numérica que se basa en una medida de las distancias entre las variables objetivos. En nuestro caso se utilizó como el marco de agrupamiento el del vecino más cercano, que no es más que establecer cuál o cuáles son los elementos patrones más similares al objeto, que estamos clasificando; esto ofrece la posibilidad de extrapolar las cualidades de sus vecinos más cercanos.

Para este tipo de análisis existen varias funciones de semejanza, entre ellas la distancia matricial y la distancia euclidiana, ambas entre puntos. Para definir relaciones de asociatividad entre los

diferentes puntos de muestreo se aplican las técnicas de Análisis de Cluster. La distancia euclídeana no es más que la longitud o valor absoluto de una variable, medida desde el origen del eje cartesiano. Matemáticamente se expresa como la raíz cuadrada de la variable al cuadrado o la expresión más generalizada, su valor absoluto o la raíz cuadrada de este, siempre buscando semejanza en un espacio afín que se toma como referencia. La distancia matricial, a grandes rasgos, es la distancia referida al coeficiente de correlación. La mayor semejanza entre objetos viene dada por el mayor coeficiente de correlación.

El **Análisis de Componentes Principales** se realizó con las siguientes variables que caracterizan al sistema.

1. Distancia a la taza de Vento (DT)
2. Rumbo a la taza (RT)
3. Profundidad total del pozo (PT)
4. Espesor del acuífero cortado (EAC)
5. Espesor de la zona no saturada (EZNS)
6. Cota de superficie (CS)
7. Cota de fondo (CF)
8. Cota piezométrica media (CPM)
9. Rango de fluctuación (RF)
10. Distancia al acueducto más próximo (DAP)
11. Rumbo al acueducto más próximo (RAP)
12. Distancia a la divisoria más próxima (DDP)

Trabajando con la matriz en modo (R) se obtuvo que las variables de mayor peso son:

Primera componente	Segunda componente	Tercera componente
EAC	CS	EZN
RT	RF	DDP
PT		
CF		
DT		

Con ellas se explica el 86,48 % de la varianza de la serie quedando sólo un 13,52 % sin explicar, debido a otros factores, o variables que no han sido incluidas en el análisis.

Con el peso informativo de estas variables podemos establecer en dependencia de su rango de fluctuación en la serie los parámetros de diseño a tener en cuenta en el sistema para los pozos de observación.

1/ RT (Rumbo a la taza)

Tiene un rango de variabilidad entre 5 y 297°, y este rango resulta el apropiado para la ubicación de los pozos de la red.

2/ PT (Profundidad total)

Debe variar entre 26 y 120 m. El rango óptimo es:
 Prof. mín = $x \cdot C_v$; Prof. máx = X_{max}

3/ DT (Distancia a la taza)

Los pozos están entre 3 y 23 km por lo que la distancia promedio será 13 km. Para obtener el rango máximo se suma el valor medio y más/menos el valor máximo, criterio que no se puede seguir

porque sale fuera de los límites de la cuenca. El rango mínimo es el valor medio más/menos el valor mínimo, por lo que el rango de distancia a la taza debe fluctuar entre 10 y 16 km.

4/ CS (Cota de superficie)

La cota de superficie se fija para tener una idea aproximada. La cota de fondo y el espesor de acuífero cortado son variables más difíciles de prefiar. La cota de superficie debe oscilar entre los 54 y 113 m como valores generales y el valor promedio es de 83 m.

5/ DDP (Distancia a la divisoria próxima)

El rango de valores es de 1,1 a 6,2 km dando una distancia promedio del orden de los 3,5 km.

Para el agrupamiento de los pozos se utilizó la matriz en modo Q en el análisis de cluster, obteniéndose el siguiente agrupamiento:

<i>Primer grupo</i>	<i>Segundo grupo</i>	<i>Tercer grupo</i>
HV-28	AL-5	AL-3
HV-29	AL-6	AL-4
HV-431	AL-7	
HV-645		

El pozo HV-19 no sale agrupado por no disponerse del dato la profundidad actual y al tener este dato faltante no es posible rotar la matriz. Pero, por su ubicación y características, debe asociarse al primer grupo; quedando *muy bien definidas tres zonas hidrogeológicas en el acuífero*.

Validación geomorfológica de los resultados

- **Aplicación de cuatro modelos de reconocimiento de patrones en la regionalización del Carácter Morfoestructural Específico del relieve.**

Utilizando métodos geomatemáticos para la exploración de variables geomorfológicas, se pudieron correlacionar estas características con la hidrodinámica de la cuenca.

Se reconocieron **tres aparatos cársicos o zonas hidrogeológicas** que son, la zona norte, la centro este y la centro oeste, cada una con comportamientos hidrodinámicos y morfoestructurales bien definidas. En este sentido, la superficie cársica denudativa se corresponde con la zona de máxima circulación de las aguas subterráneas, el relieve de articulación con el máximo gradiente hidráulico y el glacis cársico con la zona de descarga hacia la taza de Vento.

En el **análisis de los componentes principales** de las 11 variables que arrastran los mayores pesos informativos, cuatro se corresponden con características geomorfológicas de la cuenca.

Carácter Morfoestructural Específico del relieve	Peso informativo
Superficie cársica denudativa	15
Glacis cársico cubierto inactivo de borde de superficie	13
Relieve de articulación, superficie fluvial acumulativa	11

La cuenca de Vento, al estar desarrollada en el piso morfoestructural de la cobertura neoa autóctona y en la unidad morfoestructural Oligo-Mioceno, presenta características propias que permiten definir su carácter morfoestructural específico y su información complementaria.

La cuenca de Vento es un sistema cársico del tipo polje estructural bien definido. Con el fin de establecer los patrones geomorfológicos que expresan algunas propiedades hidrodinámicas del acuífero se reconoció una muestra discreta de 72 longitudes y azimut de los alineamientos geomorfológicos y se definieron los patrones que determinan el carácter morfoestructural específico del relieve y la importancia informativa de 10 formas complejas genéticas del relieve en la cuenca.

Los **atributos con mayor peso informacional** resultaron ser los sectores lineales de los valles cársicos fluviales, que arrastran el 82% de la informatividad obtenida, los azimut entre los 10, 70 y 120° definieron dos grupos de cluster que representan la mayor informatividad del área.

La aplicación del criterio de convergencia sobre ocho nodos en la red fluvial, permitió definir un modelo fluvial del tipo convergente dependiente desarrollado sobre tres tipos complejos del relieve. Estas formas del relieve alcanzan el 39% de la importancia informativa, en orden decreciente de informatividad están la red fluvial estacional y la superficie cársica denudativa en una primera clase. El modelo fluvial convergente, los paleovalles superficiales y el glacis calcáreo se agrupan en una segunda clase y por último el relieve de articulación y la superficie fluvial denudativa en un tercer grupo.

Para la determinación de la importancia informativa de las superficies del relieve y por tanto del mapa de los componentes principales, se procedió a realizar el cálculo de una Tabla de verdad, que no es más que una matriz booleana de asociación entre variables u objetos por las filas y las columnas de la matriz

Los **atributos cualitativos** obtenidos para la confección de la matriz son:

Relieve de articulación o pie de monte; Estructuras del relieve no cársico; Superficie cársica de tipo inselbrg; Red fluvial estacional; Modelo fluvial radial convergente; Superficie cársica denudativa; Superficie cársica corrosiva; Superficie fluvial acumulativa; Paleovalles superficiales; Glacis cársico cubierto inactivo de borde de superficie.

Con la matriz inicial de datos se obtuvo la matriz de semejanza que indica mediante el peso informativo de cada atributo, el orden morfogenético de cada uno en la formación del relieve de la cuenca.

En la Figura 18, se muestran las componentes principales de las superficies geomorfológicas se observan las tres regiones geomorfológicas en que se divide la cuenca.

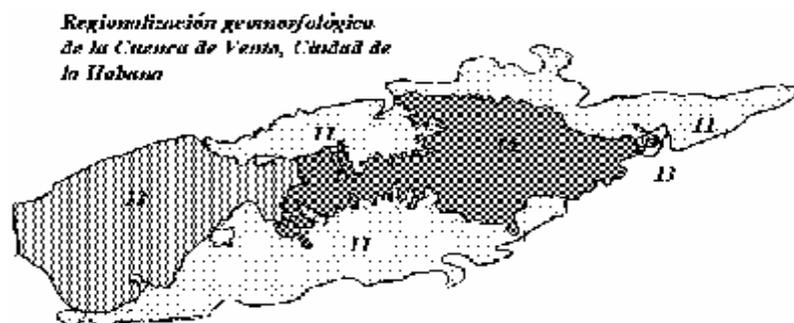


Fig. 18. Mapa de los componentes principales de las superficies del relieve

Para realizar esta regionalización se tuvo en cuenta el carácter morfoestructural específico del relieve, que en el orden jerárquico de la clasificación morfoestructural de Cuba, es el que determina la estructura propia de las unidades de menor orden en el relieve y su información complementaria. Estos dos aspectos son los de mayor importancia para reconocer en el relieve, la imagen de las propiedades del campo físico de los acuíferos.

El carácter morfoestructural específico del relieve esta definido como la estructura propia de las unidades de menor orden en el relieve. Así en este orden jerárquico se distinguen la altitud asociada a la estructura geológica como resultado de la evolución del sistema geomórfico en la etapa del desarrollo cuasi platafórmico de Cuba, por lo que refleja la actividad neotectónica de los escalones morfoestructurales primarios sobre la litología que subyace al relieve. Se incluye en este orden se incluye la información complementaria donde se consideran las morfoestructuras de orden local, que incluye tanto las formas lineales como las areales del relieve, formas neotectónicas y estructuras enterradas.

El análisis de las longitudes se baso en una muestra de 29 individuos para la que se obtuvieron los siguientes valores de su estadística sumaria.

Estadística sumaria de las longitudes de los alineamientos

Número	72
Mínimo	0,80
Máximo	8,60
Moda	1,5
Media	2,36
Mediana	2,50
Rango	7,80
Varianza	1,47
Desviación estándar	14,92
Coefficiente de variación	0,51
Error de la media	6,43
Esperanza matemática	2,10

La aplicación del **Algoritmo Votacional de Análisis Discriminante** permitió obtener la matriz de control de las longitudes así como su peso informacional.

Matriz de control de las longitudes de los alineamientos geomorfológicos

Longitudes (km)	Peso Votacional
2,00	1,95
1,70	1,30
1,80	1,24
3,00	1,12
8,60	1,00

Esto significa que solo cinco longitudes controlan el desarrollo lineal de las formas del relieve. En la Figura 19, se muestra la distribución de las longitudes de los alineamientos.

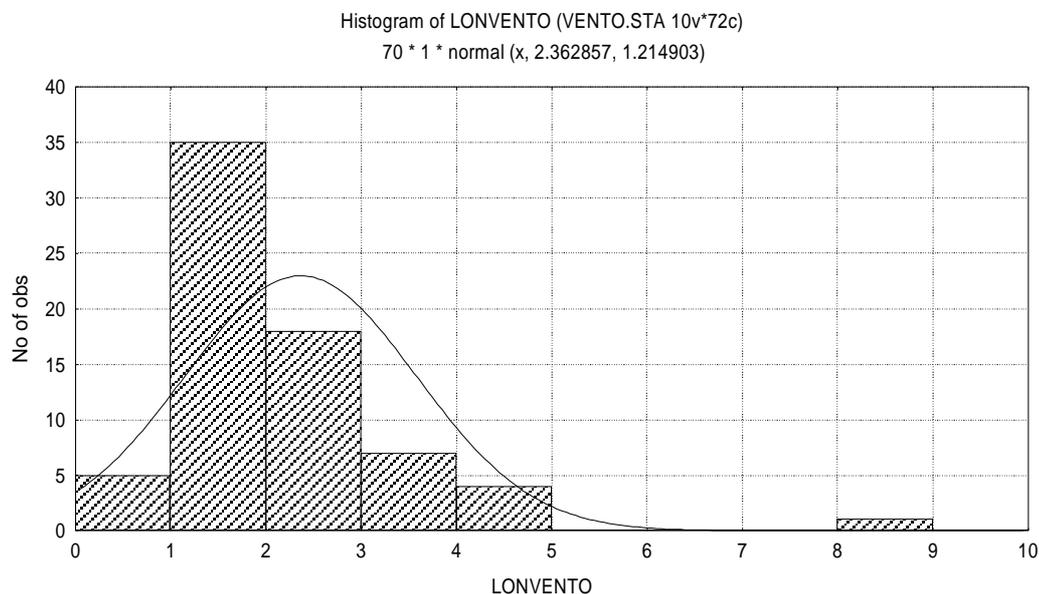


Fig. 19. Distribución de las longitudes de los alineamientos

El análisis de los azimut de los alineamientos se basó en la misma muestra tomada para la medición de las longitudes, los resultados obtenidos se observan en la siguiente Tabla.

Las mayores frecuencias se encuentran en los valores de 10 y 120, correspondiente a los dos primeros cuadrantes con dirección NNE, ESE.

Importancia informativa de los azimut de los alineamientos

Patrón inicial	Patrón final	Peso informativo
10	120	11
	70	8
100	150,160, 180	7
30,60	110, 140	6
90	140	4
20		3
50,80	17	2

Morfológicamente esto indica que las directrices tectónicas (Ver Figura 20) que han condicionado la implantación del carácter morfoestructural específico en la cuenca se corresponde con la fase final de la Orogenia Cubana, la que ha actuado sobre las formas lineales de la cuenca y determino la morfología de la cuenca.

En el gráfico siguiente se muestra la distribución de los azimut de los alineamientos.

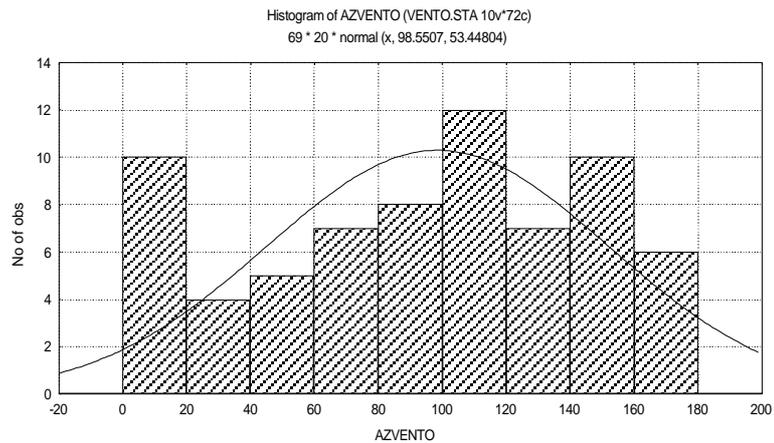


Fig. 20. Distribución de los azimut de los alineamientos

La estadística sumaria de los azimut de los alineamientos es la siguiente: Número 72; Media 98,5; Mediana 110; Mínimo 10; Máximo 180; Cuartil inferior 60; Cuartil superior 140; Rango 170; Varianza 2858; Desviación 53; Error 6,43.

Finalmente se compararon las dos variables analizadas y se le realizó un análisis de regresión, el resultado se observa en la Figura 21.

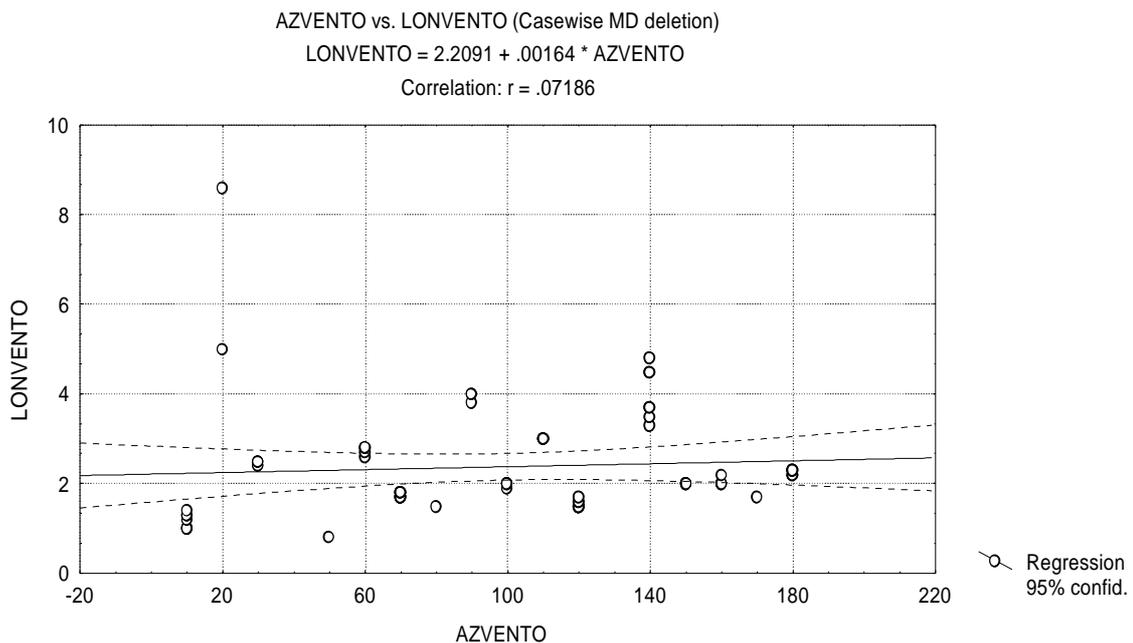


Fig. 21. Análisis de regresión entre el azimut y la longitud de los alineamientos

En este gráfico se nota como no existe ninguna relación entre las longitudes de los alineamientos y sus longitudes. Esto solamente ocurre para valores aislados que quedan en el interior del intervalo de restricción o confianza de la curva de regresión.

Estos valores son: para azimut de 30, 150, 160, 170 y 180⁰ se correlacionan longitudes del orden de los 2 Km, Para azimut de 60 coinciden valores de 3 Km., lo que significa que no pueden ser

tomados estos indicadores geomorfológicos en conjuntos como patrones geológicos. Solamente así pueden usarse los valores anteriores al intervalo de restricción..

Como puede observarse los resultados geomorfológicos concuerdan con las zonas en que se ha dividido la cuenca a partir de la optimización y del modelo matemático; así mismo, las cotas más propicias para la ubicación de los posos concuerdan con los límites de las superficies delimitadas en el mapa de los componentes principales y que constituyen los límites entre las llanuras bajas y las llanuras altas, tanto en la cuenca como para todo el país.

En la secuencia de mapas que se presentan a continuación se nota la correlación existente entre los tres métodos utilizados, la optimización, la validación el modelo matemático y el mapa geomorfológico. La aplicación de todo este conjunto de técnicas geomatemáticas condujo a la excelente concordancia que se observa entre los mapas de hidroisohipsas que resultan de la calibración del modelo matemático AQUIMPE en la cuenca de Vento (Ver Figura 22), el que resulta de la red optimizada (Ver Figura 23), el elaborado con la red no optimizada de la cuenca elaborado por la Dirección provincial de acueductos y alcantarillados de Ciudad de La Habana (Ver Figura 24) y la zonación geomorfológica.

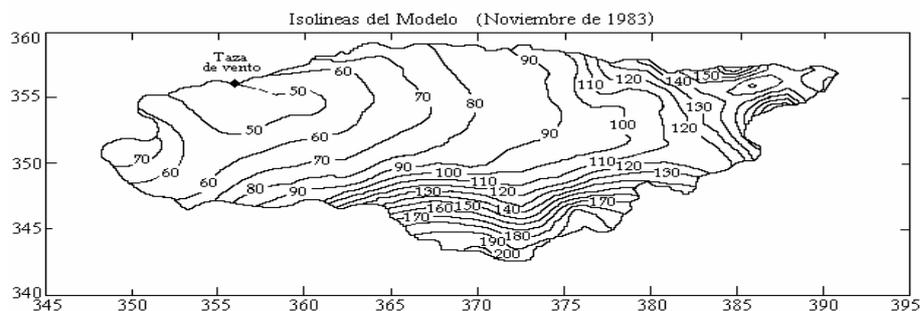


Fig. 22. Mapa obtenido de la calibración del modelo matemático de la cuenca de Vento.

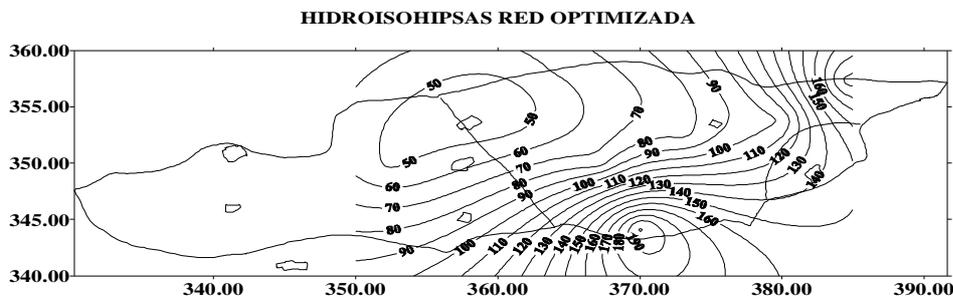


Fig. 23. Mapa de la cuenca de Vento obtenido con la red de monitoreo optimizada.

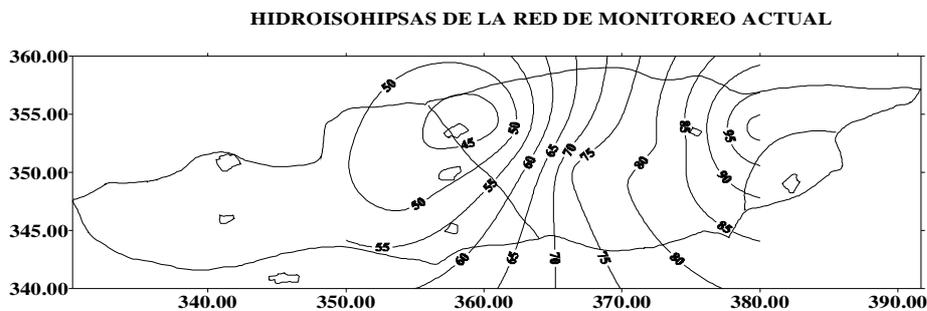


Fig. 24. Mapa de la cuenca de Vento con la red de monitoreo actual del régimen de las aguas subterráneas.

Conclusiones del Resultado 1

Teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos hasta el momento, la propuesta de la nueva red de monitoreo de niveles se ofrece a continuación:

1. Mantener el pozo HV-29, ya que este pozo se mantiene un período muy largo de su serie completamente seco, pero presenta una base de datos extensa, además de tener buena correlación con los restantes pozos.
2. Del primer grupo los pozos HV-28, HV-19, HV-645 tienen una alta correlación entre ellos, por lo que sus comportamientos son similares, de ahí que queden agrupados en un mismo cluster. En consecuencia se propone mantener los pozos HV-28, HV-19, HV-645 por el alto efecto de memoria e intereses de la provincia de seguirlos muestreando.
3. Mantener el AL-5, AL-6 y AL-7, aunque están agrupados y tengan una buena correlación entre ellos, están ubicados geográficamente separados uno del otro y no es recomendable dejar de observar alguna zona, se propone seguirlos controlando mensualmente.
4. Mantener el AL-3 y el AL-4 por que monitoreándolos se logra obtener toda la información de esta zona hidrogeológica, tal es así que tienen el mismo efecto de memoria y además hay una alta correlación entre ellos.
5. Debido al gran peso que tiene en el estudio la distancia de los pozos a la Taza de Vento debe incluirse un limnógrafo en sus alrededores que registre su comportamiento hidrodinámico.
6. Por el análisis de los espectro de varianzas se llega a la conclusión de que la frecuencia de muestreo de los pozos en la cuenca no debe mantenerse como hasta ahora sino variar en la forma:

HV-28 mensual; HV-19 mensual; AL-5 mensual; AL-6 mensual; AL-7 mensual;
AL-3 mensual; AL-4 semestral; HV-19 Mensual; HV-645 Mensual; Limnógrafo de la Taza diario

De acuerdo con estos resultados hay que buscar la combinación óptima de transporte, recorrido, etc. para minimizar el costo del monitoreo.

7. Se pueden definir tres zonas hidrogeológicamente diferentes en el acuífero. Ello implica que un solo gráfico de control de balance (GCBAS) no caracteriza el regimen hidrodinámico de todo el sistema acuífero, al no cumplirse el principio de superposición entre los elementos de cada zona. De este modo, cada zona identificada deberá ser caracterizada con un GCBAS independiente.
8. Los pozos que se mantienen de la red actual son el HV-645, HV-28, HV-19, HV-29, AL-3, AL-4, AL-5, AL-6 y el AL-7.
9. El estudio geomatemático y estadístico realizado se comparó con los resultados del modelo matemático AQUIMPE que se encuentra actualmente en calibración en la Delegación Ciudad Habana, llegándose a precisiones con respecto a los pozos necesarios para el

trazado de hidroisohipsas. En tal sentido, se observa la necesidad de incluir pozos al norte y al sur de la cuenca y, ya que en estos momentos no brindan toda la información necesaria, por lo que se sugiere incluir los pozos HV-290, HV-88A, HV-11A y HV-7a en la red de monitoreo con frecuencia semestral.

La Red de Monitoreo de Tritio tendrá la siguiente estructura.

Tipo	Estación	Frecuencia	Contenido
Aguas de lluvia	Pluviómetro HB-26	Mensual	Tritio
Aguas de descarga del sistema acuífero	Taza de Vento	Mensual	Caudales, niveles, pH, Conductividad Eléctrica Específica, macroconstituyentes y tritio
Aguas subterráneas	HV-28 HV-19 AL-5 AL-6 AL-7 AL-3 AL-4 HV-19 HV-645	Mensual	Niveles, pH, Conductividad Eléctrica Específica, macroconstituyentes y tritio
Pozo de abasto (a definir) del acueducto de Paso Seco		Mensual	Caudales, niveles, pH, Conductividad Eléctrica Específica, macroconstituyentes y tritio
Aguas superficiales	Aguas superficiales en la Presa Ejército Rebelde	Mensual	Niveles, pH, Conductividad Eléctrica Específica, macroconstituyentes y tritio

MODELOS DE COMPUTO PARA LA INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS ISOTÓPICOS Y LA ESTIMACIÓN DE LOS BALANCES DE MASA ISOTÓPICOS

Objetivo específico de la salida planificada

Descripción de los distintos modelos de agua subterránea identificados para utilizar en etapas posteriores durante la interpretación de los datos isotópicos y la estimación de los balances de masa isotópicos.

Resumen

De manera muy apropiada, la gestión y protección del agua subterránea, estipula una utilización planificada del acuífero, atendiendo a factores sociales y económicos, sin causar daños a la calidad y cantidad de agua. En el caso particular de este Proyecto, las investigaciones están dirigidas a obtener las características necesarias del acuífero cársico de la Cuenca de Vento, con el uso, entre otros, de técnicas nucleares, con el objeto de proponer su mejor explotación.

Luego de una valoración técnica integral de las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de la Cuenca analizada, de un estudio bibliográfico y atendiendo a los objetivos planteados en el Proyecto y al cronograma previsto, se presenta el informe técnico que muestra los modelos de computo identificados como los más representativos para realizar los cálculos posteriores (la interpretación de los datos isotópicos integrales, la estimación del balance de masa, etc.). Se exponen las ecuaciones matemáticas que simulan los modelos conceptuales que, preliminarmente, se ajustan a las condiciones reales que rigen la simulación en cada caso y las consideraciones generales y necesarias a tener en cuenta durante el proceso de modelación. El trabajo conforma la base teórica de las herramientas necesarias a utilizar en la modelación computarizada de los eventos existentes en el objeto de estudio, ya que muestra una amplia recopilación bibliográfica, la cual abarca toda la literatura necesaria y utilizada tanto para la actual etapa de identificación y/o selección de modelos de computo como para futuras etapas de cálculo e interpretación para la obtención de los resultados finales. Los modelos identificados, permitirán simular el comportamiento dinámico del acuífero y seleccionar de estos modelos aquel que mejor represente la realidad físico-química de la Cuenca en cuestión.

Una vez cumplido el necesario ciclo anual del muestreo de agua en los distintos puntos de la red hidrográfica seleccionada, y culminados los trabajos de recopilación de los datos de laboratorio, tanto de los macro constituyentes (pH, HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) como de las concentraciones de ^3H como trazador en agua subterránea (pozo), agua superficial (embalse) y en las precipitaciones (pluviómetro y red representativa), se comenzará la etapa de verificación de los modelos matemáticos y/o sus códigos de cómputos seleccionados, calibración y validación del modelo, pasando a la interpretación de los resultados, lo cual permitirá dar cumplimiento a los resultados programados, proponiendo las medidas necesarias para mejorar la explotación de la principal cuenca de la Ciudad de la Habana y una de las principales del país.

Introducción

La disponibilidad de agua potable es uno de los grandes problemas que enfrentan la humanidad en la actualidad, de alguna manera, es uno de los problemas más grandes, porque está asociado con la afeción de las vidas de millones de personas. El acelerado crecimiento de la población mundial, provoca que aumenten los requisitos del agua tanto en cantidad como calidad para el desarrollo agrícola e industrial. Según la FAO, cada 20 años se duplica la demanda mundial de agua dulce. Y en la medida en que las aguas de superficie están cada vez más amenazadas por la contaminación industrial, agrícola y doméstica, las aguas subterráneas se convierten en un recurso cada vez más precioso.

En la actualidad, los recursos renovables de agua son la mitad de lo que eran en 1960. Según cálculos del Banco Mundial, esa cantidad se volverá a reducir a la mitad para el año 2025. Resulta obvio que si no se administran mejor los recursos hídricos podría verse obstaculizado el crecimiento económico, además de surgir peligros potenciales para la salud y el medio ambiente de la humanidad. A fin de hacer frente a este urgente problema, la ciencia nuclear ha elaborado un conjunto de herramientas específicas de análisis –las técnicas isotópicas– que pueden, si se combinan con técnicas no nucleares, mejorar el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos que se descubran.

La técnica nuclear a utilizar en este Proyecto para obtener los resultados esperados, es la determinación de las concentraciones de tritio en el agua subterránea, la cual junto a otros datos isotópicos [1,4] y geoquímicos permitirá evaluar la Cuenca en estudio. Esta técnica es muy empleada en la actualidad por los beneficios y escasos riesgos que reporta comparada con las técnicas nucleares que utilizan trazadores artificiales (ej: ^{99m}Tc), las cuales presentan riesgos propios del manejo con sustancias radiactivas y la introducción de estas en sistemas acuáticos provocando peligros potenciales a los ecosistemas tratados. Para un mejor entendimiento del radioisótopo utilizado en esta técnica, señalamos en síntesis sus características y aplicaciones fundamentales.

Tritio (^3H). Generalidades

Pequeñas actividades de tritio, son producidas de forma natural en la alta atmósfera a partir de determinadas reacciones nucleares inducidas por los neutrones liberados en la misma por la radiación cósmica de origen extraterrestre. Este tritio natural se incorpora al agua de las precipitaciones en forma de agua tritiada (THO), produciendo concentraciones muy pequeñas, pero que son medibles perfectamente con las técnicas disponibles en la actualidad. Sin embargo, durante los últimos 45 años, las precipitaciones de todo el globo y, principalmente, las del Hemisferio Norte, han contenido concentraciones de tritio muy superiores a las producidas de forma natural, debido a los ensayos nucleares realizados en la atmósfera, principalmente, durante las décadas de los años 50 y 60 (ensayos termonucleares). Este tritio ha producido el marcado natural de todas las aguas meteóricas del globo y, por tanto, también de los acuíferos donde se produce una renovación rápida del agua.

Debido al origen reciente del tritio termonuclear y al corto período de semidesintegración de este isótopo (12,34 años), el tritio se utiliza en Hidrología para identificar aguas modernas, es decir, aguas infiltradas en el subsuelo a partir del año 1952, fecha en que se iniciaron los ensayos termonucleares. Las aguas de precipitaciones anteriores a este año tendrían en la actualidad concentraciones difícilmente detectables.

El tritio (^3H) es un isótopo radiactivo del hidrógeno y como tal, forma parte íntegra de la molécula del agua, constituyendo otro trazador ideal del agua ya que también es conservativo en la mayoría de las condiciones. Además de permitir estudiar el origen de los diferentes cuerpos de agua, su desintegración radiactiva permite añadir una dimensión temporal, constituyendo, junto al carbono-14 una de las herramientas básicas de la hidrología isotópica. Puesto que no existen interacciones geoquímicas con los materiales del acuífero, su presencia (y en qué cantidad) es un indicador de aguas recientes. La similitud de contenidos de tritio entre el embalse y la filtración suele indicar que estamos tratando con las mismas aguas.

Las concentraciones de tritio en hidrología se expresan como Unidades de tritio (UT); una UT equivale a un átomo de tritio por cada 10^{18} átomos de ^1H , valor que equivale a $0,118 \text{ Bq} \times \text{L}^{-1}$. Su periodo de semidesintegración es de 12,43 años. Existe un equilibrio de forma natural entre el tritio que se produce en la alta atmósfera y su desintegración en la hidrosfera. Si se considera su periodo de semidesintegración, el tritio natural sólo puede detectarse en aguas que han estado aisladas de la atmósfera por un periodo máximo de 100 años. En ciertos casos, la presencia de tritio en aguas antiguas ha sido utilizada como indicador de mezcla con aguas de recarga reciente.

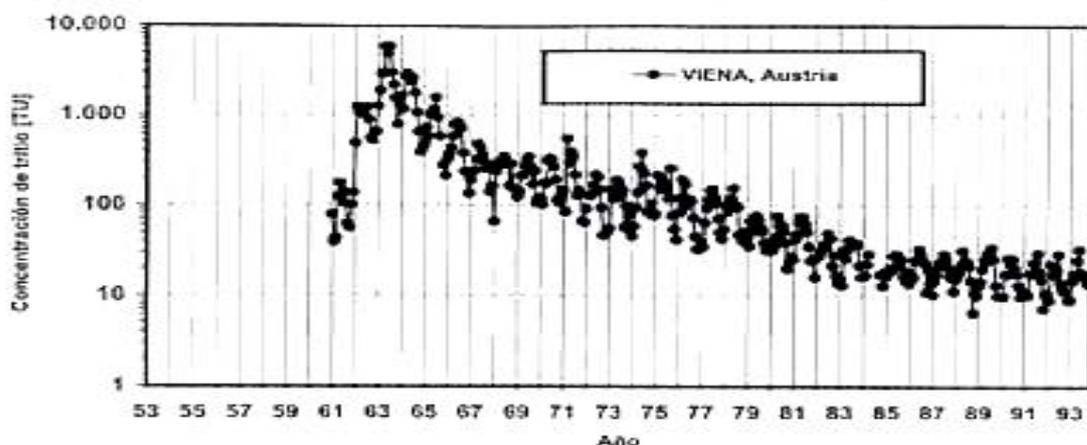


Fig. 1. Concentración de tritio en las aguas de lluvia típica para ambos hemisferios desde el año 1953 a la actualidad.

La utilidad del tritio en hidrología durante las últimas décadas ha estado potenciada por el aumento de varios órdenes de magnitud de la concentración de este isótopo en la precipitación. El elevado número y potencia de los ensayos con bombas termonucleares en la atmósfera durante el periodo 1952-1963 originó una importante lluvia radiactiva incluyendo una cantidad de tritio varios órdenes de magnitud superior a la que se produce de forma natural en la alta atmósfera. A partir de 1963, año en que se firmó un tratado de prohibición parcial de ese tipo de ensayos, la cantidad de tritio emitida a la atmósfera por estas fuentes ha sido muy pequeña (Ver Figura 1). A partir de dicho año, en el que se observó un máximo en la concentración de tritio en el agua de lluvia, los valores medidos en ambos hemisferios han mostrado un descenso hasta valores muy próximos a los que había en el período anterior a las explosiones.

En la actualidad, existen otras fuentes adicionales de tritio (industria de señales luminiscentes, procesamiento de combustible nuclear, industria relojera, etc.), pero a diferencia del tritio derivado de las explosiones nucleares, el tritio presente en dichas precipitaciones tiene un carácter muy local, lo que puede complicar en algunos casos la datación con precisión de las aguas subterráneas recientes.

Como una primera aproximación semi-cuantitativa a la interpretación de los contenidos de tritio en las aguas subterráneas se ha sugerido la siguiente relación:

- § Aguas sin tritio (0 UT). Se trata de aguas que carecen de una componente de recarga reciente, y por tanto con una edad superior a los cien años. La ausencia de tritio se observa en acuíferos profundos confinados, con edades del agua subterránea de varios miles de años y perfectamente aislados de acuíferos someros y de fuentes de contaminación.
- § Aguas con valores de tritio entre 0-5UT. Ya que las aguas de lluvia de los últimos 40 años han presentado contenidos de tritio superiores a 5 UT (aun corrigiendo por desintegración radiactiva), se desprende que estas aguas son relativamente recientes, pero con una edad superior a 50 años, o bien se trata de una mezcla entre aguas más o menos recientes y aguas con contenido muy bajo o nulo de tritio. Estos valores se observan en sistemas donde se extrae agua de varios horizontes geológicos, cuyas aguas pueden tener tiempos de residencia muy variables.
- § Aguas con valores de tritio entre 5 y 7 UT. Corresponden, en la mayoría de los casos, a aguas subterráneas muy recientes 3-5 años. Valores de esta magnitud deben encontrarse en embalses cuyas aguas procedan de lluvias recientes. Sin embargo se han encontrado pequeños embalses que recogen, en su mayor parte, descargas de aguas subterráneas cuyo contenido de tritio es inferior al de las lluvias actuales.
- § Aguas con valores de tritio entre 7 y 20 UT. Los contenidos de tritio superiores a los de las lluvias actuales corresponden de forma inequívoca a las precipitaciones de las últimas cuatro décadas. Una interpretación más precisa de la edad de las aguas exige evaluar el tipo de flujo que domina en el sistema a ser estudiado. El valor máximo que se puede encontrar hoy en día depende del modelo empleado; valores del orden de 15-20 UT se obtienen con el modelo exponencial, y algo mayores en el caso del modelo tipo pistón.
- § Aguas con valores de tritio superiores a 20 UT. Corresponde a tritio artificial derivado de algún tipo de contaminación donde hubo lixiviado de algún residuo con alto contenido de tritio. Estos valores tan sólo se observan en las proximidades de basureros o zonas de residuos industriales.

Para satisfacer las exigencias actuales, se han desarrollado los modelos conceptuales para las interpretaciones cuantitativas de datos de hidrogeología isotópica, siendo prioridad en las investigaciones durante la última década, la valoración de sus limitaciones y comprobaciones de campo. Las técnicas isotópicas brindan valiosa información sobre las fuentes, el movimiento y la contaminación de las aguas subterráneas en diversos medio ambientes, entre ellos los ríos, lagos y cuencas. Tales técnicas resultan especialmente eficaces cuando se trata de estudiar y utilizar de manera racional las reservas hídricas localizadas bajo la superficie terrestre, o sea, las aguas subterráneas.

Durante las últimas cuatro décadas el uso de isótopos, aquellos de ocurrencia natural (isótopos ambientales) o intencionalmente inyectados (isótopos artificiales), ha demostrado su valor en estudios relacionados con la evaluación, gestión y desarrollo de los recursos hídricos. Las aplicaciones en una amplia variedad de problemas hidrológicos son basados en un concepto general de trazado. El término Hidrología Isotópica se comprende ahora como una disciplina científica que provee metodologías aplicadas a un variado espectro de problemas hidrológicos como una parte integral de las investigaciones de los recursos hídricos y relacionados a estudios medioambientales.

La contribución y el papel potencial de los métodos isotópicos, en el sector de los recursos hídricos, pueden agruparse en las categorías generales siguientes:

- 1) Determinación de parámetros físicos relacionados con los flujos, la dinámica de transporte y la estructura del sistema hidrológico.
- 2) Proceso que traza la delineación de los procesos involucrados en la circulación del agua y transporte de masa de componentes disueltos.
- 3) Identificación del origen (génesis) del agua.
- 4) Componente que traza la determinación de vías y relación del mezclado de los flujos.
- 5) Determinación de la escala de tiempo de los eventos hidrológicos.

A través de la aplicación de las técnicas isotópicas en sistemas hidrológicos, pueden ser obtenidos dos tipos de informaciones, cualitativas y cuantitativas.

- 1) Información cualitativa, correspondiente a los límites del sistema, las discontinuidades hidráulicas y estratificaciones, las interconexiones hidráulicas, la presencia de recargas, origen del agua, las fuentes de contaminación (incluso la salinización del agua), y las relaciones de causa-efecto de diferentes procesos durante el flujo y circulación del agua en sistemas hidrológicos.
- 2) Información cuantitativa acerca de los flujos de agua (proporción de recarga directa del agua subterránea, etc.), tiempos de tránsito del agua en el sistema hidrológico y las características de los parámetros dinámicos relacionados a los procesos de transporte de masa.

Las evaluaciones cuantitativas hechas mediante isótopos ambientales requieren de los modelos matemáticos conceptuales, las formulaciones del modelado más usualmente usadas pueden ser clasificadas en tres amplias categorías, las cuales son:

- 1) Modelos de caja negra: modelos de parámetros ajustados, basados en aproximaciones de sistemas lineales (tipo de la función de modelado) para un trazador.
- 2) Modelos de compartimento: modelos de simulación por compartimentos o grupos de celdas de mezclado instantáneo a través del cual los trazadores son transportados.
- 3) Modelos determinísticos: modelos que involucran formulaciones matemáticas de transporte advectivo con dispersión y sus soluciones numéricas analíticas y/o aproximadas.

En la mayoría de los casos, la entrada del diseño y la salida observada (los datos isotópicos colectados y/o variaciones espaciales temporales) son la interpretación disponible, y la interpretación cuantitativa, en términos matemáticos, es un problema inverso. Es evidente que el primer requisito en la aplicación de isótopos naturales es la determinación del diseño de entrada en el sistema bajo investigación, el cual es la composición isotópica del flujo. Para la mayoría de los isótopos ambientales, los procesos naturales que rigen su ocurrencia resultan variaciones dependientes en tiempo y espacio. Las entradas de la variante tiempo para un sistema dado y la proporción de decaimiento conocida (en el caso de isótopos radiactivos) habilitan estimaciones cuantitativas (basadas en las variaciones isotópicas observadas dentro del sistema o en las concentraciones observadas a la salida del sistema) a través del uso de los modelos matemáticos de aproximación antes señalados.

Los datos básicos sobre el volumen de isótopos naturales contenidos en la precipitación, como una entrada a los sistemas hidrológicos, han sido reunidos por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) de una Red Global de Isótopos en Precipitación (GNIP) desde el año 1960. Las medidas realizadas de O^{18} , H^2 y 3H , son volúmenes mensuales de precipitación reunidos de esta

red global regularmente (los datos de redes nacionales en algunos países complementan esta red global); los datos globales son publicados regularmente por el OIEA, además están disponibles en la página web siguiente: <http://www.iaea.org/programs/ri/gnip/gnipmain.htm>.

Como consecuencia del uso no frecuente de definiciones adecuadas, aparecen grandes incertidumbres para comprender algunas definiciones, especialmente cuando son consideradas las edades de los radioisótopos y del agua, o cuando los modelos matemáticos equivalentes al comportamiento de un depósito bien mezclado son usados para sistemas de agua subterránea en los cuales nunca ocurre una buena mezcla. Para una mejor interpretación de las simulaciones con el uso de los métodos de traza, se dan a continuación algunos conceptos.

- El método de traza es una técnica para la obtención de información sobre un sistema o parte de él observando el comportamiento de una sustancia específica, el trazador que se ha agregado (inyectado) al sistema. Los trazadores ambientales son agregados por procesos naturales considerando que su producción o es natural o es resultado de la actividad global del hombre.

- Un modelo conceptual es una descripción cualitativa de un sistema y su representación (la descripción de la geometría, parámetros iniciales y condiciones límites) pertinente al uso intencional del modelo.

- Un modelo matemático es una representación matemática de un modelo conceptual para un sistema físico, químico, y/o biológico por expresiones diseñadas para ayudar al entendimiento y/o predicción del comportamiento del sistema bajo las condiciones especificadas.

- Verificación de un modelo matemático, o su código de computo, se obtiene cuando se muestra que el modelo se comporta como lo esperado, es decir, que es una representación matemática apropiada del modelo conceptual y que las ecuaciones se resuelven correctamente.

- La calibración del modelo es un proceso en el cual las suposiciones del modelo matemático (tipo de modelo, etc.) y los parámetros, se varían para ajustar el modelo a las observaciones. En el programa de FLOWPC es incluida una opción (cuando no existe ninguna observación), la cual sirve para los cálculos directos. La prueba de hipótesis es realizada por comparación de las predicciones del modelo con los datos experimentales.

- La validación es un proceso de obtener la convicción real de que un modelo es una representación correcta del proceso o sistema para los que fue creado. Idealmente, la validación se obtiene si las predicciones derivadas de un modelo calibrado concuerdan con las nuevas observaciones, preferentemente para otras condiciones que las usadas para la calibración (ej: distancias mayores y tiempos más largos). Contrariamente a la calibración, el proceso de validación es cualitativo y basado en el juicio del modelador. A pesar de contradicciones expresadas por algunos autores [19], la diferencia entre validación y confirmación es bastante verbal, y principalmente depende de las definiciones usadas y su comprensión (algunos autores por la definición del funcionamiento de validación entienden el proceso de calibración).

- La validación parcial puede definirse como la validación realizada con respecto a algunas propiedades de un modelo. Por ejemplo, en el modelado de la prueba de trazador artificial o transporte del contaminante, la ecuación de dispersión normalmente rinde velocidades apropiadas (es decir, puede validarse en ese aspecto), pero raramente describe el proceso de dispersión adecuadamente en predicciones a distancias muy grandes.

En la actualidad para realizar una simulación integral de un acuífero se emplean tres modelos fundamentales y sus posibles combinaciones han sido incluidas en modelos matemáticos que determinan parámetros hidráulicos del sistema (tiempo de residencia, coeficientes de dispersión, velocidad del flujo, balance de mas, etc.). Los tres tipos de flujos son: pistón, exponencial o de mezcla completa y dispersivo.

En el presente informe técnico, luego de evaluar las condiciones hidrodinámicas e ingeniero-geológicas del emplazamiento de la Cuenca en estudio, se selecciona y muestran los modelos (conceptuales y de computo) que más representan las condiciones específicas del sistema estudiado. La selección del modelo más adecuado y representativo del sistema, permitirá que en una etapa posterior del proyecto se puedan interpretar los datos obtenidos de las determinaciones del contenido de tritio y macroconstituyentes. Los modelos identificados, son los que permiten estimar con adecuada precisión, exactitud y con un mínimo de incertidumbres los balances de masa isotópicos y otros parámetros que caracterizarán el acuífero cársico de la Cuenca de Vento, logrando así la propuesta de medidas concretas que propicien un mejoramiento de la gestión de las aguas de Ciudad de la Habana.

Características generales del objeto de estudio (Cuenca Vento)

La Cuenca subterránea de Vento es una de las tres que abastecen la Ciudad de la Habana y la que suministra el mayor volumen de agua (8,8 m³/s), para todos los usos, que consume y utiliza la ciudad. Por tratarse de un acuífero cársico no confinado, extendido sobre una superficie de 370 km², sus recursos hidráulicos subterráneos, estimados en 278 Hm³/año, exhiben una elevada vulnerabilidad a la contaminación de todo tipo, que de hecho, se ha manifestado en el deterioro sistemático de la calidad de sus aguas.

Geología general

En general, la estructura geológica es simple. El sistema acuífero está constituido por sedimentos carbonatados del Neógeno, principalmente del Mioceno inferior-medio, muy carsificados que yacen de modo casi horizontal. En los bordes se reconocen dislocaciones con saltos de falla del orden de los 200 m. En la tabla 1, se muestran las formaciones más importantes que conforman la geología de la Cuenca.

Tabla 1. Formaciones geológicas y posición estructural y estratigráfica.

Edad	Piso Estructural	Formaciones	Litología
Plioceno	Cobertura Platafórmica Neautóctona	Canímar	Calcarenitas, biocalcarenitas, calizas y margas
Mioceno Inferior - Medio	Cobertura Platafórmica Neautóctona	Caobas	Calcilitas, calizas arcillosas micríticas poco fosilíferas, bien estratificadas, con ocasionales lentes de arcilla
Mioceno Inferior - Medio	Cobertura Platafórmica Neautóctona	Güines	Calizas biógenas, detríticas, dolomitizadas
Mioceno Inferior - Medio	Cobertura Platafórmica	Cojímar	Margas, calizas arcillosas y calizas

	Neotectónica		
Eoceno Medio - Superior	Arco Volcánico Paleógeno	Nazareno	Calizas arcillosas, margas, aleurolitas
Eoceno Medio	Arco Volcánico Paleógeno	Peñón	Brechas, conglomerados y calizas
Cretácico Superior (Campaniano - Maastrichtiano)	Cuencas Superpuestas sobre el Arco Volcánico Cretácico	Vía Blanca	Aleurolitas y argilitas, areniscas, margas, conglomerados; horizontes de olistos-tromas
Cretácico Superior (Campaniano - Maastrichtiano)	Rocas de la asociación ofiolítica Mesozoica. Corteza Oceánica	-----	Serpentinitas, harzburgitas, lherzolitas, wherlitas, dunitas serpentinizadas

El límite impermeable inferior del primer acuífero, el cual es el que se explota y monitorea, lo constituyen depósitos terrígenos de la misma edad, que afloran localmente. El borde impermeable, en superficie lo constituyen los sedimentos terrígenos del Paleógeno y Mioceno inferior que afloran en los bordes del polje. Los límites occidental y oriental están menos claros. Se reconoce una interacción hidráulica con la cuenca Ariguanabo, al Oeste y con la cuenca Mampostón al sureste. En la Cobertura Neotectónica se desarrolla un relieve cársico expresado en llanuras marinas abrasivas–denudativas. En ellas se desarrollan amplios campos de lapies libres desnudos y semilibres parcialmente cubiertos, así como de depresiones asociadas a formas de conducción directamente comunicadas con el acuífero.

La mayor parte del territorio está constituido por rocas de la cobertura platafórmica y se distribuye en tres secuencias, a veces no muy bien definidas:

- ***Complejo formacional terrígeno - clástico:*** representado por las rocas de las formaciones Canimar y Caobas, que se extienden paralelas al litoral y conforman una franja estrecha.
- ***Complejo formacional carbonatado - terrígeno:*** compuesto por las formación Cojímar.
- ***Complejo formacional carbonatado:*** representado por la formación Güines.

El sistema regional de flujo se integra por un grupo, aún indeterminado, de sistemas intermedios y locales de flujo. Convencionalmente, para la gestión de los recursos hídricos se acepta la división por tramos. El río Almendares es la arteria principal de drenaje. Morfológicamente se expresa como un polje, de unos 300 km² de superficie. Morfoestructuralmente se trata de una llanura con predominio de asensos neotectónicos débiles diferenciada en sistemas de bloques en estratos subhorizontales, monoclinales y centroclinales. Los procesos exógenos predominantes son de tipo cársico, lo que le imprime un rasgo peculiar a la morfología de la cuenca y define los factores de control del régimen y la calidad de las aguas subterráneas.

Por razón de la naturaleza cársica del territorio, la zona de alimentación del acuífero regional se extiende por toda su superficie y tiene lugar por dos vías:

- **concentrada**, recibiendo los caudales organizados episódicamente de varios arroyos al norte u organizándose en las inmediaciones de los campos de dolinas activas, entre las que predominan las de tipo sufosivo y de hundimiento en los dos tercios inferiores del acuífero y de los sistemas de cuevas, y

- **difusa**, como escurrentía de superficie (*overland flow*) a través de la capa de suelo y los campos de lapíes libres y semilibres y de dolinas.

La descarga, por lo general, se produce concentrada a través de los Manantiales de Vento, sin embargo, existen importantes puntos de descarga de flujo, a través de manantiales. El patrón general de carsificación es mixto, de tipo de agrietamiento y estratificación, y se reconoce en todas las cuevas activas exploradas. La descarga, cuando es concentrada, sigue los patrones fundamentales del tectoalineamiento post-larámico, fundamentalmente alpídico, de manera que se reconocen dos direcciones fundamentales: una 230-150° y otra 45-225°. Predomina esta última que coincide (ella o sus componentes) con la orientación de los ejes de desarrollo del cavernamiento pretérito y actual. Por lo común, tales descargas subterráneas o submarinas actuales, siguen las orientaciones de paleocauces hipogeos enterrados. Por tal razón, las hidroisohipsas del acuífero sólo reflejan de manera muy general las direcciones del flujo subterráneo. Las conclusiones que suelen derivarse de su interpretación, como la dirección de flujo, gradiente hidráulico y posición de las fronteras tienen, por tanto, un limitado valor de uso, sobre todo, cuando se emplean para diseñar sistemas de explotación de las aguas subterráneas, en particular, campos de pozos.

Los parámetros hidrogeológicos principales son: transmisividad (1000-5000 m²/d); permeabilidad (15-200 m/d); espesor de la zona no saturada (0-25 m); espesor de la zona saturada (80-200 m); nivel Estático (90 % menor 25 m); potencia (300-400 m).

Teniendo en cuenta la información mostrada en síntesis, la cual caracteriza de forma integral la Cuenca en estudio, fueron identificados los modelos más representativos del acuífero, mediante los cuales serán interpretados los datos obtenidos de la modelación futura.

Descripción de los modelos seleccionados para la interpretación de los datos isotópicos en la caracterización del agua subterránea

Generalidades de los modelos y la modelación

Un modelo es quizás mejor definido como la representación de un sistema o proceso real. Un modelo conceptual es una hipótesis de como un sistema o proceso funciona, y esta hipótesis puede expresarse cuantitativamente como un modelo matemático [26]. Los modelos matemáticos son abstracciones que representan los procesos como ecuaciones, las propiedades físicas como constantes o coeficientes en las ecuaciones, y las medidas del estado en el sistema como variables.

La mayoría de los modelos de agua subterránea usados en la actualidad son modelos matemáticos determinísticos. Los modelos determinísticos son basados en la conservación de la masa, la cantidad de movimiento y energía y describen relaciones de causa y efecto. La suposición fundamental es que aportan un alto grado de conocimiento de los procesos por los cuales las tensiones en un sistema producen respuestas subsecuentes en ese sistema, la respuesta del sistema a cualquier juego de tensiones puede predeterminarse, aún cuando la magnitud de las nuevas tensiones están fuera del rango de tensiones históricamente observadas.

Los modelos determinísticos de agua subterránea generalmente requieren la solución de ecuaciones diferenciales parciales. Pueden obtenerse a menudo, analíticamente, las soluciones exactas, pero los modelos analíticos requieren que los parámetros y límites sean muy idealizados. Algunos modelos determinísticos tratan las propiedades de los medios porosos como parámetros

recolectados (esencialmente, como una caja negra), pero esto evita la representación de las propiedades hidráulicas heterogéneas en el modelo. La heterogeneidad en las propiedades acuíferas, es característico de todo sistema geológico y está reconocido como que juega un papel importante influyendo en el flujo de agua subterránea y en el transporte. Así, es a menudo preferible aplicar el modelo de parámetro distribuidos, los cuales permiten la representación de distribuciones más realistas de las propiedades del sistema. Los métodos numéricos rinden las soluciones aproximadas a la ecuación o ecuaciones regentes a través de la discretización del espacio y el tiempo. Los modelos determinísticos, numéricos y de parámetro distribuido, pueden relajar las condiciones rígidas idealizadas de los modelos analíticos o modelos de caja negra, pudiendo ser más realistas y flexibles para simular las condiciones de campo.

Cuando un algoritmo numérico se lleva a cabo en un código de computación para resolver una o mas ecuaciones diferenciales parciales, el código de computación resultante puede ser considerado un modelo genérico. Cuando las dimensiones de la red, las condiciones límites y otros parámetros (conductividad hidráulica, etc.), son especificados en una aplicación de un modelo genérico para representar una área geográfica particular, el programa de computación resultante es un modelo local específico. La capacidad de los modelos genéricos para resolver las ecuaciones con precisión se demuestra típicamente por sus aplicaciones a problemas simplificados, lo cual no garantiza un nivel similar de exactitud cuando el modelo se aplica a un problema de campo complejo. Si el usuario de un modelo es desprevenido o ignora los detalles del método numérico, pueden introducirse errores significativos sin ser detectados. La inexactitud de la solución puede o no reflejarse en el error del balance de masa.

Diseño, desarrollo y aplicación de modelos

El primer paso en el modelaje y su aplicación es definir la naturaleza del problema y evaluar el propósito del modelo. Este paso esta estrechamente vinculado con la formulación de un modelo conceptual, el cual es requerido para el desarrollo de la simulación. Formulando un modelo conceptual, el analista debe evaluar qué procesos son significantes en el sistema que esta investigándose. La eficacia y exactitud en el modelado de un sistema probablemente este más afectada por la formulación de un modelo conceptual apropiado que por la elección de un método numérico o código particular.

Una vez tomada la decisión para desarrollar un modelo, un código (o el modelo genérico) debe ser seleccionado (o modificado o construido). Luego, el código genérico debe ser adaptado al lugar específico que es simulado. El desarrollo de un modelo numérico determinístico, de simulación, de parámetro distribuido, involucra la selección o diseño espacial de redes e incrementos de tiempo que rendirán una solución exacta para el sistema y problema dado. El analista debe especificar entonces las propiedades del sistema (y sus distribuciones), tensiones en el sistema (recarga e índices de bombeando), las condiciones límites e iniciales (para los problemas transitorios).

En el desarrollo de un modelo determinístico de aguas subterráneas para un área y propósito específico, debemos seleccionar un nivel apropiado de complejidad. Se debe tener también en cuenta que aunque los datos apropiados estén disponibles, un modelo numérico tridimensional discretizado puede ser demasiado grande para correr en las computadoras disponibles, sobre todo si los procesos de transporte son incluidos.

Consideraciones sobre el modelado

La evolución de la composición isotópica dentro de un sistema geohidráulico puede ser modelado usando las ecuaciones para el movimiento de solutos, siempre que las condiciones límites e iniciales y otros parámetros apropiados sean conocidos. Esto es llamado *modelado hacia delante*.

El proceso opuesto de interpretación de datos de campo para estimar parámetros se llama *modelado inverso*. El objetivo de los métodos isotópicos es invertir los datos de campo para estimar índices de recarga, edades del agua, velocidades del trazador o los tiempos de residencia. Al invertir los datos de campo, es necesario considerar dos tipos de errores. El primero es el *error de la medida*, el cual está asociado con el muestreo y la variabilidad espacial de los datos, los errores involucrados en los análisis químicos e isotópicos, aquellos de la estimación de la función de entrada y otros parámetros. La mayoría de estos errores son cuantificables. El segundo tipo de *error es asociado con las suposiciones del modelo*. Generalmente, este segundo tipo de error es más difícil de cuantificar y sólo puede evaluarse por los experimentos bajo condiciones controladas o comparando estimaciones obtenidas por varios métodos.

Si el modelado inverso se hace, el error de estimar los índices de recarga dependerá en parte de los dos tipos de errores, pero también en la sensibilidad del modelo. Si el perfil final de un trazador es muy poco dependiente de los flujos de agua, la inversión del perfil del trazador será muy sensible a la medida y errores del modelo (en estos casos, la inversión indica que está mal planteada). El objetivo de todos los métodos isotópicos es un diseño de modelos los cuales sean afectivos para obtener índices de recarga, edades de agua e información geohidráulica.

Principales modelos seleccionados

Para cualquier evaluación hidrológica cuantitativa de los resultados de un estudio de trazador (isótopos ambientales, etc.) el flujo de agua subterránea en el sistema geohidráulico debe ser idealizado tomando en cuenta las propiedades físicas del isótopo empleado (desintegración radioactiva, etc.) y las características del flujo transportador (agua subterránea). Para el uso de datos hidrológicos de isótopos, han sido desarrollados modelos conceptuales y modelos de caja negra [71,72,113].

Teniendo en cuenta las características particulares de la región de estudio, ha sido seleccionada la variedad de modelos necesarios para caracterizar el comportamiento de la dinámica de flujos, permitiendo interpretar los datos isotópicos generados y estimar los balances de masa para cumplir los objetivos propuestos en el Proyecto que se desarrolla. Estos modelos son los que más representan la realidad en cada uno de los casos a evaluar dentro de la Cuenca hidrográfica que se evalúa.

Entre la amplia gama de modelos posibles a utilizar, fueron seleccionados los siguientes:

Modelos de Caja negra

Los modelos de caja negra son particularmente útiles para interpretar datos del trazador, cuando no es posible, ni justificado, usar el modelo de parámetros distribuidos, ya que este último requiere de conocimientos más detallados del sistema investigado, lo que es frecuentemente imposible [72]. Para comprender bien el método de las trazas y la interpretación de sus datos, varias definiciones son dadas en la Introducción de este informe. [39,63,64,93].

Teóricamente el *modelo del flujo-pistón*, el *modelo de dispersión* y el *modelo exponencial* se describen por el *modelo de caja negra* o *modelos de recopilación de parámetros* [72,113]. Estos modelos usan la función del tiempo de residencia $f(\bar{t}, P)$ con \bar{t} como tiempo de residencia (tiempo de producción) de un volumen de agua subterránea y P como parámetro hidrogeológicamente relevante que describe el trazador (isótopo), la concentración (actividad específica) $C_{in}(t)$ es la actividad específica de los componentes mezclados de diferentes tiempos de tránsito. La actividad específica de la muestra mixta $C_{out}(t)$ se da por la integral de circunvolución:

$$C_{out}(t) = \int_0^{\infty} C_{in}(t - t') \cdot f(\bar{t}, P) \cdot e^{-\lambda \cdot t'} dt' \quad (1)$$

donde t es el tiempo de muestreo; $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$ es la constante de decaimiento del isótopo medioambiental (para los isótopos estables $\lambda = 0$); t' es el intervalo de tiempo entre la entrada del isótopo ambiental desde la atmósfera dentro de la zona no saturada y su llegada de la zona saturada [11]. La función de entrada $C_{in}(t - t')$ representa la concentración o actividad en la cual el isótopo ambiental pertinente llega a estar involucrado en la recarga del agua subterránea. No se consideran los procesos de Geoquímicos.

Los diferentes modelos de caja negra son caracterizados por su función de distribución de tiempos de residencia $f(\bar{t}, P)$ [72,113]. Para el modelo del flujo-pistón (PFM).

El resultado final de la *ecuación 1* para una constante C_{init}

$$C_{out}(t) = C_{init} \cdot e^{-\lambda \cdot \bar{t}} \quad (2)$$

La respuesta de la función del tiempo de residencia $f(t, P)$ del modelo exponencial (EM) se da por:

$$f(t', P) = \frac{1}{t} e^{-\frac{t'}{t}} \quad (3)$$

Cuando C_{init} no varía con el tiempo y t es el tiempo de infiltración del agua desde la superficie del agua subterránea a cualquier punto del acuífero, el modelo exponencial para un isótopo con constante de decaimiento λ expresa:

$$C_{out}(t) = \frac{C_{init} \cdot e^{-\lambda \cdot t}}{1 + \lambda \cdot t_{avg}} \quad (4)$$

La función $f(t', P)$ del modelo de dispersión (DM) será:

$$f(t', P) = \frac{1}{t' \sqrt{4\pi \frac{D}{v_{trac} \cdot z} \frac{t'}{\bar{t}}}} \exp \left(-\frac{(1 - \frac{t'}{\bar{t}})^2}{4D \frac{t'}{v_{trac} \cdot z \bar{t}}} \right) \quad (5)$$

donde z es la distancia del transporte.

Modelo de flujo de pistón

En el método del modelo de flujo de pistón (MFP) se asume que las líneas de flujo tienen el mismo tiempo de tránsito, y la dispersión hidrodinámica y la difusión son despreciables. Por consiguiente, los trazadores se mueven desde el área de la recarga como si estuvieran en un cubo. La función de respuesta se obtiene a través de la función delta de Dirac, $g(t') = \delta(t' - t_i)$,

$$C(t) = C_{in} (t - t_t) \exp(-\lambda t_t) \quad (6)$$

La ecuación 6 significa para el MFP que la concentración de salida a un tiempo dado es igual a la concentración al tiempo t_t inicial, y solo es modificado por el decaimiento radiactivo durante el lapso de tiempo t_t . El tiempo de tránsito del trazador (t_t) es el único parámetro del modelo, y la forma de la función de concentración de entrada es copiada por la concentración de salida. Se mostrará más adelante que el MFP sólo es aplicable a los sistemas con entrada constante de los trazadores. Los tres modelos considerados en las secciones siguientes son los más comúnmente empleados.

La situación hidrogeológica más simple se representa por el modelo de flujo-pistón. En este caso el flujo de agua subterránea en el acuífero es similar al que fluye a través de un tubo y se describe por la ley de Darcy. Las composiciones químicas disueltas y el isótopo estable no cambian. La actividad de los isótopos medioambientales radiactivos decrece con el tiempo o con la distancia de flujo según la ley de desintegración radioactiva. La cantidad de agua subterránea en los restos del sistema como la recarga y descarga es balanceado.

En sistemas naturales de agua subterránea, que tienen más de un acuífero o están sujetos a las interacciones con el agua superficial, el mezclado del agua subterránea de diferentes edades y orígenes es común. Los casos más simples se describen por dos y tres componentes de modelos de mezcla. En la trama de dos parámetros de dos miembros finales las líneas rectas permiten leer las proporciones de los estos dos. En el caso de mezclas de tres componentes se obtiene un triángulo bordeado por tres líneas mezcladas de 2 componentes.

Dos miembros finales I y II con las propiedades X_I y X_{II} son mezclados con las proporciones x_I y x_{II} . La ecuación de balance de masa es:

$$x_I \cdot X_I + x_{II} \cdot X_{II} = Y \quad \text{con} \quad x_I + x_{II} = 1 \quad (7)$$

La proporción x_I del miembro final I es calculada de las propiedades de los miembros finales I y II y así de la muestra X_{spl} por:

$$x_I = \frac{X_{spl} - X_{II}}{X_I - X_{II}} \quad (8)$$

La precisión de las proporciones determinadas de dos componentes mezclados es mejor que el $\pm 10\%$ para el mar y de agua dulce como los miembros finales, pero peor que el $\pm 25\%$ para el agua dulce y mineralizada isótopo usando datos del hidroquímicos e isotópicos. Si un sistema es monitoreado sobre períodos largos o dentro de intervalos de tiempo muy cortos, algunos componentes del agua subterránea y superficial pueden ser separados uno del otro.

Una modificación del modelo del flujo-pistón también considera la dispersión. Este proceso describe el mezclando de componentes de agua subterránea vieja moviéndose sobre cortas distancias con diferente velocidad dentro del acuífero. La señal del isótopo llega a ser suavizada. Este proceso es importante para la interpretación de la composición del isótopo, si el agua subterránea tiene una velocidad alta como en los sistemas de agua karstica pero esto es usualmente despreciable para movimientos lentos del agua subterránea la cual puede ser datada por el método ^{14}C .

La mezcla de muchos componentes del agua subterránea vieja es supuesta para el agua subterránea poco profunda bombeado y particularmente para el agua de manantial de los acuíferos fisurados (por ejemplo fuentes de aguas karsticas). La distribución de la edad puede aproximarse por la función exponencial (modelo exponencial). El modelo exponencial correspondiente es basado en la suposición de mezcla de un número teóricamente infinito de diferentes componentes viejos de los cuales las proporciones disminuyen exponencialmente con el aumento de la edad. Cada componente tiene su composición específica del isótopo según la función de entrada.

Para los acuíferos freáticos extendidos con una tasa de recarga difusa Q_{rec} , el promedio de la edad del agua fue calculada por el modelo exponencial, asumiendo una porosidad constante y espesor del acuífero d :

$$t_{avg} = \frac{n_{tot} \cdot d}{Q_{rec}} \quad (9)$$

Para un acuífero de roca dura con el espesor constante y una porosidad exponencialmente decreciente obtenemos:

$$t_{avg} = \frac{n_{tot}(0) \cdot d_{char}}{Q_{rec}} \quad (10)$$

donde $n_{tot}(0)$ es la porosidad total a profundidad cero y el d_{char} es la profundidad característica dónde la porosidad ha disminuido por un factor de 2.72 (= e).

Modelo exponencial

En el método del modelo exponencial (ME), se asume que las líneas de flujo tienen una distribución exponencial de los tiempos de tránsito, por ejemplo, la línea más corta tiene el tiempo de tránsito igual a cero, la más larga tiene el tiempo de tránsito igual a infinito. Se asume que no hay intercambio de trazadores entre las líneas de flujo y entonces se obtiene la siguiente función de respuesta:

$$g(t') = t_t^{-1} \exp(-t'/t_t) \quad (11)$$

Esta relación es matemáticamente equivalente a la función de la respuesta de un depósito bien mezclado. Algunos investigadores rechazan el ME porque en principio ningún buen mezclado puede ocurrir en acuíferos, mientras que otros exigen la aplicabilidad del ME por ser indicador de condiciones de buena mezcla en un sistema de agua subterránea. Ambas opiniones están equivocadas porque, como se mencionó, el modelo está basado en una suposición de que no hay ningún intercambio (mezcla) de trazadores entre las líneas de flujos de partículas [37,65,69,113]. Si los trazadores se intercambian entre las líneas de flujo con una distribución exponencial de tiempos de transporte, su distribución tenderá a ser descrita por el modelo de dispersión (mostrado más adelante). Los efectos esperados son similares a los efectos mostrados por las distribuciones de trazadores en un flujo laminar en un capilar [72]. La comprensión de todos los efectos que pueden llevar a las diferencias entre la función de respuesta de los trazadores y la distribución de líneas de flujo es muy útil para una interpretación apropiada de datos isotópicos.

Para la aproximación del modelo exponencial, el mezclado ocurre sólo en el lugar de muestreo (manantial, pozo, corriente o río). En general, los sistemas de agua subterránea nunca se mezclan bien y ellos pueden contener aguas mezcladas sólo si dos, o más, flujos de agua se encuentran, o en zonas de transición donde la dispersión hidrodinámica y la difusión juega un papel importante.

Similarmente para el MFP, el tiempo medio de tránsito (edad) del trazador es el único parámetro del ME que inequívocamente define la distribución completa del tiempo de tránsito. Por consiguiente, cuando se reporte la edad del trazador, el modelo empleado o la función de respuesta también debe darse. La función de respuesta del ME muestra que el modelo es inaplicable a los sistemas en los cuales infinitesimalmente las líneas de flujo cortas no existen. En otras palabras, el EM no es aplicable cuando se toman muestras bien por debajo de la superficie de tierra, ej. pozos protegidos a profundidades grandes, minas, y flujos artesianos. La experiencia muestra que muy a menudo, debido a un registro demasiado corto del datos del trazador, el modelo exponencial produce un buen ajuste aunque su uso no está justificado. En tales casos, debe recordarse que el resultado obtenido es una aproximación grosera, y la situación real puede ser descrita más adecuadamente por uno de los modelos mostrados más adelante.

El ME y otros modelos con un amplia distribución de edades, describen situaciones en las cuales solo las líneas de fuerzas más cortas, suministra al sitio de muestreo un trazador con decaimiento (ejemplo, ^3H) o un trazador sin decaimiento, con la función de entrada comenzando en cero. En consecuencia, el conocimiento sobre todo el sistema se deriva de la información disponible para esta fracción con pequeñas edades (tiempos de tránsito cortos). En otras palabras, la parte remanente del sistema, el cuál no suministra trazadores al lugar de muestreo, puede tener una distribución de líneas de flujo bastante diferente a los asumidos en el modelo.

Modelo combinado de flujo Pistón-Exponencial

En la aproximación del MPE, el acuífero se asume que consiste de 2 partes en línea, una con la distribución exponencial de tiempos de transitos y otra con la distribución aproximada por el flujo de pistón. La función de respuesta de el MPE es:

$$\begin{aligned} g(t') &= (\eta/t_t) \exp(-\eta t'/t_t + \eta - 1) & \text{para } t' \geq t_t(1 - \eta) & \quad (12) \\ g(t') &= 0 & \text{para } t' < t_t(1 - \eta) & \end{aligned}$$

Donde η es la relación del volumen total entre el volumen con la distribución exponencial de tiempos de transitos, por ejemplo, $\eta=1$ significa el modelo de flujo exponencial. La función de respuesta es independiente de la secuencia en la cuál el ME y el MPE son combinados. El MPE tiene 2 parámetros de ajustes (buscados), t_t y η . Para bajos valores de η este modelo es cercano al ME, mientras que para grandes valores de η es algo más similar al modelo de dispersión con un valor pequeño del parámetro de dispersión aparente. Este modelo es algo más realista que el modelo exponencial porque permite la existencia de un retraso de las líneas de flujo más cortas.

Modelo de dispersión

En el modelo de dispersión (MD), la siguiente solución unidimensional de la ecuación de dispersión para un medio semi-infinito es empleada como la función de respuesta [62].

$$g(t') = (4\pi P_D t'/t_t)^{-1/2} t'^{-1} \exp[-(1 - t'/t_t)^2 / (4P_D t'/t_t)] \quad (13)$$

donde P_D es el parámetro de dispersión aparente (recíproco del número de Peclet), el cuál no se relaciona con la dispersividad común de los sistemas de aguas subterráneas y fundamentalmente depende de la distribución de los tiempos de tránsito [65,69,113,114]. Algunos autores en vez de la ecuación 13, aplican la solución de la ecuación de dispersión para un medio infinito, lo cuál es inadecuado, especialmente en casos de altos valores del parámetro de dispersión [62,65,113]. **Los modelos Conceptuales** son individualmente desarrollados para sistemas geo-hidráulicamente más complicados (ej. acuíferos permeables).

Aplicación de los modelos

Aplicaciones del modelo para casos de entrada constante de trazadores.

La aproximación del parámetro ajustado es aplicable para cualquier trazador con entrada variable; esto también es aplicable para radioisótopos con una entrada de concentración constante. Sin embargo, en el último caso una única interpretación es posible solo para modelos con un parámetro simple (buscado), porque 2 valores desconocidos no pueden ser hallados desde una simple ecuación. Las soluciones más típicas a la ecuación 2.4 para una entrada constante (C_o) son:

$$C = C_o \exp(-\lambda t_i) \quad \text{para MFP} \quad (14)$$

$$C = C_o/(1 + \lambda t_i) \quad \text{para ME} \quad (15)$$

$$C = C_o \exp\{(2P_D)^{-1} \times [1 - (1 + 4\lambda P_D t_i)^{1/2}]\} \quad \text{para MD} \quad (16)$$

Los investigadores quienes han aplicado la *ecuación 14* para datación y comprenden sus limitaciones a menudo usan el término de edad aparente del trazador para la edad de la trazador del MFP. Las *ecuaciones 14, 15 y 16* demuestran que la edad del radioisótopo es una correcta representación de la edad media del trazador (t_i) solo para el MFP, el cuál es igual a la edad media del agua (t_w) bajo condiciones favorables. Para una presentación gráfica de los valores de C/C_o producidos por modelos (Ver Figura 4) [61]. Cuando es imposible obtener una única solución de dos o más parámetros buscados, la edad no puede encontrarse de C/C_o . Por consiguiente, si ninguna otra información está disponible, por lo menos deben darse los valores límites de edad dados por el MFP y el ME.

En general, cuando el patrón de flujo es desconocido, la interpretación debe realizarse por modelos diferentes, y las edades obtenidas pueden considerarse como límites de los valores reales. Ese problema sólo es serio para edades relativamente grandes. Puede demostrarse fácilmente que si la edad del trazador es menor que la vida media del radioisótopo ($t_a < T_{1/2} = 0.693/\lambda$), todos los modelos producen valores cercanos de edades independientemente del modelo de flujo supuesto [65,72,113].

En el caso de entrada constante del trazador, la edad puede encontrarse con una única medición. La única manera de validar, o confirmar, un modelo es comparar sus resultados con otros datos independientes, si están disponibles. Sin embargo, los trazadores medioambientales son particularmente útiles en investigaciones de sistemas conocidos pequeños, donde ningún otro dato está disponible para comparaciones. Por consiguiente, se juzga la validez general de modelos particulares en base a la vasta literatura del tema.

Aplicación de los modelos para caso de entrada variable de trazadores

Método de Tritio

Las concentraciones altas de ^3H en la precipitación de principios de los años 60, ofrecen una única oportunidad para datar sistemas de agua subterráneas jóvenes en una gama relativamente amplia de edades. En el caso de flujo del pistón, o sistemas con dispersividad muy bajo, el método del tritio (^3H) produce edades de aguas recargadas después del año 1952 porque para aguas más viejas las concentraciones presentes están cerca del cero. Sin embargo, para sistemas aproximados por el modelo exponencial, pueden determinarse incluso las edades del orden de 1000 años. Para los sistemas dispersivos típicos, se observan a menudo las edades de 100-200 años. Por consiguiente, el ^3H medioambiental todavía es el trazador más útil para datar aguas jóvenes, sobre todo en el

hemisferio norte. Desafortunadamente, en los trópicos el pico del ^3H atmosférico fue mucho más bajo, y en el hemisferio meridional (sur) este fue incluso más tardío, lo que hace la datación más difícil o imposible.

Las variaciones estacionales de la concentración de ^3H en la precipitación así como las variaciones en la precipitación y la tasa de infiltración, causan dificultades en la estimación de la función de entrada, es decir, $C_{in}(t)$. Para cada año calendario, el valor de entrada puede expresarse como:

$$C_{in} = \frac{\sum_{i=1}^{12} C_i I_i}{\sum_{i=1}^{12} I_i} = \frac{\sum_{i=1}^{12} C_i \alpha_i P_i}{\sum_{i=1}^{12} \alpha_i P_i} \quad (17)$$

donde C_i , P_i y I_i son la concentración de ^3H en la precipitación, tasa de la precipitación, y tasa de la infiltración para el mes i -th, respectivamente. El coeficiente de infiltración ($\alpha_i = I_i/P_i$) representa la fracción de precipitación, la cual entra en el sistema de agua subterránea en el mes i -th. El registro de valores C_{in} , calculado para cada año previo a la última fecha de muestreo, representa la función de la entrada. Para la interpretación de datos viejos de ^3H , el registro de C_{in} debe incluir los valores de C_{in} constantes observados antes del comienzo del levantamiento de los valores en 1954 causados por las prueba de bomba de hidrógeno en la atmósfera, en otros casos pueden empezarse los cálculos de la función de entrada desde 1954.

En general, estos coeficientes usualmente permanecen desconocidos, y las aproximaciones tienen que ser aplicadas. Si es asumido que el coeficiente de infiltración para los meses de verano (as) de cada año es la misma fracción del coeficiente de infiltración en el mes de invierno (aw), es decir, $a = as/aw$, entonces:

$$C_{in} = [(\alpha \sum_{i=4}^9 C_i P_i)_s + (\sum_{i=10}^3 C_i P_i)_w] / [(\alpha \sum_{i=4}^9 P_i)_s + (\sum_{i=10}^3 P_i)_w] \quad (18)$$

En el hemisferio norte los meses de verano son de abril a septiembre (del cuarto al noveno mes), y los meses del invierno son de octubre a marzo (del décimo al tercer mes del próximo año calendario). Deben tomarse, de la estación meteorológica más cercana, cantidades mensualmente de la precipitación, y los datos de ^3H deben tomarse de la estación más cercana de la red del OIEA. Cuando no se disponen de registros completos, el registro de una estación dada tiene que ser completado por correlación, extrapolando con otra estación donde existe un registro completo. La experiencia muestra que en una aproximación grosera, la función de entrada de las estaciones distantes, con condiciones climáticas similares a aquéllas del área investigada, puede usarse, sobre todo para edades mayores a los 20 años aproximadamente. El carácter del pulso y los valores bajos dieron razones para opinar que Método del ^3H sería de muy poco uso en el futuro cercano. Sin embargo, parece que este método del ^3H seguirá siendo el mejor método para datar aguas jóvenes por lo menos durante dos décadas. También es evidente que para valores grandes no se observan cambios drásticos en la función de la entrada.

Es bien conocido que bajo condiciones climáticas moderadas, la recarga toma lugar principalmente en los meses de invierno. Por consiguiente, en algunas salidas tempranas el coeficiente esta asumido con valores igual a 0 ó 0.05. Sin embargo, la composición isotópica del agua subterránea poco profunda, es normalmente igual, o aproximada, a la composición isotópica de la precipitación ponderada en el año, incluso en áreas donde prevalece la evapotranspiración potencial por encima de la precipitación en meses de verano. Esto significa que en los meses de verano la evapotranspiración, en cierto modo, elimina agua almacenada en la zona no saturada para los meses de verano y meses de invierno [11]. En consecuencia, el agua restante que alcanza el nivel freático, representa la precipitación del invierno y del verano. Cuando existen datos de la

precipitación local y datos de isotópicos, o si ellos están disponibles de una estación cercana, el valor del un coeficiente puede estimarse:

$$\alpha = [(\sum_{i=10}^3 P_i \delta_i)_w - \delta(\sum_{i=10}^3 P_i)_w] / [\delta(\sum_{i=4}^9 P_i)_s - (\sum_{i=4}^9 P_i \delta_i)_s] \quad (19)$$

En esta ecuación, s, w son las composiciones del isótopo estable de la precipitación en los meses de verano y de invierno respectivamente; y d es la composición isotópica del agua subterránea local ($d^{18}\text{O}$ o $d^2\text{H}$) [2,41,42,60,103]. Esta ecuación es útil si están disponibles, por tiempo suficientemente largos (unos años) los datos de la composición isotópica y las tasas de la precipitación. Sin embargo, para los climas tropicales moderados y húmedos, el coeficiente normalmente está dentro del rango de 0.4-0.8, y la experiencia muestra que dentro de este rango la exactitud de modelado depende sólo ligeramente del valor supuesto, si las edades son mayores de 10-20 años. Mientras mayor sea el número de parámetros buscados, menor será la fiabilidad del modelado, por consiguiente, el número de parámetros buscados debe mantenerse tan bajo como sea posible. Es un error común asumir $a=0$ en base a observaciones hidrológicas convencionales que indican la falta de recarga en algunas áreas durante los meses de verano, porque esto no significa la carencia de ^3H en el agua recargada en el verano.

Modelo de Compartimento para la simulación del agua subterránea

Otro método para interpretar los resultados de isótopos hidrológicos son los sistemas específicos de **modelos compartimentales o modelos de celdas múltiples**. En este enfoque el sistema de agua subterránea es dividido en cajas geo-hidráulicamente creíbles con un supuesto (fuente de agua mezclada) la concentración del trazador y los parámetros geo-hidráulicos bien definidos. Los volúmenes, los parámetros, etc., son adaptados hasta que las curvas de entrada y salida se adaptan mejor con los datos obtenidos. Este método se perfeccionó por un procedimiento de optimización cuadrática para determinar parámetros geo-hidráulicos que requieren de datos hidroquímicos e isotópicos [10]. Estos métodos son muy valiosos si el conocimiento geo-hidráulico del sistema de agua subterránea estudiado es escaso.

Es esencial emplear las series de tiempo de los datos de isótopos ambientales diferenciando las vidas medias e intentar interpretar los datos por varios modelos. Aparentemente, edades o tiempo de residencia contradictorios pueden ser obtenidos. Las desviaciones, sin embargo, permitirán descifrar el sistema de agua subterránea investigado. En cualquier caso, el consenso entre los resultados del modelado y los empírico no significan automáticamente que el modelo aplicado describe la realidad natural [71,94].

Se han usado modelos de Compartimento para resolver el problema inverso (estimando las propiedades acuíferas y las condiciones del límite de la recarga) [5,6,7,8,9]. Otras aplicaciones han buscado determinar las edades de las aguas subterráneas y los tiempos de residencia [21,22,23,24,60] o analizar los datos del trazador y delinear la dinámica del agua subterránea [108,109,110]. Otros investigadores los han usado como modelos de transporte [97,104].

Modelo simple

Se utiliza un modelo numérico de compartimento o de celdas mezcladas [21,102] para simular el flujo en sistemas subterráneos. El código ha sido aplicado a una gran variedad de sistemas de flujos subterráneos [21,22,23,24,25,60]. El modelo de compartimento representa el sistema de

aguas subterráneas como una red de celdas interconectadas o compartimentos a través de los cuales se transporta el agua y los componentes disueltos (trazadores).

Cada celda en el modelo describe una región del sistema hidrogeológico, las regiones están diferenciadas basadas en su uniformidad hidrogeológica, la disponibilidad de los datos y el grado de resolución deseado. Las celdas pueden ser de cualquier tamaño y ordenadas en una configuración uni, bi o tridimensional. El modelo puede ser empleado únicamente o en combinación con modelos de flujo. Los modelos de compartimento permiten al usuario especificar el flujo que pasa entre las celdas y la descarga del sistema. La descarga puede ser calculada utilizando la teoría del depósito lineal. Esto, requiere de una estimación inicial del sistema de flujo, por tanto debe establecerse un grupo inicial de especificaciones. Durante el proceso de calibración, estos parámetros son ajustados por el modelador, para obtener un convenio entre las concentraciones del trazador simulado y observado (como trazadores se utilizan los isótopos ambientales).

Balance de masa del trazador

La ecuación básica aplicada a cada celda o compartimento es [102]:

$$S(N) = S(N-1) + [BRV(N) \times BRC(N)] - [BDV(N) \times BDC(N)] \quad (20)$$

donde, $S(N)$ = estado de la celda aun número de iteraciones N (la masa del trazador dentro de la celda); $BRV(N)$ = volumen límite de recarga (el volumen de entrada de agua en un número de iteraciones N); $BRC(N)$ = concentración límite de recarga (concentración de entrada del trazador); $BDV(N)$ = volumen límite de recarga (volumen de salida del agua que abandona el compartimento o la celda); y $BDC(N)$ = concentración límite de descarga (concentración de salida del trazador).

La concentración del trazador y el volumen de agua que sobrepasan los límites del modelo y la entrada/salida a una celda en los límites del modelo, son dados por el prefijo "SYSTEM" o "S", por tanto la recarga que entra a una celda fuera de los límites del modelo, tiene una concentración característica del trazador SBRC (Concentración de Recarga Límite del Sistema) y volumen SBRC (Volumen de Recarga Límite del Sistema). La *ecuación de balance de masa 20* es aplicada consecutivamente para cada celda durante una iteración dada, la descarga (BDV y BDC) de una celda "aguas arriba" se convierte a recarga (BRV y BRC) de una celda "aguas abajo". El único término desconocido en el miembro derecho de la ecuación 3.1 es $BDC(N)$ y el mismo puede ser determinado a partir de una de las dos reglas del mezclado; la celda de mezclado simple (SMC), la cual simula la mezcla perfecta ó la celda de mezclado modificado (MMC), la cual simula un régimen entre la mezcla perfecta y el flujo pistón. Para el SMC:

$$BDC(N) = [S(N-1) + BRV(N) \times BRC(N)] / [VOL + BRV(N)] \quad (21)$$

Para el MMC:

$$BDC(N) = S(N-1) / VOL \quad (22)$$

donde: VOL = volumen de agua en la celda, igual al tiempo correspondiente al volumen total de la celda, su contenido volumétrico de humedad (para flujos no saturados) o su porosidad efectiva (para flujos saturados). Nótese que el MMC simula el flujo pistón puro como $BRV \rightarrow VOL$ y la mezcla perfecta como $BRV \rightarrow 0$. Aunque el flujo pistón puro dentro de una celda es posible, para el arreglo completo de celdas no lo es porque puede ocurrir algún grado de mezclado entre las celdas

[22]. La misma regla de mezclado debe ser utilizada para cada celda durante la corrida de un modelo dado. En el modelo descrito se utilizó la regla MMC.

Flujo transiente

Las ecuaciones anteriores no pueden emplearse para cambios en el almacenamiento dentro del sistema de agua subterránea. Los modelos de compartimento anteriormente existentes han tratado la transitoriedad [110]. Refiriendo a algunos autores previos [21,110] se puede simular el *flujo transiente* asumiendo que el flujo de salida de un depósito de agua subterránea es proporcional al almacenamiento en el depósito [33,34].

$$S=KQ \quad (23)$$

donde: S= almacenamiento umbral, por debajo del cual el flujo de salida es 0; K= tiempo que demora el almacenamiento en el compartimento; y Q= caudal del flujo de salida del elemento. La Ec. 3.4 describe un elemento conceptual conocido como un depósito lineal. En el contexto del modelo de compartimentos, la *ecuación 23* para un compartimento simple es:

$$VOL(N) = K*BDV(N) \quad (24)$$

esta ecuación no tiene en cuenta la presencia de un umbral en el compartimento, pero puede ser adaptada para algunos casos reescribiendo la *ecuación 24*:

$$VOL(N) - PHI = K*BDV(N) \quad (25)$$

donde: PHI= volumen umbral del compartimento, por debajo del cual la descarga del compartimento es definida como 0. Si $VOL(N) \leq PHI$, entonces $BDV(N)$ es definida como 0. Si K es constante para todo N, entonces el sistema descrito por las ecuaciones anteriores es lineal, sistema de tiempo no variable; si K es una función del tiempo ó del número de iteraciones N, ej: $K= K(N)$, entonces el sistema es lineal, sistema de tiempo variante [75]. Si la *ecuación 24* es reescrita para un número de iteraciones N+1 y sustituida en la *ecuación 26*, se obtiene una ecuación de conservación del Volumen para un compartimento o celda dados.

$$VOL(N+1) = VOL(N) + BRV(N+1) - BDV(N+1) \quad (26)$$

El resultado es:

$$VOL(N+1) = VOL(N) + BRV(N+1) - [VOL(N+1)/K] \quad (27)$$

Las cuales simplifican a:

$$VOL(N+1) = [K/K+1] [VOL(N) + BRV(N+1)] \quad (28)$$

Para un número de iteraciones N+1, todas las cantidades del miembro derecho de la ecuación 3.9 son conocidas, por tanto el VOL (N+1) puede ser calculado. Una vez calculada esta magnitud, $BDV(N+1)$ puede ser calculada a partir de la *ecuación 24*.

Datación

Cuando la recarga del modelo de un compartimento no varía con el tiempo, el cálculo de la edad o del tiempo de residencia del agua en un compartimento o celda es relativamente confiable [21,23,24].

Para el caso SMC:

$$AGE = \left[\frac{VOL + BRV}{BRV} * DELT \right] + \sum_{i=1}^k [FBRV_i * AGE_{FBRV_i}] \quad (29)$$

donde: AGE= edad del agua en la celda; DELT= tiempo real entre iteraciones; FBRi= fracción de toda el agua que llega a la celda (BRV) la cual proviene de la celda i; AGE_{FBRVi}= edad del FBRVi; y k= número superior de celdas que contribuyen con aguas directamente a la celda.

Para el caso MMC:

$$AGE = \left[\frac{VOL}{BRV} * DELT \right] + \sum_{i=1}^k [FBRV_i * AGE_{FBRV_i}] \quad (30)$$

La distribución de edades y la distribución cumulativa de edades de cada celda puede ser simulada por un método de impulso-respuesta [24]. La edad del agua en cada celda puede ser calculada por una inyección instantánea del trazador a través de la entrada SBRV a cada celda (agua de recarga de edad 0, etc.). La edad es entonces calculada como:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^N iC(N)_i}{\sum_{i=1}^N C(N)_i} * DELT \quad (31)$$

donde: C= concentración del trazador en la celda y \bar{A} = edad del agua en la celda, igual a AGE (ecuaciones 29 ó 30); excepto para errores de truncamientos asociados con C. La distribución de edades de \bar{A} puede ser obtenida a partir de C(N) porque la concentración del trazador en cada celda a un número de iteraciones N después de la inyección es una medida de la cantidad fraccionaria de la edad del agua (N*DELT) en la celda. La distribución de edades cumulativas puede ser fácilmente determinada a partir de la distribución de edades [24].

Hay momentos en que el modelo de compartimentos puede ser operado bajo condiciones de estado continuo (para un VOL de celda constante) pero la recarga del modelo puede variar, quizás para simular cambios en el régimen hidrológico inducidos por cambios climáticos. Bajo estas condiciones las ecuaciones anteriores no pueden ser utilizadas para calcular la edad, por tanto deben ser usadas relaciones más complicadas [23,24].

Modelo de celdas mezcladas para la simulación del transporte de isótopos ambientales

El método de las celdas mezcladas junto con las técnicas de vía del flujo se usa para simular el flujo de agua subterránea y dinámicas de transporte en sistemas acuíferos cársicos de gran potencia [3,66,67,68]. El modelo se desarrolla como compatible con la estructura del procesamiento de datos de los métodos de sistemas de información geográficos (GIS). La configuración de las celdas, los sistemas geológicos e hidrogeológico y los eventos de recarga y descarga están todos definidos en coordenadas espaciales. Esto ayudará en posteriores asociaciones de los modelos a un sistema GIS.

La estructura del modelo es similar a los modelos de flujo de diferencia finita como MODFLOW [77] por lo que se refiere al diseño de la red y la estructura discreta del flujo y ecuaciones de transporte. Como en los modelos de transporte y flujos de agua determinístico, el modelo impone grandes requisitos para los datos y es esencialmente imposible obtener una única solución y los

parámetros y variables obtenidas por el modelo no son los valores reales y únicos que representan el sistema físico. Ellos son valores aproximados basados en el conocimiento limitado sobre el sistema. Debido al tamaño y la complejidad del sistema acuífero, el conocimiento de la distribución espacial y temporal de los datos de entrada (la recarga, concentración) puede no ser satisfactorio. Por consiguiente, la calibración del modelo necesariamente no produce una correspondencia exacta de los datos observados.

El método de las celdas mezcladas es la solución más simple a la ecuación de transporte advectivo. El método está basado en la discretización del dominio de flujo en un número finito de celdas (los compartimentos) (Ver Figura 2) en el cual el mezclado perfecto tiene lugar en los intervalos de tiempo discreto. Bajo las condiciones completas de mezclado en cada celda, las ecuaciones dadas para cada trazador para un intervalo de tiempo t puede representarse por:

Masa de la traza (t) = masa de la traza ($t-\Delta t$) + Masa entrante Flux (t) - Masa de la Salida Flux (t). Esta ecuación representa la masa de la traza a cada paso del tiempo como una función del flujo de masa entrante y saliente. El método se ha usado ampliamente para la simulación de transporte isotópico y transporte de reactivo químico [23,102,104,108].

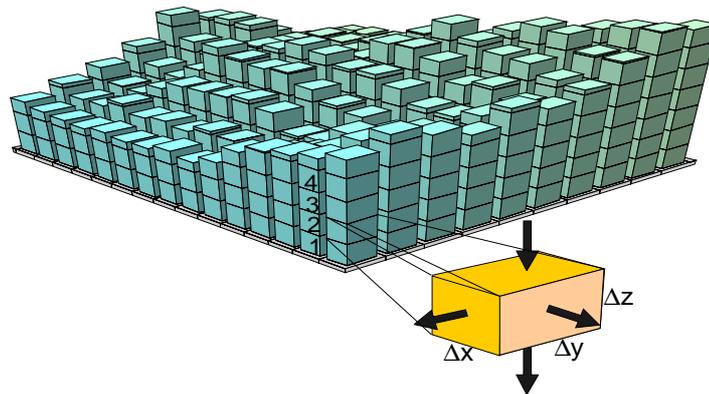


Fig. 2. Representación del sistema hidrológico para las celdas volumétricas interconectadas.

La ecuación diferencial parcial que describe el transporte advectivo (despreciando la dispersión, difusión, adsorción, reacción y el decaimiento) puede expresarse como:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} = - \left(\frac{\partial (q_x C_x)}{\partial x} + \frac{\partial (q_y C_y)}{\partial y} + \frac{\partial (q_z C_z)}{\partial z} \right) \quad (32)$$

donde C es la concentración del soluto (M/L^3), t es el tiempo (T), n es la porosidad efectiva y q es la descarga específica en la dirección creciente de x, y, z (L/T). La fuente y sumidero también pueden ser incluidos en la ecuación anterior. La solución de esta ecuación parcial tridimensional (3-D) puede lograrse por numerosos modelos numéricos basados en los métodos Eulerianos o Lagrangianos. En el método Euleriano la ecuación de transporte se resuelve con la red fija como en los métodos de diferencia finita (FD) o elemento finito (FE). Con el objeto de evitar la dispersión numérica y oscilaciones, se requieren pequeños tamaños de red e intervalos de tiempo.

En el método de Lagrangiano la ecuación es resuelta deformando la red o la coordenada en una red fijada a través del seguimiento de la partícula. Este método está libre de la dispersión numérica. En un dominio de flujo continuo, el algoritmo de la celda mezclada es una aproximación lenta,

implícita o explícita, de la diferencia finita del término advectivo en la ecuación de transporte de soluto [16]. La ecuación 1-D de transporte advectivo de soluto puede expresarse como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{q_x}{n} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (33)$$

donde $C=C(x,t)$ es la concentración y (qx/n) es el promedio de la velocidad del agua subterránea.

El término advectivo de esta ecuación puede aproximarse por el siguiente esquema de la diferencia finita:

$$C_i^{t+\Delta t} = C_i^t + \frac{q_x \Delta t}{n \Delta x} (C_{i-1}^t - C_i^t) \quad (34)$$

donde $(qx\Delta t/n\Delta x)$ es el número de Courant y debe ser menor que 1 para afirmar que la solución de la diferencia finita es estable. Este esquema proporciona la misma solución que la solución analítica de la ecuación de transporte advectivo de soluto [104]. La ecuación 32 a cualquier celda, digase (i,j,k) puede aproximarse por los valores de concentración a las caras de las celdas vecinas como:

$$n \frac{C_{i,j,k}^{t+\Delta t} - C_{i,j,k}^t}{\Delta t} = - \frac{q_{i,j+1/2,k} C_{i,j+1/2,k} - q_{i,j-1/2,k} C_{i,j-1/2,k}}{\Delta x_j} - \frac{q_{i+1/2,j,k} C_{i+1/2,j,k} - q_{i-1/2,j,k} C_{i-1/2,j,k}}{\Delta y_i} - \frac{q_{i,j,k+1/2} C_{i,j,k+1/2} - q_{i,j,k-1/2} C_{i,j,k-1/2}}{\Delta z_k} \quad (35)$$

donde Δx_j , Δy_i , Δz_k son las dimensiones de la celda y $j+1/2$, $i+1/2$, y $k+1/2$ denotan la interface normal de la celda hacia las direcciones x , y , z (Ver Figura 3). La concentración de la interface de celda entre dos nodos vecinos en una dirección particular es igual a la concentración en el nodo aguas arriba a lo largo de la misma dirección [111]. Este método se llama el esquema de carga de aguas arriba y proporciona soluciones de oscilación libres:

$$C_{i,j-1/2,k} = \begin{cases} C_{i,j-1,k} & \text{if } q_{i,j-1/2,k} > 0 \\ C_{i,j,k} & \text{if } q_{i,j-1/2,k} < 0 \end{cases} \quad (36)$$

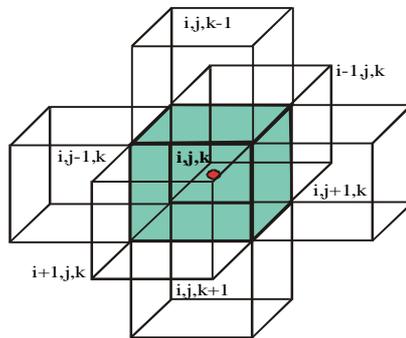


Fig.3. La celda (i,j,k) e índices para las celdas adyacentes

Los modelos de flujo de agua subterránea generalmente requieren la representación continua del dominio de flujo en términos de parámetros hidráulicos (K,T,S) . En algunos casos, es difícil de obtener todos los parámetros requeridos por los modelos numéricos de agua subterránea.

Adicionalmente, en un sistema acuífero cársico, no pueden usarse tales modelos debido a las discontinuidades en el dominio de flujo. En tales casos los términos de flujo pueden calcularse por las técnicas de vía del flujo basada en la teoría del depósito lineal. La técnica de la vía del flujo usa la ecuación del balance del depósito de agua. Cada modelo de celda representa los depósitos lineales o no lineales en que la relación entre el almacenamiento (S) y salida (Q) se da por:

$$S = KQ^n \quad (37)$$

donde K y n representan las constantes para el proceso físico. El balance de agua o la conservación de masa dentro de un intervalo de tiempo (t para cada celda puede expresarse como:

Flujo total - Salida Total = Cambio en Almacenamiento

$$\text{o:} \quad R(t) - Q(t) = \frac{dS}{dt} \quad (38)$$

Esta relación puede reestructurarse para una entrada (R) al depósito lineal (n=1) por la continuidad:

$$K + \frac{dQ}{dt} = R \quad (39)$$

El flujo entre las celdas se expresa entonces por lo siguiente ecuación:

$$Q_t = e^{-\frac{\Delta T}{K}} Q_{t-\Delta t} + \left[1 - \frac{K}{\Delta T} \left(1 - e^{-\frac{\Delta T}{K}} \right) \right] R_t + \left[\frac{K}{\Delta T} \left(1 - e^{-\frac{\Delta T}{K}} \right) - e^{-\frac{\Delta T}{K}} \right] R_{t-\Delta t} \quad (40)$$

La ecuación 40 es el formulario discreto de la ecuación de vía del flujo que representa la salida (Qt) del depósito al tiempo t como una función de la salida anterior (Qt-Dt), el presente (Rt), y el anterior índice de recarga (Rt-Dt) (Ver Figura 4). El parámetro K es la constante del almacenamiento que tiene la dimensión de tiempo. Bajo la no condición de la recarga, la ecuación se convierte en la conocida ecuación de Maillet de las curvas de recesión hidrográfica.

Modelo de flujo y transporte dinámico en sistemas acuíferos cársicos

Ha sido desarrollado un modelo conceptual distribuido para analizar el flujo de agua subterránea y la dinámica del transporte en sistemas acuíferos de gran potencia usando el método de las celdas mezcladas y el poder de análisis del terreno. El modelo se desarrolla para los sistemas acuíferos en que el conocimiento sobre las características hidráulicas y del transporte son limitados. El sistema acuífero es discretizado en un número finito de las celdas en tres dimensiones, y el proceso de transporte es simulado por el método de las celdas mezcladas mientras que los procesos del flujo superficial y subterráneo son simulados por la vía del flujo.

Las características especiales como la distribución de la recarga, propiedades del flujo y del almacenamiento del terreno cársico son consideradas en la dinámica del flujo. Los modelos de flujo de agua subterránea están generalmente basados en la predicción de las consecuencias de una acción propuesta al sistema de flujo. En los casos complejos, pueden usarse los modelos como una herramienta explicativa para proporcionar información adicional e interpretación en el dominio del flujo, lo cual es especialmente importante en terreno carsicos dónde el conocimiento sobre el flujo y el sistema de transporte es limitado.

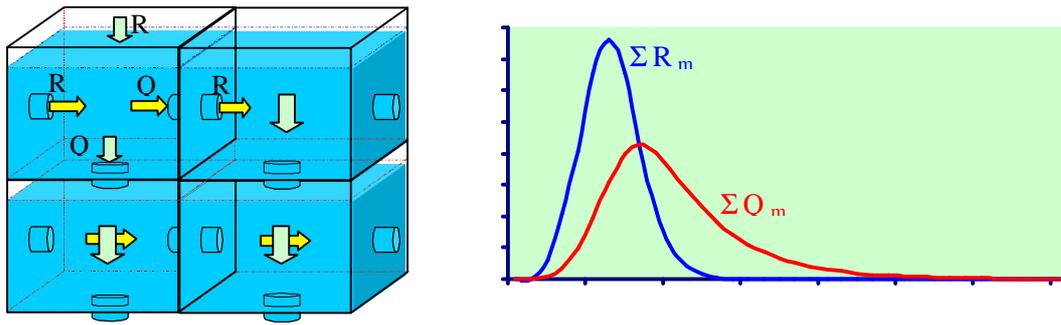


Fig.4. La circunvolución de la recarga a la descarga a través de los depósitos interconectados

Los modelos de flujo de agua subterránea desarrollados para los acuíferos granulares, basados en la ley de Darcy, no son aplicables para acuíferos cársicos, donde el movimiento del agua subterránea generalmente es a través de las canalizaciones, y la velocidad es superior al movimiento a través de sistemas granulares. La discontinuidad en el dominio de flujo limita la expresión del sistema de flujo por las ecuaciones diferencial basadas en la continuidad y el método de volumen elemental representativo.

Modelo hidrológico

El modelo se diseña para simular el agua de la superficie y la circulación del agua subterránea en el terreno cársico. El terreno se describe por aspectos topográficos, geológicos, y aspectos del perfilado morfológico. El sistema hidrológico se expresa por la recarga, almacenamiento y eventos de la descarga. El modelo considera la precipitación y evaporación, la infiltración, flujo terrestre, almacenamiento superficial, difusión, almacenamiento del agua subterránea, y procesos de flujo. El balance de agua está calculado para cada celda en cada intervalo de tiempo considerando la recarga de la precipitación, la infiltración, la difusión, la evapotranspiración, el flujo terrestre, almacenamiento superficial y flujo del agua subterránea. El intervalo de tiempo en el modelo es seleccionado como un día, pero también es posible la selección de intervalos de tiempos más frecuentes. La estructura general del modelo de flujo se indica en la Figura 5.

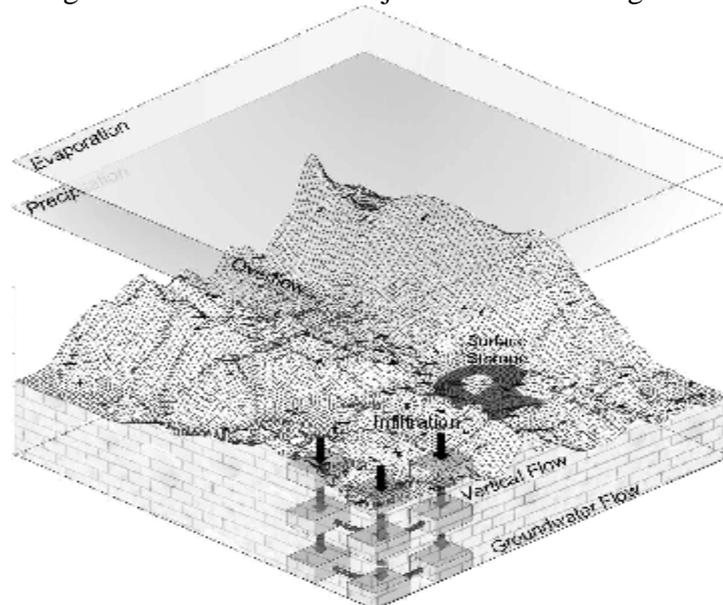


Fig. 5. Estructura del modelo de agua subterránea del flujo cársico y procesos de transporte.

La precipitación observada en las estaciones de observación meteorológicas es considerada la fuente de recarga del área modelo. Las estaciones están definidas por sus coordenadas topográficas en el modelo. El modelo verifica los registros de las estaciones de precipitación en todos los intervalos de tiempo durante la simulación determinando si los picos de agua de lluvia son grabados para estos intervalos de tiempo particulares.

Para cada intervalo de tiempo, si la precipitación sucede en una o más estaciones en el área modelo, los valores se interpolan para cada celda. La evapotranspiración potencial también se da al modelo para los lugares de observación y entonces es extrapolada encima del área modelada. La recarga neta es calculada como el sobrante de la precipitación encima de la evapotranspiración. En caso de una evapotranspiración mayor que la cantidad de la precipitación, la deficiencia es suplida a partir del almacenamiento de la superficie (si hay alguno).

La infiltración tiene lugar encima de las unidades geológicas permeables definidas por valores positivos "Geocode". Las fuentes de infiltración son el sobrante de la precipitación, la cantidad de agua que fluye de las celdas agua arriba, etc. La infiltración es simulada en el modelo como un concentrado o proceso difuso. Si la celda consiste en sumideros, toda el agua de la recarga se infiltrará a la cima de la capa en ese intervalo de tiempo particular como el punto de recarga concentrada y el almacenamiento superficial será cero.

El flujo terrestre puede ocurrir en las dos celdas *geocode* positiva y negativamente, donde el almacenamiento superficial esta disponible. El "Geocode" negativo significa que la unidad geológica no permite infiltrar el agua, así que todo el agua fluirá encima de la superficie. En las celdas geocode positivas, el flujo por tierra ocurre si hay agua remanente después de la infiltración en ese intervalo de tiempo particular. El agua en la superficie puede ser el exceso de la infiltración, pero puede ser la cantidad que viene de las celdas aguas arriba. El agua puede fluir a una de las ocho celdas vecinas en la dirección de la forma de la celda.

El volumen del agua en un intervalo de tiempo particular, el cual permanece después de todos los eventos hidrológicos es llamado almacenamiento superficial y es calculado por la ecuación de balance en cada intervalo de tiempo:

$$S_{stor} = S_{stor}(t-\Delta t) + P(t) + O_{FlowUp}(t) - E(t) - I(t) - O_{FlowDown}(t) \quad (41)$$

Donde el flujo por tierra que viene de las celdas aguas arriba ($O_{FlowUp}(t)$), la precipitación ($P(t)$) y el almacenamiento superficial del intervalo de tiempo anterior $S_{stor}(t-\Delta t)$ son las ganancias de la ecuación de balance, considerando que la evapotranspiración ($E(t)$), la infiltración ($I(t)$), y el flujo por tierra a las celdas aguas abajo ($O_{FlowDown}(t)$) son las pérdidas en la superficie del terreno. El flujo entre las celdas, como una función de tiempo, es controlado por la constante de almacenamiento (K), la cual representa el tiempo de producción para el depósito. Cada celda puede ser recargada o puede descargarse desde seis celdas vecinas. La partición del flujo entre las celdas vecinas se estima por la pendiente volumétrica entre las celdas.

El modelo calcula los volúmenes actuales de celdas vecinas y los compara con el volumen de la celda actual. Si los volúmenes vecinos son más bajo que el volumen de la celda de interés, el compartimento del flujo a la celda se estima por el porcentaje de la pendiente total con las celdas vecinas. El flujo no ocurre a la celda vecina que tenga un volumen superior a la celda de interés. Si el volumen de cualquier celda vecina está en su valor máximo, el flujo no tendrá lugar a esa celda .

La porosidad de la celda es un factor importante para definir la vía de circulación cársica. Si una caverna, canalización, o el rasgo de porosidad secundario similar existe en la celda, la porosidad puede ser tan alta como 100%. Cualquier valor conocido para el valor de porosidad secundario puede aumentar la representatividad del modelo. Los modelos de flujo sacan las descargas hidrográficas de las celdas de interés que representan las fuentes de agua. Los parámetros de calibración son la constante de almacenamiento (K) y la constante de infiltración.

Modelo de transporte

El flujo de agua subterránea cársica es simulado por una técnica de vía de flujo considerando que el proceso de transporte es simulado por el método de las celdas mezcladas. El modelo se diseña para simular la distribución espacial y temporal hasta cinco trazadores conservativos (no reactivos) (isótopos, clorofluorocarbonos, la conductividad eléctrica, cloruros, etc.) en el agua subterránea. El modelo simula solamente el transporte advectivo y no considera procesos de dispersión y difusión. El proceso de transporte es simulado considerando la *ecuación 35* en forma explícita:

$$C_{i,j,k}^{t+\Delta t} = C_{i,j,k}^t + \frac{\Delta t}{n} \left[\begin{array}{c} - \frac{q_{i,j+1/2,k}^{t+\Delta t} C_{i,j+1/2,k}^t - q_{i,j-1/2,k}^{t+\Delta t} C_{i,j-1/2,k}^t}{\Delta x_j} \\ - \frac{q_{i+1/2,j,k}^{t+\Delta t} C_{i+1/2,j,k}^t - q_{i-1/2,j,k}^{t+\Delta t} C_{i-1/2,j,k}^t}{\Delta y_i} \\ - \frac{q_{i,j,k+1/2}^{t+\Delta t} C_{i,j,k+1/2}^t - q_{i,j,k-1/2}^{t+\Delta t} C_{i,j,k-1/2}^t}{\Delta z_k} \end{array} \right] \quad (42)$$

La forma explícita de la ecuación puede resolverse directamente para $C(t+\Delta t)_{i,j,k}$. El valor de la concentración está calculado para cada celda en cada intervalo de tiempo y para las celdas especificadas de la relación concentración-tiempo en las salidas del modelo.

El esquema de la ecuación de transporte advectivo (*ecuación 42*) está sujeto a la dispersión numérica introducida por el error de truncamiento de la ecuación diferencial de transporte parcial (*ecuación 32*). Para minimizar la dispersión numérica se requieren de una red fina e intervalos de tiempo más pequeños. Los intervalos de tiempo del transporte deben ser:

$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{q_x}{\Delta x} + \frac{q_y}{\Delta y} + \frac{q_z}{\Delta z}} \quad (43)$$

Los intervalos de tiempo del transporte se estiman por el modelo según la *ecuación 43*. Dependiendo del tamaño de la red y la velocidad del agua subterránea, el número de los intervalos de tiempo del transporte puede aumentar enormemente.

Modelos determinísticos para la simulación del agua subterránea

En el pasado, la motivación principal para los estudios hidrogeológicos ha sido la necesidad de evaluar el suministro potencial de agua en los acuíferos. Durante los últimos 20 años, sin embargo, el énfasis ha cambiado de los problemas del suministro de agua a los problemas de la calidad del agua. Esto ha incitado una necesidad de predecir el movimiento de contaminantes a través del entorno subterráneo. Una consecuencia del cambio en el énfasis ha sido un cambio en las

prioridades percibidas por la investigación científica y la colección del datos. Anteriormente, el enfoque estaba en los métodos en vías de desarrollo para evaluar y medir las propiedades de productividad del agua en acuíferos de alta permeabilidad. El enfoque está ahora grandemente en los procesos de dispersión y transporte, retraso y degradación de contaminantes químicos, los efectos de heterogeneidad en las vías del flujo y tiempos del viaje, y la capacidad de los materiales poco permeables para contener el agua subterránea contaminada.

En los últimos 20 años se han visto grandes descubrimientos tecnológicos en la hidrología del agua subterránea. Una área de crecimiento tecnológico ha estado en el desarrollo y uso de parámetros determinísticos, parámetros distribuidos distribuido y modelos de simulación por computadora para analizar el transporte de flujo y soluto en los sistemas de agua subterránea. Otra área de crecimiento tecnológica mayor ha estado en la aplicación de análisis isotópicos a la hidrología del agua subterránea, en qué están usándose las medidas isotópicas para ayudar a interpretar y definir, del agua subterránea, las vías del flujo, edad, áreas de la recarga, fugas, y sus interacciones con el agua superficial [30].

Porque los isótopos se mueven a través de los sistemas del agua subterránea bajo las mismas fuerzas de conducción y por los mismos procesos como hacen los productos químicos disueltos, es natural que el flujo del agua subterránea y los modelos de transporte de soluto aplicados a los problemas de contaminación de agua subterránea estén vinculados e integrados con las mediciones e interpretaciones isotópicas.

Muchas aplicaciones previas de análisis isotópicos para sistemas del agua subterránea han existido, sin embargo, han asumido a las modelos conceptuales demasiado simplificados para el flujo de agua subterránea y transporte de químicos disueltos (con pistón como el desplazamiento y ninguna mezcla) o un depósito bien mezclado (qué de forma poco realista sobrestima los efectos de mezclado de la dispersión y difusión). Si las interpretaciones de los análisis isotópicos son acopladas con los modelos conceptuales más realistas de flujo y transporte, entonces se prevé que el análisis que coopera llevará a un entendimiento más exacto del sistema hidrogeológico que esta siendo estudiado. Una revisión de la aplicación de trazas de isótopos medioambientales al modelado en la hidrología [31] y puede verse un ejemplo de aplicación semejante en un análisis del emplazamiento de un Repositorio de desechos radiactivos de alta actividad en [31,57].

Balance de masa en los modelos determinísticos

Una medida de la exactitud del modelo es cuan bien este modelo conserva la masa. Esto puede medirse comparando los flujos netos calculados o puede especificarse en el modelo (afluencias, sumideros, etc.) con los cambios en el almacenado (acumulación o agotamiento). Siempre deben realizarse los cálculos del balance de masa y deben verificarse durante el procedimiento de la calibración para ayudar a evaluar la exactitud numérica de los resultados. Como la parte de estos cálculos, los flujos químicos e hidráulicos aportados por cada componente hidrológico distinto del modelo de transporte y flujo, deben ser detallados separadamente por formas hidrológicas y componentes químicos para el sistema que esta siendo modelado. Los volúmenes son una herramienta de evaluación muy valiosas porque proporcionan una medida de la importancia relativa de cada componente al volumen total.

Los métodos de diferencia finita y métodos de elemento finito son esencialmente conservadores de la masa, mientras que algunas aplicaciones del método pueden no serlo (o sus mismos cálculos de

balance de masa son sólo aproximaciones). También debe recordarse que mientras un error grande del balance de masa suministra evidencia de una solución numérica pobre, un balance de masa perfecto, en sí mismo, no puede demostrar que se ha logrado una verdadera o exacta solución o que el modelo global es válido. Es decir, un balance de masa perfecto puede lograrse si el modelo incluye compensación de los errores.

Códigos de computo (Software) que incluyen los modelos seleccionados para la interpretación de datos isotópicos y del agua subterránea

Basado en una variedad de métodos numéricos y de modelos conceptuales, está disponible un número grande de modelos determinísticos genéricos y de otros tipos, para la evaluación del agua subterránea. La selección de un método numérico o modelo genérico para un problema de campo particular depende de varios factores, incluyendo la exactitud, análisis costo/beneficio y utilidad.

Los primeros dos factores están principalmente relacionados a la naturaleza del problema de campo, disponibilidad de datos, y alcance o intensidad de la investigación. La utilidad de un método puede depender parcialmente del conocimiento matemático del modelador, aunque es preferible para el usuario del modelo entender la naturaleza de los métodos numéricos implementados en un código. Puede ser necesario modificar y adaptar el programa al problema específico de interés, y esto a veces puede requerir modificaciones al código fuente.

Cuando se selecciona un modelo que sea apropiado para una aplicación particular, es más importante escoger uno que incorpora el modelo conceptual apropiado; uno debe evitar el ajuste forzado a un modelo inapropiado de un problema de campo, solamente debido a la conveniencia del modelo, disponibilidad, o familiaridad para el usuario. La utilidad también aumenta por la disponibilidad de programas o características que permitan el pre y post-procesado de la información y por la disponibilidad de documentación.

Un número grande de público y de organizaciones privadas distribuyen software de dominio público y/o propietario para el modelado del agua subterránea [12,19,20,35,47,48,49,50,51,52] y la disponibilidad de modelos en el Internet está creciendo. Algunos sitios de la Red permiten descargar códigos de computación sin costo, mientras otros sitios proporcionan catálogos de información, demostraciones e información de precios. El Centro Internacional de Modelado del Agua Subterránea, en inglés (IGWMC), Dorado, CO (<http://www.mines.edu/igwmc/>) mantiene un centro de aclaración de dudas y de distribución para modelos de simulación de agua subterránea.

La página web del hidrogeólogo (<http://www.thehydrogeologist.com/>) es un ejemplo de un sitio web general orientado hacia el agua subterránea que proporciona vínculos a un número grande de recursos de software. Muchos códigos de dominio público del servicio geológico norteamericano están disponibles sobre Internet en (<http://water.usgs.gov/software/>) [15]. Por su disponibilidad y objetivos que cumplen, hemos recopilado aquellos que utilizamos y/o consultamos para el desarrollo del trabajo en el presente proyecto.

Los sistemas de Computadora por los cuales los paquetes de distribución de software han sido compilados son mostrados en paréntesis siguiendo el nombre del software, las abreviaciones usadas son definidas como sigue:

DOS - IBM-compatible PC, 386 ó mayores con procesador matemático; DG - Data General AViiON DG/UX; Linux - Red Hat 6.1 for i386 ; Mac - Macintosh ; SGI - Silicon Graphics Indigo Sun - Sun SPARCstation Solaris ; Win - Microsoft Windows 3.x, 9x, o NT/2000.

Nota: Donde aparezca "on-line" en paréntesis seguido del nombre de la aplicación, la aplicación puede ser ejecutada directamente desde su correspondiente página WEB.

Software (agua subterránea)

[ANALGWST](#) (DG) - Versión: 1.1 última actualización 1996/04/03

A batería de programas que calculan soluciones analíticas para el transporte de solutos en sistemas de aguas subterráneas con flujo uniforme en una, dos y tres dimensiones.

[AQTESTSS](#) Version 1.0, October 4, 2002

Distintas hojas de cálculo para el análisis de datos en pruebas de acuíferos.

[BIOMOC](#) (DOS/DG/SGI/Sun) - Versión: 1.0 última actualización 1999/03/10

Modelos de transporte de solutos multiespecies.

[CONTOUR](#) (DG/SGI/Sun) - Versión: 2.5 última actualización 1996/01/24

Un programa de trazado de líneas de contorno para datos de la red.

[HST3D](#) (DOS/DG/Sun) - Versión: 2.0.10 última actualización 2001/08/01

Modelo de flujo tridimensional y transporte de soluto.

[HYDROTHERM](#) (DG/SGI/Sun) - Versión: 2.2 última actualización 1997/06/23

Modelo tridimensional de diferencia finita para simular multifases del flujo de agua subterránea y transporte de calor en rangos de temperaturas de 0 - 1,200 grados centígrados.

[HYSEP](#) (DOS/DG) - Versión: 2.2 última actualización 1997/06/10

Programa de segregación Hidrográfico.

[MF2K_GWT, MOC3D, and related programs](#)

2D and 3D flow and transport; 2D, 2-constituent, variable density

[MODBRNCH](#) (DOS/DG/Sun) - Versión: 3.7 última actualización 1997/06/05

Ground-Water/Surface-Water Coupled Flow Model using USGS MODFLOW and BRANCH Models

[MODFE](#) (DG/Sun) - Versión: 1.2 última actualización 1995/08/08

Modelo modular de elementos finitos para problemas areal y problemas de flujo de agua subterránea.

[MODFLOW, MODFLOW-2000 and related programs](#)

3D flow, transport, particle tracking, water budget, user-interfaces, surface-water interactions, and parameter estimation

[MODFLOWP](#) (DOS/DG/Sun) - Versión: 3.2 última actualización 1997/10/09

Modelo modular de estimación de parámetros (versión reemplazada por el MODFLOW-2000)

[SEAWAT](#) (DOS) - Versión 2.10 última actualización 2/7/2002

Programa de para la simulación tridimensional de la variabilidad de la densidad del flujo de agua subterránea.

[SHARP](#) (DOS/DG/SGI/Sun) - Versión: 1.1 última actualización 1999/05/10

Un modelo numérico de diferencia finita casi tridimensional para simular los flujos del agua dulce y salada separados por una interfase definida en sistemas de acuíferos costeros.

[SUTRA and related programs](#)

2D, 3D, variable-density, variably-saturated flow, solute or energy transport

[UCODE](#) (DOS/UNIX) - Versión: 3.04 última actualización 2003/04/05

Un código de computo para modelaje universal inverso.

[VS2DH](#) (SGI/Sun/Win) - Versión: 3.0 última actualización 2000/02/09

Modelo para la simulación del flujo de agua y transporte de energía en medios variables.

[VS2DI](#) (SGI/Sun/Win) - Versión: 1.1 última actualización 2000/02/09

Un paquete de software para la simulación de flujos y transporte de soluto o transporte de energía en medios in medios porosos saturados variables.

Windows versión actualizada 2001/09/18 para ejecución en procesadores Pentium 4

[VS2DT](#) (SGI/Sun/Win) - Versión: 3.0 última actualización 2000/02/09

Modelos para simulación de flujos de agua y transporte de en medios porosos saturados variables.

Software (Calidad del agua)

- [BIOMOC](#) (DOS/DG/SGI/Sun) - Versión: 1.0 última actualización 1999/03/10
Un modelo de transporte de soluto multiespecies con biodegradación.
- [BLTM](#) (DG) - Versión: 1.2 última actualización 1996/11/04
Modelo de transporte bifurcado de Lagrangian.
- [DOTABLES](#) (on-line) - Versión: 1.2 última actualización 1999/03/16
Tabla de saturación de oxígeno disuelto.
- [GenScn](#) (Win) - Versión: 1.0 última actualización 1998/08/14
Modelos de simulación, análisis y generación de escenarios.
- [HSPEXP](#) (DOS/DG) - Versión: 2.3 última actualización 1996/03/01
Sistema de experto para Calibración de HSPF.
- [HSPF](#) (DOS/DG) - Versión: 11.0 última actualización 1996/03/01
Programa de Fortran para simulación Hidrológica.
- [OTIS](#) (Multiple platforms available)
Transporte unidimensional con almacenaje y afluencia (OTIS): Un modelo de transporte de soluto por arroyos y ríos.

Software (geoquímico)

- [LIMS for Light Stable Isotopes](#) (Win) -
Versión: 7.13 última actualización 2000/11/08
Versión: 8.13 última actualización 2000/11/08
Un sistema de gestión de la información de laboratorio (LIMS) basado en Microsoft Access para gestionar muestras, análisis y otros datos en isótopos estables.
- [SPREADBAL-2002](#) --
- Hoja de cálculo para la Documentación del balance de mas mineral referenciado en Bowser and Jones (2002) American Journal of Science v. 302 p. 582-662.
- [NETPATH](#) (DOS/DG/Sun) - Versión: 2.13 última actualización 1996/12/30
Programa interactivo para calcular reacciones geoquímicas en redes y dataciones por radiocarbon a lo largo de la ruta del flujo.
- [PHREEQC](#) (DOS/Linux/Mac/Sun) and [PHREEQCI](#) (Win)
PHREEQC es un programa para especiación, reacciones batch, transporte unidimensional y cálculos geoquímicos inversos.
PHREEQCI es una interfase gráfica con el usuario.
PHREEQC para sistema operativo Windows.
- [WATEQ4F](#) (DOS/DG/Sun) - Versión: 2.46 última actualización 2002/10/23
Un programa para cálculos de especiación de gran importancia, trazas y elementos redox en agua natural.

Software (uso hidrológico general)

- [LIBANNE](#) (DOS/Sun) - Versión: 4.0 última actualización 2002/02/25

- Una colección de librerías a fin para su uso en aplicaciones hidrológicas.
- [LIBHSP](#) - Versión: 11.1
Una colección de librerías a fin para la simulación en programa hidrológico (HSPF).
 - [TDDS](#) (DOS/DG/Sun) - Versión: 6.0 última actualización 1997/03/06
Modelos de simulación de sistemas de datos dependientes del tiempo.
 - [UCODE](#) (DOS/UNIX) - Versión: 3.04 última actualización 2003/04/05
Un código de computo para el modelaje universal inverso.

Conclusiones del Resultado 2

- Se seleccionan los modelos de computo que más se ajustan a las condiciones reales que rigen la simulación en cada caso particular del objeto de estudio y las consideraciones generales y necesarias a tener en cuenta durante el proceso de modelación.
- Se obtiene la base teórica de las herramientas necesarias a utilizar en la modelación computarizada de los eventos existentes en el objeto de estudio, mostrando toda la literatura necesaria y utilizada tanto para la actual etapa de identificación y/o selección de modelos de computo como para futuras etapas de cálculo e interpretación para la obtención de los resultados finales.

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA VENTO

Introducción

El agua, una molécula simple y extraña, puede ser considerada como el *líquido de la vida*. Es la sustancia más abundante en la **biosfera**, dónde la encontramos en sus *tres estados* y es además el componente mayoritario de los seres vivos, pues entre el 65 y el 95% del peso de la mayor parte de las formas vivas es agua. Molécula con un extraño comportamiento que la convierte en una sustancia diferente a la mayoría de los líquidos, posee una manifiesta reaccionabilidad y posee unas extraordinarias *propiedades físicas y químicas* que van a ser responsables de su importancia biológica.

La calidad del agua está determinada por la hidrología, la fisicoquímica y la biología de la masa de agua a que se refiera. Las características hidrológicas son importantes ya que indican el origen, cantidad del agua y el tiempo de permanencia, entre otros datos. Estas condiciones tienen relevancia ya que, según los tipos de substratos por los que viaje el agua, ésta se cargará de unas sales u otras en función de la composición y la solubilidad de los materiales de dicho substrato. Así, las aguas que discurren por zonas calizas (rocas muy solubles) se cargarán fácilmente de carbonatos, entre otras sales. El agua encontrada en estado natural nunca está en estado puro, sino que presenta sustancias disueltas y en suspensión. Estas sustancias pueden limitar, de modo igualmente natural, el tipo de usos del agua [13].

Con el objeto de hacer una caracterización del acuífero cársico de la Cuenca de Vento y la posterior propuesta de medidas para su mejor explotación, se hace entrega de la salida planificada, mostrando la caracterización físico-química del agua subterránea de esta Cuenca. Se tienen en cuenta, durante la caracterización e interpretación de los resultados obtenidos, tanto la cuantía de los valores, las características físicas del lugar en que se ubica el punto de muestreo, los sucesos ocurridos en el momento de la toma de muestra y las características del medio geológico presente en la región de estudio.

Los datos mostrados son el resultado de todo un monitoreo realizado durante un año, de forma mensual en 11 puntos de muestreo (9 pozos, 1 embalse y 1 toma de agua) previamente seleccionados por su representatividad en la Cuenca, además de las posibilidades reales que ofrecen las características técnicas de estos puntos. Debe señalarse que el punto de muestreo No. 8 se pierde por razones técnicas, a partir del mes de marzo del 2003.

Se presentan las tablas (ver anexo 1) y gráficos (ver anexo 2) obtenidos del muestreo mensual realizado en los pozos, mostrándose los datos químicos monitoreados en meq/l y mg/l [27]. Los datos monitoreados son los siguientes (conductividad eléctrica, pH, HCO₃, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, SST). Debe señalarse además que fueron monitoreados mensualmente tanto la lluvia caída en la zona de la Cuenca como los datos del agua subterránea en estos pozos referidos en ambos casos a sus isótopos (estables y radiactivo). Estos últimos datos señalados, serán utilizados para la interpretación general y final del resultado a entregar en posterior etapa (por ello no se relacionan en la presente salida).

Tomando datos de estudios previos realizados por un colectivo de autores [29], se hace una descripción general de las fuentes contaminantes que vierten sus residuos a la Presa Ejercito

Rebelde y al principal río que la atraviesa, lo cual permite, luego de una interpretación de los resultados físico-químicos obtenidos, mostrar las posibles causas de los valores que se muestran.

Características generales de la Cuenca Vento

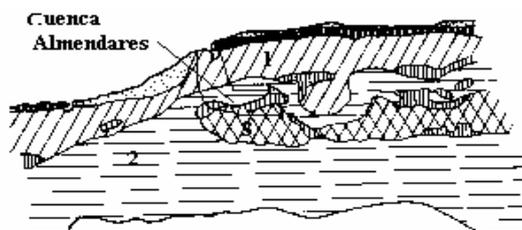
La Cuenca Hidrográfica Almendares-Vento tiene para los territorios habaneros una gran importancia desde el punto de vista económico, social, de salud, cultural, recreativo y urbanístico [29]. En ella se asientan los grandes parques científico-recreativos como son los Jardines Botánico y Zoológico, EXPOCUBA, el Parque Lenin y el Parque Metropolitano de La Habana; grandes Centros de Educación Superior e Investigación como el ISCAH y CENPALAB. Alrededor del 47 % del agua potable que consume la población de la Ciudad de La Habana proviene de la Cuenca subterránea Vento; entre 300 y 350 T.M. de peces se extraen como promedio histórico de la presa Ejército Rebelde, la cual además es un eficiente órgano de recarga a la Cuenca Vento, también tiene un alto uso agrícola sobre todo en la provincia La Habana. De los 402,02 Km.² que tiene el área de la Cuenca, 212,51 (52,8 %) pertenecen a La Provincia Ciudad de La Habana y 189,51 (47,14 %) a la provincia de la Habana. En la Cuenca viven más de medio millón de personas.

Geología

El territorio considerado se divide en tres zonas, la zona Sur, Central y la franja litoral Norte. En la parte Sur yacen rocas del Neógeno representadas por litologías calcáreas donde se destaca un alto grado de carsificación que disminuye en las formaciones geológicas con composición carbonato-terrágenas. La zona central está representada por rocas del Paleógeno con una litología predominante terrígena, donde se observa un aumento del escurrimiento superficial y muy bajas características de acuosidad de las rocas. Este macizo se encuentra dividido en bloques con una yacencia monoclinale y las fracturas constituyen fallas normales con una orientación predominante de **SSW-NNE**. La zona litoral Norte es una franja estrecha, formada por depósitos del Cuaternario y Neógeno donde predominan las formaciones geológicas carbonatadas y carbonato-terrágenas, representadas por calizas arrecifales para las rocas más jóvenes y calizas organógenas, cársicas para las más antiguas; las litologías con matriz arcillosa las representan margas compactas, estratificadas en intercalaciones con calizas. Las condiciones del agrietamiento y la carsificación son bastantes heterogéneas en dependencia del factor litológico descrito.

Relieve. Descripción General

Este territorio se puede dividir en dos grandes regiones, la cársica y otra no cársica. En el caso de la región cársica, está representada por llanuras altas con cotas entre 50-100 m y enclavada dentro de la región morfoestructural Almendares - San Juan, donde se destaca un sistema de bloques subhorizontales, monoclinales y una estratificación bien marcada. En la figura 1, se muestra el mapa de las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana se observan estas características.



1. Zonas no cársicas, relieves de llanuras desmenbradas
2. Relieve de superficie de depresión cársica
3. Relieve no cársico desmembrado

Fig.1. Mapa de Regionalización geomorfológica de la Cuenca y su ubicación en las provincias Habaneras

Dentro de las características morfoestructurales, los tipos de relieve en la región son de llanuras marinas abrasivas y abrasivo- denudativas colinosas altas y llanuras de depresiones cársicas con procesos cársicos denudativos recientes. Otro de los tipos de relieve que se destaca en la región son las llanuras moderadamente húmedas, cársicas, formadas por rocas sedimentarias carbonatadas y terrígeno-carbonatadas. Las llanuras acumulativas aluvio-marinas, como otra de las formas de relieve, están formadas por depósitos arcillosos y arenosos y cársicas palustres.

Se destacan tres superficies geomorfológicas principales representadas por la superficie cársica denudativa que se desarrolla en el centro de la Cuenca, la superficie cársica cubierta de borde de superficie distribuida en el resto del territorio, y la superficie de articulación fluvial acumulativa en el **Norte, Sur** y al **NE** de la Cuenca.

En sentido general, la red fluvial es convergente orientada fundamentalmente de Sur a Norte hacia el río Almendares que se desarrolla en la vertiente Norte de la Cuenca. Esta Cuenca tiene una morfología elíptica con su eje más largo orientado de **E – W** y el más estrecho de **N – S**.

La región no cársica, por su parte, tiene una estructura de zócalo plegado. Su relieve está representado por llanuras fluviales acumulativas y erosivo-acumulativas, ligeramente onduladas y planas; en general son llanuras bajas con cotas entre 0 y 50 m. Esta parte de la Cuenca tiene una morfología alargada, orientada de **N – S** por su eje mayor y de **E – W** por el eje menor.

Las formas llanas del relieve constituyen mayoría, exceptuando las elevaciones periféricas que sirven de parte aguas generales (Sierras de Francisco Javier, El Cheche y Escaleras de Jaruco), así como otras elevaciones y grupos de alturas interiores, entre las que se encuentran las lomas de Nazareno y Camoa.

Hidrología

Principales parámetros morfohidrométricos de la Cuenca del río Almendares

PARAMETROS	MAGNITUDES
Área	402.02 Km. ²
Longitud del río principal	49.80 Km.
Altura máxima de la Cuenca	309.00 m
Altura de nacimiento	225.00 m
Pendiente de Cuenca	47.30 0/00
Altura media de la Cuenca	114.40 m
Pendiente media suavizada del río	3.30 0/00
Longitud de la red fluvial	254.60 Km.
Densidad de drenaje	0.85 Km./ Km. ²
Ancho de la desembocadura	440.00 m

Hidrogeología

La Cuenca cársica subterránea de Vento, está caracterizada como una Cuenca cerrada y alargada en dirección longitudinal que drena superficialmente por el río Almendares. Esta Cuenca forma parte de la depresión Almendares - San Juan y se enmarca en las coordenadas Norte 343 00 - 359 00 y Este 348 00 - 391 00. El extenso desarrollo cársico presente en esta región influye de manera notable en el régimen de escurrimiento del río, de ahí que existan buenas condiciones para el desarrollo de una circulación hipógea de las aguas. Una gran parte del escurrimiento superficial se convierte en subterráneo al ser abandonadas las zonas marginales impermeables y alcanzar la llanura cársica que forma la Cuenca hidrográfica, dando lugar a la Cuenca subterránea Vento, una de las principales fuentes de abasto de la Capital. Los recursos fundamentales de las aguas subterráneas se acumulan en la estructura sinclinal del Neógeno, la que yace sobre las formaciones

plegadas y dislocadas del Paleógeno y Cretáceo. Los depósitos del Neógeno están representados por los sedimentos carbonatados y terrígenos carbonatados de las formaciones Güines y Cojímar. Según las investigaciones realizadas el espesor de las calizas de la formación Güines alcanza los 500 m y al Sur el mismo no excede los 260 m.

La dirección de la corriente de las aguas subterráneas es generalmente de Este a Oeste. La infiltración de las aguas pluviales es un elemento a considerar para la alimentación de aguas subterráneas. Los recursos explotables de la Cuenca Vento están calculados en 287,0 millones de m³/año. En la Cuenca subterránea Vento se encuentran ubicados el 83% de los Acueductos que abastecen a la población de Ciudad de La Habana, lo que representa el 47% del volumen total de agua que se entrega a la capital. Entre estos acueductos se destaca el más antiguo del país; el de Albear que es el único que abastece por gravedad a la población de los Municipios del Cerro, Habana Vieja y Centro Habana reforzado por el Acueducto de Cuenca Sur que tiene un volumen planificado de 100.00 millones de m³ y se encuentra en la Provincia de La Habana. El área total de la Cuenca Vento es de 452 Km.² mientras que el área de evaluación de los recursos explotables es de 370 Km.²

Calidad del Agua

Dada la importancia que tiene el río Almendares para la Cuenca y con el fin de mostrar en forma clara y precisa, la calidad del agua de esta, se caracteriza este río desde su nacimiento hasta la desembocadura (río que atraviesa la Cuenca), así como, las modificaciones que sufre en la calidad de sus aguas, por los distintos aportes de aguas residuales e industriales que recibe, se subdividió la Cuenca en tres sectores o tramos: alta, media y baja.

Parte alta del río Almendares

La parte alta de la Cuenca del río Almendares se corresponde con el límite este de la Cuenca hidrogeológica de Vento [18,29]. Los afluentes principales convergen en el río Almendares, al sur del reparto Parcelación Moderna, donde la corriente es regulada por el embalse Ejército Rebelde, estos arroyos son: San Francisco, Limón, Chepalope, Lechuga, Guadiana, El Chico, Las Granjas y La Catalina. Otras corrientes de interés aguas abajo del cierre Ejército Rebelde son: Pancho Simón, Pionero y Jíbaro. La mayor parte del escurrimiento superficial de la Cuenca se corta en la presa Ejército Rebelde, la que funciona como un elemento eficiente de recarga subterránea.

El gasto aguas abajo de la presa Ejército Rebelde, se represa en la micropresa Paso Sequito, localizada en el Parque Lenin la que se utiliza con fines recreativos. A esta laguna artificial se incorpora el escurrimiento superficial de los arroyos Pancho Simón y Pionero, los escasos vertimientos de este sistema al cauce principal en la cercanías del poblado de Calabazar conforman el gasto inicial del río Almendares en su tramo medio. Es importante destacar que el embalse corta radicalmente el flujo, lo que trae problemas de calidad justamente en la reaparición del flujo organizado a la altura del puente de Calabazar.

La parte alta de la Cuenca presenta afectaciones a la calidad de sus aguas debido a que los cuerpos receptores superficiales reciben vertimientos variados que deterioran, en zonas bien delimitadas, sus condiciones sanitarias. Las causas principales de estas afectaciones vienen dadas por insuficiencias de alcantarillado y por la ausencia de tratamiento para los residuales domésticos, industriales y agropecuarios. Esta situación trae como consecuencia el transporte de materia orgánica, bacterias y nutrientes hacia el embalse Ejército Rebelde, en el cual se presentan condiciones de eutrofización dados los altos contenidos de nitrógeno y fósforo, lo que trae como consecuencia la presencia de algas y vegetación acuática superior (Jacinto de Agua), con el inconveniente de que estas aguas son infiltradas

directamente al acuífero de Vento. En general se establece que este embalse recibe los impactos de agua residuales generados por más de 30 fuentes contaminantes

Algunas industrias locales también contribuyen a la contaminación de los cuerpos receptores superficiales como por ejemplo Antillana de Acero, centro metalúrgico ubicado en el Cotorro y que vierte aguas residuales al arroyo San Francisco, el cual constituye un punto de interés especial.

Parte media del Río Almendares

La parte media del río Almendares comprende el tramo entre el puente del ferrocarril del Parque Lenin, en Calabazar, hasta la confluencia entre el Almendares y el arroyo Mordazo (Mordazo-Orengo). Las subCuencas colectoras en el área son escasas y pequeñas, entre las que se destacan los arroyos siguientes: Jíbaro, Paila, Marinero, Santoyo y Mordazo.

Al bajo caudal del río Almendares en Calabazar, unos 100 l/s en época de estiaje, se le van incorporando los gastos de estos drenes superficiales de pobre calidad. Estas aguas se caracterizan por contener volúmenes importantes de aguas residuales domésticas crudas, las que se generan por insuficiencias del alcantarillado (sistema María del Carmen) y de la Planta de Tratamiento María del Carmen. Los aportes industriales vertidos al río, con escaso o ningún tratamiento, también contribuyen a empeorar su situación sanitaria.

A su paso por Calabazar el Almendares recibe vertimientos de albañales del poblado de Calabazar y Las Cañas. A continuación se incorpora el arroyo Jíbaro (de características intermitentes) con discretos aportes de aguas residuales provenientes entre otros de una fábrica de acetileno. Diferentes descargas de origen doméstico van impactado al cuerpo receptor las que crean, aguas abajo de la Taza de Vento, condiciones bajas de oxígeno disuelto. Hasta este punto los valores de DBO₅ oscilan entre 10-20 mg/l y el oxígeno disuelto entre 4-6 mg/l, los caudales se encuentran entre los 300-600 l/s en época de estiaje.

A la altura de la Taza de Vento, al cruce con la carretera de Rancho Boyeros, el río recibe los efluentes pobremente tratados de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) María del Carmen y aportes del Centro Turístico Río Cristal y de la Fábrica de Helados Coppelia (Capdevila). Más adelante otro punto de interés es la confluencia del arroyo Cotilla con el río Almendares. Este arroyo recibe aguas residuales de los repartos Capri, Alcázar, Alturas de la Víbora, Vieja Linda y Altahabana entre otros.

Aproximadamente a 1500 m de la confluencia anterior se encuentra la presa El Husillo, aguas abajo de este punto se puede enmarcar el subtramo de El Husillo a la confluencia con el arroyo Santoyo, donde el Almendares continúa recibiendo aportes, puntuales y difusos, de aguas residuales de origen doméstico.

A unos 2 500 m de El Husillo, la Fábrica de Gomas Benjamín Moreno extrae aguas del río para uso industrial que retornan al sistema a través del arroyo Santoyo. Este arroyo posee un buen caudal, entre 300-500 l/s, de aguas relativamente limpias con contenidos de oxígeno disuelto de entre 4-6 mg/l y DBO₅ entre 8-12 mg/l y constituye un elemento de dilución y mejoría de la calidad, adicionalmente en este tramo son descargadas las aguas residuales de la Papelera Moderna.

La Planta de Gas Manufacturado Mario Fortuny y la Papelera Cubana hacen discretos aportes al río Almendares antes de su confluencia con el arroyo Mordazo.

Parte baja del río Almendares

La parte baja del río Almendares está comprendida desde su confluencia con el arroyo Mordazo hasta su desembocadura e incluye el tránsito de la corriente hacia su condición de estuario en las cercanías del puente de El Bosque.

El Mordazo confluye en el Almendares con un notable caudal entre 1.0-1.2 m³/s. Lamentablemente no se puede considerar una corriente limpia ya que, en todo su curso, desde las cabeceras de sus afluentes ubicadas en: La Güinera, La Fraternidad y El Calvario, reciben aportes significativos de aguas residuales domésticas crudas. Las causas son las mismas mencionadas anteriormente y se relacionan con la insuficiencia en los servicios de alcantarillado.

El Mordazo, cerca de su confluencia con el Almendares, antes de Puentes Grandes, recibe los vertimientos industriales de la Cervecería Miguel Oramas con una alta DBO₅ (3200-5900 mg/l) y caudales muy variables (10-15 l/s). a pesar de las continuas descargas que recibe el río mantiene concentraciones de oxígeno disuelto entre 1-2 mg/l y DBO₅ entre 20-80 mg/l de acuerdo con la producción cervecera.

Aguas abajo de la unión del Almendares con el Mordazo, a menos de 100 m, la corriente recibe los residuales de la Fábrica de Compotas Osito, con un caudal entre 1-3 l/s. A continuación y, a unos 400 m, se incorporan los vertimientos de la Fábrica de Cerveza Pedro Marrero, con un gasto de 15-20 l/s y DBO₅ 1400-3200 mg/l. Después de este último impacto el Almendares es prácticamente una corriente anaeróbica a la cual se le continúan incorporando residuales domésticos crudos, provenientes de las barriadas colindantes a ambas márgenes. En todo este tramo el río recibe la descarga de alrededor de 60 fuentes contaminantes. La tabla 1, presenta algunos de los focos contaminantes superficiales asociados a la Cuenca del río Almendares.

Tabla 1. Focos contaminantes superficiales asociados a la Cuenca del río Almendares

Nº	Cuenca río Almendares	Organismo	Carga (kg DBO ₅ /d)	Disposición final
1	Zoológico Nacional	CITMA	180	Río Almendares
2	Cervecería La Tropical	MINAL	3900	
3	Cervecería La Polar	MINAL	2019	Arroyo Mordazo - río Almendares
4	Fáb. helados Coppelia	MINAL	175	Río Almendares
5	Hormigonera Hermanas. Giralt	MIMC	3	
6	Fáb. de tubos Gerardo Abréu	MIMC	5	
7	Fáb. asbesto cemento A.Mestre	MIMC	6	
8	Laboratorio Reinaldo Gutiérrez	MINSAP	10	Alc - arroyo Paila - río Almendares
9	Establecimiento 103 Nova	MIMC	18	
10	Fáb. cosméticos A.Cobas	MINIL	s/datos	
11	Papelera Cubana	MINBAS	172	Arroyo Mordazo - río Almendares
12	Papelera Moderna	MINBAS	756	Río Almendares (Husillo)
13	GOLFA	MINBAS	28	Río Almendares
14	Zoológico de 26	Comunales	48	Alcantarillado
15	Matadero de aves A.Maceo	MINAGRI	144	Arroyo Marinero - río Almendares
16	Fáb. de conservas C. Cienfuegos	MINAL	75	
17	Fáb. de compotas Ositos	MINAL	434	Río Almendares
18	Fáb. de gomas B.Moreno	MINBAS	13	Arroyo Santoyo- río Almendares
19	Astilleros Chullima	MIP	5	Río Almendares
20	Fáb. de gas M.Fortuny	MINBAS	2	Arroyo Santoyo - río Almendares

21	Calera Mártires del Corynthia	MIMC	2	Zanja - río Almendares
22	Fáb. pinturas Vicente Chavez	MINBAS	8	Arroyo Orengo - río Almendares
23	Terminal Párraga	MITRANS	3	Río Almendares
24	Fáb. muebles clínicos C. Cienfgos	SIME	8	
25	Laboratorio Julio Trigo 101	MINSAP	8	
26	Fáb. medias Fidel Arredondo	MINIL	s/datos	Arroyo Marinero - río Almendares
27	Hospital Willian Soler	MINSAP	82	
28	Hospital Enrique Cabrera	MINSAP	86	
29	Fáb. granito Hnos.Ameijeiras	MIMC	3	
30	Fáb. pinturas Pedro Rodríguez	MINBAS	7	Río Almendares
31	Laboratorio Julio Trigo 102	MINSAP	8	Río Almendares
32	ISPJAE	MES	108	Drenaje al río Almendares
33	Fáb. de medias Ilusión	MINIL	s/datos	Arroyo Paila - río Almendares
34	Papelera René Bedía	MINBAS	92	Alc. Arroyo Paila - río Almendares
35	Fáb. de pasta La Pasiega	MINAL	3	Arroyo Paila - río Almendares
36	Hilandería Balance del Wajay	MINIL	s/datos	Alcantarill. EDAR María del Carmen
37	Tenería La Vaquita	MINIL	660	Cola del Embalse Ejercito Rebelde
38	Fáb. cubana de tejidos (Facute)	MINIL	12	Alcantarillado sistema Cotorro
39	Conglomerado del Cuero Gavín	MINIL	25	Alcantarillado EDAR María del Carmen
40	Glamour	MINIL	146	
41	Siderúrgica José Martí	SIME	10	Arroyo S.Francisco-río Almendares
42	Hospital Siquiátrico de La Habana	MINSAP	100	Alcantarillado EDAR María del Carmen
43	Hospital Julito Díaz	MINSAP	24	
44	EIDE Mártires de Barbados	INDER	22	Arroyo S.Francisco-río Almendares
45	Escuela vocacional Lenin	MINED	18	Arroyo Catalina-embalse Ejercito Rebelde
46	Combinado de Radio y TV	SIME	18	
47	Fáb. de pilas Yara	SIME	16	
48	Fáb. de baldosas E. Berovides	MIMC	4	Río Almendares
49	Autoconsumo Est. Mayor Boyeros	MINFAR	13	Zanja-río Almendares
50	Taller N°.2 Gastronomía	MINAL	3	Cañada-río Almendares

En relación con la Cuenca subterránea Vento, resulta significativo el elevado número de fuentes contaminadoras que infiltran a ellas sus residuales crudos o parcialmente tratados, en muchas ocasiones sin autorización oficial para ello. No obstante, la calidad de sus aguas es aceptable según los datos sistemáticos de las 82 estaciones de la Red de Calidad que monitorean su área.

En la siguiente Tabla, se presentan los más importantes contaminantes de la Cuenca Vento, aunque es necesario recordar también que existen otros contaminantes que descargan a la presa "Ejército Rebelde" que posteriormente se infiltran hacia el acuífero subterráneo. La tabla 2, muestra los focos contaminantes más importantes que infiltran sus residuales hacia la Cuenca subterránea de Vento.

Tabla 2. Focos contaminantes más importantes que infiltran sus residuales hacia la Cuenca subterránea de Vento

Nombre del Foco	Coordenadas		Cuenca afectada	Disposición final de los residuales
	N	E		líquidos
1- Centro Porcino EMPROVA	353,5	352,5	Vento	Libremente al terreno
2- Sub-base de ómnibus de Santiago de Las Vegas	349,2	357,1	Vento	Pozo de absorción
3- Establecimiento C.P José Martí	354,6	356,5	Vento	Depresión natural (laguna)
4- EXPOCUBA	351,9	362,0	Vento	Infiltración por puntos del terreno y por el fondo de la laguna de oxidación.
5- Convertidora de papel Andrés Luján	353,3	358,0	Vento	Libremente al terreno y pozo de infiltración.
6- Unidad Cunicula Juan Escutía	353,8	355,8	Vento	Libremente al terreno y fosa absorbente
7- Laboratorio Biológico Farmacéutico LABIOFAM	351,1	357,2	Vento	Libremente al terreno y fosas absorbentes
8- Textilera El Vaquerito	349,6	356,2	Vento	Sumidero natural (furnia)
9- Fábrica de Conservas José Martí	353,4	357,3	Vento	Pozos absorbentes
10- Fábrica de Fósforos José A. Pérez Vidal	352,9	358,1	Vento	Pozo de infiltración
11- Hospital Gali Carcía	359,2	357,7	Vento	Fosas absorbentes
12- Hospital Pediátrico Leonor Pérez	353,2	358,2	Vento	Fosas Maura y pozo absorbente
13- Frigorífico Camilo Cienfuegos	352,4	356,8	Vento	Pozos de infiltración
14- Centro Porcino CIMA	354,5	373,5	Vento	Fosa Maura, fosa absorbente
15- Unid. Docente Tecnológ. Rubén Martínez Villena	352,5	358,8	Vento	Depresión natural y cantera abandonada
16- Politécnico Eduardo García Delgado	351,8	359,0	Vento	Efluente de laguna libremente al terreno
17- Fábrica de Antibióticos 8 de Marzo	356,0	373,9	Vento	Libremente al terreno
18- Centro Porcino Villena Revolución	351,8	363,9	Vento	Libremente al terreno
19- Escuela Técnica Julio A. Mella	352,8	357,8	Vento	Fosa Maura y pozo absorbente
20- Instituto Politécnico de la Construcción José Martí	352,1	357,9	Vento	Depresión natural del terreno
21- Instituto Superior Pedagógico para la Enseñanza Técnica y Profesional (ISPETP)	358,4	358,6	Vento	Depresión natural del terreno (solución de disposición final vinculada al foco anterior)
22- Escuela de Becarios Extranjeros Pepito Mendoza	351,9	357,8	Vento	Fosa y pozo absorbente y libremente al terreno mediante zanja conductiva
23- Fábrica de gases industriales J. Hidalgo	363,8	355,9	Vento	Fosa Maura y pozo absorbente
24- Centro Porcino Cacahual			Vento	Infiltración desde reservorios no impermeabilizados (almacenan el residual).
25- Aeropuerto José Martí	352,5	357,1	Vento	Fosa, donde han ocurrido infiltraciones accidentales de hidrocarburo.
26- Empresas Militares Industriales Liberación y Gran Revolución Socialista de Octubre	350,2	376,4	Vento	Efluente de laguna de oxidación y baterías de decantadores (puntos no localizados)
27- Fábrica de muebles clínicos Camilo Cienfuegos	360,2	356,4	Vento	Fosa Maura y pozo absorbente
28- Zoológico Nacional	356,2	356,8	Vento	Fosa Maura y filtro de arena
29- Establecimiento 103 Nova	359,7	356,7	Vento	Fosa Maura y pozo absorbente
30- Fábrica de Cosméticos A. Cobas	358,7	356,4	Vento	Fosa Maura y pozo absorbente
31- Fundación Osvaldo Sánchez	354,9	359,4	Vento	Fosa Maura y pozo absorbente
32- Matadero Aves Stgo de las Vegas	348,4	356,1	Vento	Dispone libremente al terreno

Características principales del embalse “Ejército Rebelde”

Construido en 1969 con el objetivo de proteger contra inundaciones la parte occidental de la ciudad y recargar los horizontes acuíferos de la Cuenca subterránea de Vento. Tiene un volumen útil de 51 millones de m³ y área de espejo de 1260 Ha.

Coordenadas del Cierre	N: 355.100 E: 362.300
Area de la Cuenca Colectora	285.00 Km. ²
Areas del embalse (Espejo de Agua)	
Nivel de aguas muertas (N.M.)	0.74 Km. ²
Nivel de aguas normales (N.A.N.)	12.60 Km. ²
Nivel de aguas máximas (N.A.M)	14.70 Km. ²
Niveles de embalse (cota)	
Nivel de aguas muertas	33.05m
Nivel de aguas normales	66.00m
Nivel de aguas máximas	72.90m
Volúmenes (capacidad de embalse)	
Nivel de aguas muertas	1.15Hm ³
Nivel de aguas normales	51.90 Hm ³
Nivel de aguas máximas.	131.00 Hm ³
Tipo de presa:	De tierra
Uso:	Regulación de avenidas y recargas del manto freático

Caracterización físico-químicas de las aguas de la Cuenca Almendares-Vento

Metodología empleada.

Métodos y técnicas utilizadas para el muestreo y análisis de agua.

Muestreo de agua

Con el objeto de obtener los parámetros más representativos, los cuales permitieran hacer la mejor caracterización del agua de la Cuenca Vento, previo al muestreo de las aguas, se realizó, un estudio geomatemático y estadístico que permitió obtener el Diseño de la Red de monitoreo de estas aguas (Ver Resultado 1, salida contratada por la AENTA y entregada a esta Agencia en el año 2002).

Atendiendo a los objetivos planteados en el proyecto, el cual pretende caracterizar el acuífero de la Cuenca Vento, se planificó la toma mensual de agua en 11 puntos dentro de la zona de estudio (9 pozos, la Presa Ejército Rebelde y la taza de Vento) en volumen de 1500 ml; la cantidad de agua recogida durante 1 año, permite realizar las determinaciones de 2 parámetros físico-químicos (CE y pH), 8 parámetros hidroquímicos (SST, cationes: Ca, Mg, Na y aniones HCO₃, SO₄, CL) y las concentraciones de Tritio.

El método utilizado para el muestreo de las aguas, consistió en la toma de muestra (mensual) en cada punto de muestreo seleccionado. Para garantizar la mejor caracterización del agua subterránea, se aseguró la toma de agua, mediante un batómetro, el cual siempre fue sumergido a más de 1.5 m del espejo del nivel del manto acuífero (nivel tomado en cada muestreo por puntos con ayuda de un medidor de nivel).

Análisis físico-químico de las aguas

El análisis físico-químico de las aguas, se realizó en el Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas (CENHICA) perteneciente al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). Los métodos y ensayos empleados para la determinación de macrocomponentes químicos y parámetros físico-químicos se describen a continuación:

Elementos químicos y parámetros físico-químicos	Método
Ca y Mg	Volumétrico
Na y K	Fotométrico (Fotometría de llama)
CO ₃ ²⁻ y HCO ₃ ⁻	Volumétrico
Cloruros	Volumétrico
Sulfatos	Turbidimétrico (espectrofotométrico)
PH	Electrométrico
Conductividad Eléctrica	Electrométrico
Sólidos Solubles Totales	Cálculo

Con el objeto de caracterizar las aguas subterráneas de la Cuenca Vento, se le realizó un monitoreo mensual durante un año, comenzando las campañas de muestreo a partir del mes de septiembre del 2003 [95]. Debe señalarse que los datos registrados en los meses que se señalan, representan el comportamiento del mes anterior (Por ejemplo los datos de septiembre describen el comportamiento del mes de Agosto). Los datos mostrados son el resultado de todo un monitoreo realizado durante un año, de forma mensual en 11 puntos de muestreo (9 pozos, 1 embalse y 1 toma de agua) previamente seleccionados por su representatividad en la Cuenca, además de las posibilidades reales que ofrecen las características técnicas de estos puntos.

Luego de evaluar los objetivos del proyecto para la etapa, se decide investigar sobre aquellos parámetros que aportaran nuevos datos a la caracterización de las aguas en su calidad y posibles fenómenos que en ellas acontecieran, siendo seleccionados, los siguientes parámetros (conductividad eléctrica, pH, HCO₃, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, SST) [14,27].

La base de datos obtenida, es muestran en tablas (ver anexo 1), para una mejor interpretación de los resultados obtenidos, estos fueron llevados a distintos gráficos obtenidos con el software Microsoft Excel y separados en 2 grupos, un primer grupo compuesto por 3 gráficos que representan los macrocomponentes químicos compuestos por la distribución de los cationes (Ca, Mg, Na y K), los aniones (HCO₃, Cl, SO₄) y los sólidos totales disueltos (SST) y un segundo grupo compuesto por los parámetros físico-químicos dados por el pH y la conductividad eléctrica (ver anexo 2). Se muestran además, para la clasificación y evaluación de posibles mezclas de las aguas existentes en la Cuenca, 2 tipos de gráficos (Stiff y Piper), obtenidos con las corridas del software de la waterloo hydrology, AQUACHEM V-4 [105], (ver anexo 3).

Para una mejor comprensión de lo expuesto en las tablas, se presenta a continuación la referencia de los puntos de muestreo indicados (Ver figura 2), con el nombre real de los pozos muestreados (nombre dado por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos) y la leyenda asociada a estas.

Referencia de los puntos de muestreo: 1: Pozo HV-649; 2: Pozo HV-28; 3: Pozo HV-19; 4: Pozo HV-29A; 5: Pozo HV-39; 6: Tasa Vento; 7: Pozo AL-3; 8: Pozo P-8. Parque Lenin; 9: Presa Ejercito Rebelde; 10: Pozo AL-7; 11: Pozo AL-6.

Leyenda: Niv. Estat. : Nivel estático; Prof. : Profundidad de la toma de muestra; Unid. : Unidad de medida; N.A.N. : Nivel de agua normal; Ce: Conductividad eléctrica; - : Ausencia de datos.

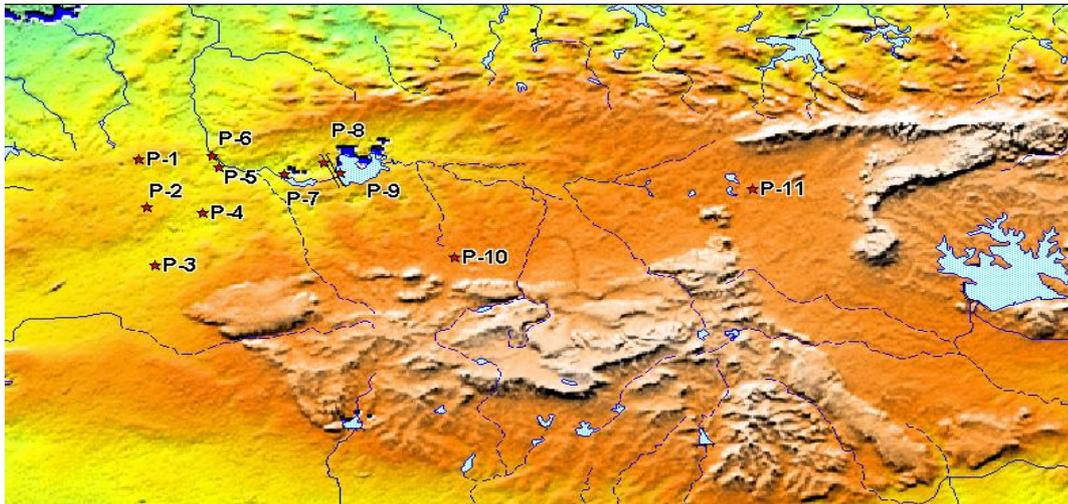


Fig. 2. Modelo 3D de la Cuenca con los puntos de muestreo P1-P11 y el río Almendares.

Observaciones hechas durante el monitoreo (aspectos a tener en cuenta) [95]:

- Mes de Diciembre del 2003: El día anterior al muestreo, luego de un tiempo de mucha seca, hubo mucha lluvia por más de 24 horas.
- Mes de Enero del 2004: En el punto de muestreo No. 7 (AL-3), se observa bastante contenido de sólidos en suspensión.
- Mes de Marzo del 2004: En el punto de muestreo No. 6 (Tasa de Vento), lugar donde se toma la muestra a las 12.53 p.m., se comprueba que desde las 2.00 a.m. del día del muestreo, llevaban bombeando el acuífero. Se comprueba además que durante 3 días anteriores al muestreo, el acuífero ha sido sometido a un bombeo por mas de 12 horas continuas.
- Mes de Abril del 2004: Se pierde el punto de muestreo No. 8 ubicado en el parque Lenin (P-8), se comienza el bombeo de este pozo. Se buscan alternativas de otro pozo representativo y no aparece ninguno posible. A partir de este mes se realiza el monitoreo sólo en 10 puntos.
En el punto de muestreo No. 9 (Presa Ejercito Rebelde), debido a gran presencia de malangueta en la superficie del agua, debe tomarse la muestra a unos 10 m del lugar definido.
- Mes de Mayo del 2004: El día anterior al muestreo llovió intensamente en la zona (lluvias torrenciales).
- Mes de Junio del 2004: Se observa un gran periodo de seca (tiempo climático anómalo).
- Mes de Julio del 2004: El día anterior al muestreo llovió intensamente en la zona (lluvias torrenciales).
- Mes de Agosto del 2004: Mes con abundantes lluvias en la zona de muestreo.

Resultados obtenidos en el monitoreo de agua de la Cuenca Vento

Interpretación de cada uno de los parámetros estudiados

Macrocomponentes y parámetros físico-químicos

Se hace una interpretación de los macrocomponentes químicos (ver anexo 2) y parámetros físico-químicos (ver anexo 5) con el objeto de evaluar las características del agua que componen la Cuenca [14,44,46,92,99].

Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es la capacidad del agua para conducir la electricidad y está relacionada con el grado de sales disueltas en el agua [100]. Se ha graficado el comportamiento de la conductividad eléctrica en el período completo de monitoreo (12 meses), con el objetivo de observar las variaciones en los puntos de muestreo (ver anexo 2).

En los gráficos se observa que existe un patrón de la distribución de la CE el cual se repite en todos los meses del año. Este patrón de los valores, se corresponde con la dirección de flujo de agua subterránea de la Cuenca, la cual está definida por la ubicación espacial de los puntos de muestreo. Las aguas se desplazan del Este hacia el Oeste, por lo que se aprecian valores bajos de CE para el punto de muestreo 11 correspondiente al pozo Al-6 ubicado hacia el Este y valores superiores de CE en el punto 1, correspondiente al pozo HV-649 ubicado al Oeste. Fueron encontrados valores de CE por encima de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los puntos 1, 2, 4, 5, 6, 8 y 10. Estos valores pueden estar asociados a posible contaminación de las aguas por la actividad antrópica del área debida a la presencia de gran cantidad de fuentes contaminantes (ver anexo 2).

Tomando como ejemplo representativo el mes de septiembre del año 2003 se observa que el valor de la CE en el punto de muestreo 11 es de 314 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que el valor de la CE en el punto de muestreo 1 es de 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ corroborando los planteamientos anteriores. Es necesario señalar además que los valores elevados de CE del punto 1 en todos los meses pudieran estar asociados además a la cercanía de este punto a la costa con respecto al resto de los puntos monitoreados, demostrando con esto una posible intrusión salina en el acuífero (ver anexo 2).

Se plotearon además las isolíneas de CE (ver anexo 2), mostrando su comportamiento espacial en cada mes del monitoreo con el objetivo de observar y delimitar las zonas que podrían estar relacionados con intrusión salina. En el gráfico se puede apreciar que los valores más altos se ubican, como es de esperar, en los puntos relativamente cercanos a la costa (punto 1 a 9 Km, punto 2 a 12 Km y punto 5 a 10 Km), además presentan una distribución que concuerda con la desembocadura del río Almendares. Esto pudiera indicar que por los efectos de variaciones en las mareas es posible que ocurra intrusión salina temporal la cual aprovecharía la distribución de los cauces antes mencionados.

Se hace necesario destacar, los elevados valores de CE observados en el punto de monitoreo No.10, el cual por encontrarse ubicado bastante lejos de la costa, pudiera ser descartada, como fundamental causa, la intrusión salina y si la posibilidad de un mayor lavado de la roca en el zona (roca carbonatada muy soluble al agua) debido a un aumento de la velocidad del agua subterránea

en el acuífero, demostrada por la profundidad del punto de muestreo (30-37 m), lo que evidencia una posible cavernosidad.

Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Es la cantidad de Sólidos que el agua conserva en suspensión después de 10 minutos de asentamiento. Es un indicador de posible contaminación. Las Normas Cubanas tienen establecidos los límites permisibles en agua de consumo para los Sólidos Totales Disueltos, la Concentración Máxima Deseable (CMD= 500 mg/L) y la Concentración Máxima Admisible (CMA= 1000 mg/L) [92]. Según las Normas Internacionales dadas, como por ejemplo el Decreto 475 de 1998 del Ministerio de Salud de Costa Rica, se establece que para agua potable los Sólidos Totales deberán ser inferiores a 500 mg/L [99]. En el caso del monitoreo de los SST en la cuenca Vento durante el período de un año se encontró que en los puntos de muestreo 1 y 2 existían valores superiores a 500 mg/L por lo que hay indicios de posible contaminación de sus aguas (ver anexo 2). Esta contaminación puede ser motivo de la explotación no controlada de estos pozos por el hombre o la forma empleada para el bombeo del agua. Por ejemplo en la boca del pozo 2, se encontraron vertidos de hidrocarburos y materia orgánica relacionados con el sistema de turbinas para el bombeo.

pH

El pH es una medida de la concentración de iones Hidrógeno. Se define como el Logaritmo del inverso de la concentración de iones H⁺ $pH = \text{Log } 1/[H^+]$. Su interpretación va relacionada con la Alcalinidad o Acidez titulable, los cuales tienen relevancia por encima de 9.6 o por debajo de 4.4 respectivamente. Teniendo en cuenta los datos de pH obtenidos durante los análisis físico químicos de las aguas correspondientes a la Cuenca Vento, se observa en el punto 9 correspondiente a la Presa Ejército Rebelde valores relativamente elevados de pH (ver anexo 2), los que se corresponden con el nivel de contaminación ambiental que sufren las aguas de esta presa. En otro orden se manifiesta un posible intercambio de aguas superficial-agua subterránea observado en los valores muy similares de pH correspondientes al punto 9 (Presa Ejército Rebelde) y el punto 8 (Pozo en el Parque Lenin) durante todo el período de muestreo. Estos dos puntos se encuentran a una distancia de 940 m y el punto 8 tienen una diferencia de cotas de 13.1 m con respecto a la Presa.

Cationes monitoreados (Ca, Mg, K, Na)

De los datos relacionados a los cationes monitoreados se puede inferir que el K y el Na no presentan valores significativos como para ser empleados como indicadores de contaminación ambiental. Sólo en el caso de los puntos 7, 8 y 9 se encontraron valores por encima del promedio encontrado en el resto de los puntos de muestreo (ver anexo 2). Esta situación pudiera deberse, en el caso del punto 9 al alto grado de contaminación que presenta la Presa Ejército Rebelde, y en los casos de los puntos 7 y 8 al intercambio agua superficial-agua subterránea que se manifiesta entre estos puntos y la Presa. Se debe destacar que igual conexión pudiera estar asociada entre los puntos 7 y la Presa Paso Sequito (ubicada a 174 m del punto), embalse al que llegan aguas de la Presa Ejército Rebelde.

En el caso del Ca se encontró que en todos los meses del año se cumplía el mismo patrón de distribución de valores que en el caso de los parámetros CE y HCO₃. El emplazamiento de la Cuenca (formación geológica carbonatada) favorece la interacción agua-roca, lo que hace que los contenidos de carbonatos en esta sean elevados (ver anexo 2). De esta forma se confirma lo

explicado anteriormente sobre la dirección de flujo de agua subterránea de la cuenca. Además se puede corroborar que las aguas se clasifican principalmente en Carbonatadas cálcicas

Aniones (HCO_3 , SO_4 , Cl^-)

Como se ha mencionado anteriormente los valores de bicarbonatos obtenidos se comportan de la misma forma que los valores de CE y Ca durante todo el período de muestreo (ver anexos 3), lo que demuestra la dirección de flujo de agua subterránea de la cuenca, definida por la ubicación espacial de los puntos de muestreo. No se encuentran valores anómalos, todos concuerdan con la clasificación de las aguas en bicarbonatadas cálcicas aunque existen algunos valores bajos asociados a períodos de sequía, ubicación geográfica (puntos de muestreo ubicados al Este), poca profundidad de los pozos y la presencia de aguas superficiales contaminadas, las cuales se intercambian frecuentemente a través de las lluvias.

Interpretación de los resultados obtenidos

De los valores del muestreo obtenido, fueron ploteados en el software AQUACHEM [105], los aniones y cationes, con el objeto de clasificar las aguas subterráneas (ploteando los valores en gráficos de Stiff) y verificar además la existencia de posibles mezclas en la Cuenca (ploteando los valores en gráficos de Piper), (ver anexo 3).

Debemos destacar, que aunque existen variaciones de las concentración de aniones y cationes en algunos puntos de muestreo (puntos 7, 8, 9 y 11), los gráficos de Stiff y de Piper, demuestran que las aguas subterráneas en la Cuenca, clasifican, de forma general, como aguas Bicarbonatadas Cálcicas (HCO_3 Ca) (ver anexo 3).

Teniendo en cuenta los valores observados en los gráficos, se evidencia que las aguas pertenecientes a la Presa Ejército Rebelde (punto 9), no clasifican como el resto de los pozos monitoreados, pudiendo clasificar las mismas en el tiempo, de forma general, como aguas bicarbonatadas sódicas cálcicas cloruradas (HCO_3 Na Ca Cl) y aguas sódicas cloruradas bicarbonatadas (Na Cl HCO_3), (ver anexo 2). La aguas muestreadas en este caso, son aguas superficiales, por lo que la interacción agua-roca es mucho menor, lo que hace que los aportes del Ca de la formación geológica donde se emplaza el punto (formación carbonatada), sean mucho más discretos. La composición anómala de las aguas en la Presa, respecto a su composición química y a sus altos valores de pH (ver anexo 2), muestran, entre otros, la acción producida por la actividad antrópica en el entorno de la Presa [29].

Se deben destacar además, los valores anómalos presentados en el punto de muestreo No. 11, y observados en los gráficos de Stiff y de Piper, donde se corroboran cambios de las propiedades del agua y mezclas de esta. Teniendo en cuenta además los altos valores de pH observados en este punto y la ubicación física de este, se puede evidenciar la posible contaminación producida por la actividad antrópica, ya que muy cercano a este punto, se ubican varios depósitos superficiales de agua (más de 8 depósitos a distancias que van desde 100 m hasta 500 m), entre ellos una laguna de oxidación perteneciente a las Empresas ganaderas de la zona. Es decir existe infiltración de estas aguas superficiales al manto freático de la esta zona, lo que hace que se mezclen las aguas y de origen a aguas que no se corresponden con las aguas de la Cuenca.

Los gráficos de Piper (ver anexo 3), evidencian una determinada mezcla de agua en la Cuenca, correspondiendo esta mezcla de agua sólo a aquellos puntos relacionados con aguas superficiales, siendo la zona más cercana a la desembocadura del río Almendares y la zona de la Presa, los sector que más se

caracterizan por este evento. Este fenómeno pudiera evidenciar un posible confinamiento geológico de la Cuenca Vento.

Teniendo en cuenta los eventos señalados en la Presa y atendiendo a la marcada relación con los puntos 7 y 8 monitoreados, se demuestra una alta interrelación entre las aguas superficiales del embalse y el acuífero de la Cuenca, evidenciándose que la Presa no es un buen punto de alimentación de aguas limpias al manto freático de la Cuenca Vento.

Conclusiones del Resultado 3

- 1- Las aguas subterráneas de la Cuenca Vento clasifican, de forma general, como aguas bicarbonatadas cálsicas.
- 2- Se observa una posible presencia de contaminación, ya sea por intrusión salina o por acción antrópica, en el lado Oeste de la Cuenca.
- 3- Los valores anómalos obtenidos en el agua de la Presa Ejército Rebelde (pH y clasificación), demuestran la presencia de fuentes contaminantes en el entorno, además de la correspondencia de estos valores con las propiedades particulares del punto muestreado (agua superficial, etc.).
- 4- La gran interrelación existente entre las aguas de la Presa (superficial) y los puntos de muestreo más cercano (puntos 7 y 8) (subterránea), evidencian la conexión directa entre estas. Se demuestra que la Presa Ejército Rebelde, juega un papel relevante como foco de alimentación de aguas no limpias a la Cuenca.
- 5- Se observa en la Cuenca, sólo mezclas de sus aguas en los puntos de contacto con aguas superficiales (punto cercano a las aguas del río Almendares y la zona de la Presa), mostrándose una posible confinación geológica de la Cuenca Vento.

Recomendaciones

- 1- Deben realizarse estudios de detalle, en aquellos puntos señalados como anómalos, de acuerdo al comportamiento de sus macrocomponentes químicos (aniones, cationes y SST) y parámetros físico químicos (CE, pH), haciendo énfasis en el análisis de otros parámetros de calidad de agua (metales pesados, nitritos, nitratos, STD, DBO, DQO, etc.).

APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS NUCLEARES EN LA EVALUACIÓN

Tritio en las aguas subterráneas. Fundamento teórico

Hace medio siglo que Kaufmann y Libby identificaron el tremendo potencial que ofrecía el Tritio cosmogénico para el fechado de las aguas [59]. Toda vez que el Tritio geogénico es prácticamente despreciable, aquel que se mide en las aguas subterráneas virtualmente significa, siempre, recarga moderna. Esta es la base conceptual para el cálculo del tiempo medio de residencia de las aguas subterráneas en los acuíferos [91,106,107,108].

Existe consenso en afirmar que cuando estos niveles son altos (≥ 30 UT) está implicada una fuente asociada a las explosiones termonucleares en la atmósfera, lo que indica recarga durante la década de 1960. Aquellas aguas que contiene Tritio próximo al límite de detección (1 UT) son submodernas o se trata de paleoaguas que se han mezclado con aguas someras modernas cerca de la zona de descarga o en el tránsito hacia éstas.

Existen cinco métodos –cualitativos y cuantitativos– para aproximarse al fechado de las aguas subterráneas con Tritio, a saber:

- . **Velocidad del pico de 1963**, que identifica el pico termonuclear preservado en las aguas subterráneas e identifica claramente su edad.
- . **Decaimiento radioactivo**, que permite calcular, para un grupo de valores medidos, el tiempo de desintegración a partir de un nivel de entrada (input) conocido.
- . **Modelo de la función de entrada**, que determina la recarga atenuada de los niveles de tritio para un sistema de flujo dado de aguas subterráneas aplicando la ecuación de decaimiento radioactivo.
- . **Análisis de la serie temporal**, que parte del muestreo sistemático en puntos específicos de los valores de entrada y salida durante un tiempo lo suficientemente largo para permitir identificar el tiempo de tránsito.
- . **Interpretación cualitativa**, donde el Tritio mensurable se considera equivalente de la recarga moderna.

Velocidad del pico de 1963

Sobre todo en sistemas acuíferos poco activos, el pico de las pruebas termonucleares de 1963 es un marcador importante que puede haberse preservado en éstos. Sin embargo, en sistemas de flujo moderado o rápido, este horizonte guía puede haberse desplazado ya o presentarse atenuado por dispersión y mezcla [17,28,38,40,45,53,53,55,56,70].

La precipitación (fallout) de Tritio de 1963, por otra parte, se ha preservado donde el flujo advectivo es mínimo, como en el caso de acuíferos de gran espesor de zona no saturada o de recarga muy difusa, como la que puede ocurrir a través de horizontes semiconfinados o semilibres. Al producirse un movimiento descendente muy lento, las nuevas aguas que ingresan al acuífero por infiltración desplazan las anteriores, lo que da como resultado una inversión, en las aguas subterráneas, del pico de Tritio en la precipitación. No obstante, parece que en la mayor parte de la zona no saturada de los acuíferos el pico de 1963 se movió hace tiempo. Fenómenos como la dispersión hidrodinámica y la mezcla de aguas bajo el nivel de la superficie piezométrica provocan una atenuación de la función de entrada de Tritio.

Es evidente que disponer de un horizonte guía tan nítido resulta una innegable ventaja en tanto proporciona información sumamente efectiva para estimar las velocidades de flujo y los tiempos medios de circulación de las aguas subterráneas.

Particularidades de la estimación del tiempo de residencia de las aguas subterráneas en el carso

Los acuíferos cársicos, en general, no presentan condiciones muy favorables a la aplicación de este método por las siguientes razones básicas:

La estructura del campo de flujo en términos de la posición de las zonas de recarga, drenaje y descarga de los sistemas locales e intermedios de flujo que participan en la integración de un sistema regional dado. Como cada asociación entre formas de absorción-conducción-descarga es un sistema local de flujo *per se* que, a su vez es parte de uno mayor, las velocidades de tránsito son sumamente variadas y la mezcla depende de la organización del escurrimiento interno y del estado evolutivo de esa parte de sistema. Y como la propia evolución hidrológica de los terrenos cársicos excluye o incluye formas y sistemas de flujo que pueden haber sido desactivados del funcionamiento hidrológico de la región, dentro del mismo dominio de flujo pueden encontrarse zonas de recarga difusa, lenta, como zonas de recarga concentrada, rápida. (Ver Figura 1)

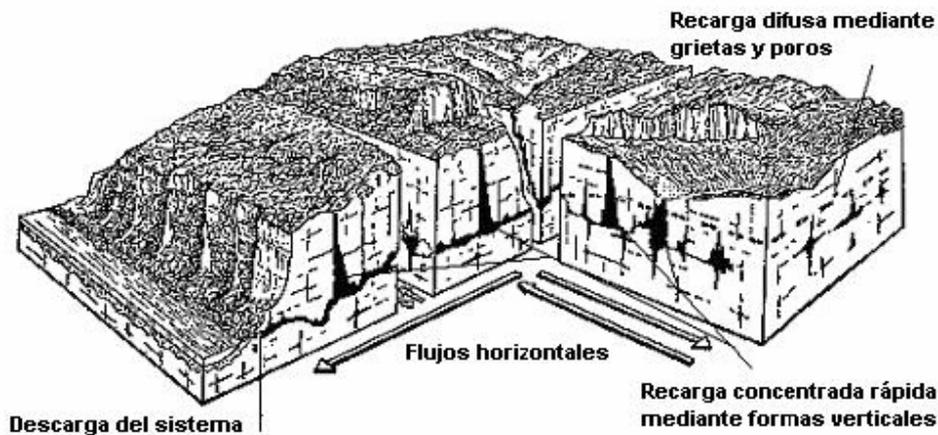


Fig. 1. Estructura del campo de flujo en términos de la posición de las zonas de recarga, drenaje y descarga de los sistemas locales.

Estos dos extremos ocurren en todas las regiones cársicas. Las zonas de **recarga concentrada**, rápida, asociadas a la infiltración de las aguas de lluvia a través de formas absorbentes como los honores, dolinas, simas o valles de diferente tipo, presentan incluso, grandes contrastes a los efectos del retardo y la acumulación. Zonas de drenaje vertical como simas conectadas con el nivel de las aguas subterráneas excluyen cualquier retardo en la zona no saturada ya que, de hecho, en esos lugares ésta no existe.

La presencia de ríos que penetran en el subsuelo a través de cavernas en la zona no saturada se comportan de manera diferente según se trate de movimiento a través del epikarst, de flujo hipodérmico o de convergencia con el acuífero. La recarga a través de dolinas y sumideros, por ejemplo, puede ser tanto concentrada como difusa, dependiendo del grado evolutivo de éstas; es decir, del grado de actividad hidrológica de las mismas y - sobre todo- de la conexión hidráulica con otras formas cársicas. Las vastas zonas cubiertas de suelo, pavimentadas, o simplemente por estratos menos permeables o por grietas rellenas son elementos de retardo de flujo que enmascaran la contribución de la zona de recarga en un punto dado del sistema acuífero.

A veces es posible lograr una buena aproximación para sustentar la cercanía a las zonas de recarga o de descarga según la solución muestreada se presente insaturada, saturada o sobresaturada respecto a los minerales más importantes del complejo –usualmente carbonatado- que constituye el karst. Para aquellas zonas de recarga rápida, concentrada, directa, usualmente las aguas representan insaturadas respecto a la calcita y la dolomita.

Pero la mezcla de aguas con diferente grado de saturación siempre provoca instauración de la solución por lo que estas determinaciones tienen que ser acompañadas de una fuerte evidencia de campo que las sustente y, por supuesto, de controles “*in situ*” de pH, temperatura, conductividad eléctrica de las aguas y presión parcial de CO₂.

La divergencia del flujo subterráneo es una de las características más importantes del caso. Ello significa que las relaciones hidráulicas entre las zonas de recarga, conducción y descarga no son obvias. Salvo que esté fehacientemente demostrado por ensayos rigurosos de trazadores o por exploración espeleológica directa no puede presumirse que cierto punto de descarga está asociado a un cierto grupo de formas de absorción o una determinada zona de recarga.

El limitado valor de uso que, para ciertos –y no pocos- sistemas acuíferos cársicos presentan las curvas equipotenciales, particularmente para el caso de sistemas locales de flujo, es una fuerte limitante para la interpretación de la composición isotópica de las aguas y, en especial, para la estimación del tiempo medio de tránsito de las aguas. Entre los factores que influyen en ello está la presencia de diferentes niveles de cavernamiento superpuestos que son responsables de la divergencia local del flujo. En muchas ocasiones, ello hace que ciertas relaciones de conexión hidráulica funcionen no sean permanentes y funcionen solamente bajo determinados estímulos hidráulicos. No es poco común el caso de conexiones entre diferentes aparatos cársicos (sistemas locales de flujo) que funcionan solamente en épocas de lluvias torrenciales. Tampoco es común el caso de formas de absorción y descarga, prácticamente contiguas que están totalmente desvinculadas entre sí.

La mezcla de aguas terrestres de diferente origen, como ocurre en algunas regiones con espeleogénesis hipogénica o la mezcla de aguas continentales y marinas en los acuíferos cársicos litorales introduce una componente de incertidumbre grande que, sin embargo, es totalmente independiente de la posición de las zonas de recarga y, en muchos casos la presencia de ciertos indicadores traza e incluso del propio ³H depende de la profundidad y hasta la hora del muestreo. Esto es particularmente cierto en el caso de acuíferos cársicos litorales en los que la presencia de conductos alternativamente absorbentes-emisivos varía el dominio de una componente sobre la otra, como en el caso de la marea alta donde penetra el mar a través de cuevas litorales o submarinas y de la marea baja, donde se descarga agua continental mezclada con la marina que penetró en el intervalo anterior.

En acuíferos interiores, donde hay presencia de estavelas el fenómeno es semejante, ya que se trata de formas alternativamente absorbentes-emisivas. Por otro lado, la mezcla de aguas siempre produce instauración respecto a la calcita, dolomita o yeso y, por ello, también enmascara el uso de este recurso para identificar las zonas de recarga del resto. Por ello la organización del flujo subterráneo en los sistemas cársicos –que no puede separarse en lo absoluto de la organización del escurrimiento superficial en ellos- es otro factor a tener en cuenta. Bajo determinadas condiciones, impresionantes redes de cavernas pueden extender el dominio de flujo subterráneo con total independencia de las divisorias superficiales. La presencia de flujo lateral y divisorias subterráneas móviles, dependientes de la recarga en un momento dado, no es un caso extraño, sobre todo si se

trata de sistemas de flujo predominantemente horizontal, libre, y difuso en que la distribución regional de potenciales hace dominar un flujo lento semejante al de un medio poroso [80,88].

Es precisamente la alternancia entre zonas capacitivas y transmisivas lo que provoca que también se encuentren zonas con muy diferente tiempo de tránsito de las aguas subterráneas. Efectivamente, tal y como ocurre en la zona no saturada, donde alternan zonas de flujo concentrado rápido, con otras de flujo retardado, más lento, en el subsuelo si la circulación se realiza a lo largo de grandes redes de cavernas, en las que el régimen de flujo es siempre no lineal de alta velocidad, los estímulos de recarga y, con ellos, la composición de las aguas se transmiten rápidamente a puntos muy alejados de las zonas de recarga: estas son las llamadas zonas transmisivas. Entre tanto, zonas en las que dominan los poros de la matriz o grietas pequeñas, retardarían el flujo horizontal, incrementarían la retención y por ello, el decaimiento de radioactivo y la atenuación natural, en suma, serán efectos dominantes sobre la velocidad con la que se mueven las aguas y, con ello, incrementarían notablemente el efecto de acumulación. Estas son las zonas capacitivas.

Es importantísimo destacar que, en correspondencia con el desarrollo tridimensional del cavernamiento local y regional, estas zonas se distribuyen no solamente a lo largo del campo de flujo horizontal sino también en toda la columna vertical o espesor del acuífero, diferenciando el campo de las isocronas, es decir, de las isolíneas de tiempo de tránsito en todo el campo tridimensional de flujo.

El efecto combinado de ambas tiene notables consecuencias para la estrategia de aprovechamiento de los recursos hidráulicos subterráneos porque, obviamente, es tal efecto el que ha controlado la distribución de los recursos en el sistema acuífero. La explotación de zonas de recarga retardada o desvinculadas en todo o en parte del ciclo hidrológico actual es causante del agotamiento de los recursos por sobreexplotación. El desvío de líneas de flujo contiguas hacia estas zonas provoca cambios en el sistema de flujo con efectos laterales tan variados como la presencia de grandes conos de depresión, subsidencia inducida o desplazamiento de las zonas de recarga, todas de negativa influencia. Medidas de remediación como las de recarga inducida (recarga artificial) para la reposición artificial de las reservas de agua subterránea son a veces inútiles al construirse, precisamente, sobre estas zonas.

Como base de la modelación del trazador y la interpretación hidrodinámica de los resultados se adoptó el siguiente modelo conceptual:

- La cuenca es un sistema regional de flujo, cárstico, de flujo difuso, libre, con una estratificación vertical del campo de flujo asociada al desarrollo de niveles de cavernamiento.
- A escala regional, el campo de flujo es de anisotropía homogénea y el transporte regional está regido por la Ley de Darcy, por lo que tanto el flujo como el transporte se rigen por ecuaciones lineales.
- El campo de flujo está completamente rodeado por fronteras impermeables, de manera que no hay aportes ni pérdidas a través de los mismos. Por ello, toda la recarga ocurre dentro de los límites del sistema, a través de la zona no saturada.
- Toda la descarga de la cuenca se realiza en un solo punto, la Taza de Vento.
- El transporte se efectúa mediante mezcla total con dos picos, uno al fin del estiaje, drenando preferencialmente las aguas más antiguas y otro en el período lluvioso, drenando las aguas más jóvenes.

Función de entrada: Tritio en las aguas de lluvia

La información de entrada al sistema está definida por la actividad de Tritio en las precipitaciones registrada en la Estación Pluviométrica La Quebrada, operada por el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones y se encuentra en el borde septentrional de la Cuenca de Vento.

Esta estación posee registros útiles desde Octubre del 2002 y, con ligeras interrupciones en Enero y Febrero del 2003 y en Agosto del 2004, cubre todo el período de observaciones de las aguas subterráneas (Ver Figura 2).

El ritmo anual de la función de entrada de Tritio al sistema muestra una mayor carga asociada a las precipitaciones que ocurren en el período lluvioso (Mayo–Octubre) pero que, a su vez, representan –en general- los valores más bajos de actividad de Tritio, como puede observarse en las Tablas 1 y 2. Asimismo, este ritmo muestra una perfecta asociación con la respuesta del acuífero y la distribución inter e hiperanual de la distribución de la pluviometría en el territorio [84]. Este comportamiento ha sido reportado con anterioridad en otros estudios isotópicos de las aguas subterráneas cubanas.

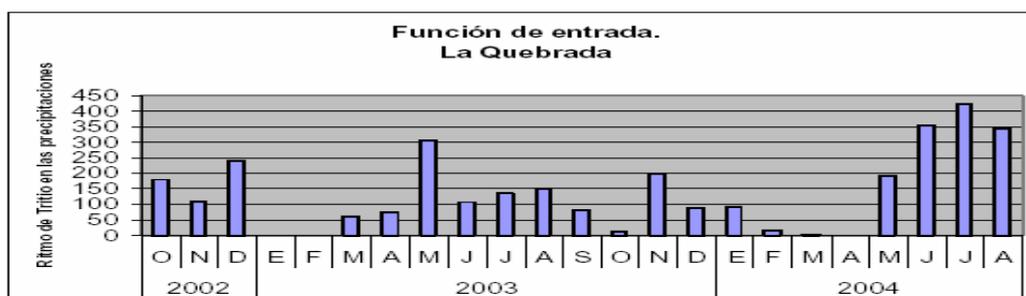


Fig. 2. Ritmo anual de la carga de tritio en las precipitaciones

Tabla 1. Actividad de ^3H (UT) y lámina de lluvia (mm) registrada en la Estación La Quebrada

3H en Lluvia		UT	Lámina (mm)
2002	O	1.01	177.6
	N	3.01	36.2
	D	1.8	132.4
2003	E		
	F		
	M	0.55	110.5
	A	0.84	90.6
	M	1.24	245.6
	J	0.82	130.8
	J	0.93	145.6
	A	0.67	226.8
	S	0.41	202.4
	O	0.46	26.4
	N	2.28	86.4
	D	2.39	36.6
2004	E	1.36	67.8
	F	0.84	18.8
	M	1.19	3.8
	A		28
	M	1.38	138.9
	J	1.29	272.2
	J	2.02	208.8
	A	1.07	319.4

Tabla 2. Acumulados estacionales de Tritio en las aguas de lluvia (NR: no registro de ^3H por insuficiencia de lluvia)

Año	Mes	^3H en Lluvia	Media pesada
2002	O	1.01	
	N	3.01	
	D	1.8	
2003	E	NR	
	F	NR	
	M	0.55	
	A	0.84	
suma		6.2	
	M	1.24	
	J	0.82	
	J	0.93	
	A	0.67	
	S	0.41	
	O	0.46	
	suma		4.53
	N	2.28	
	D	2.39	
2004	E	1.36	
	F	0.84	
	M	1.19	
	A	NR	
suma		8.06	
	M	1.38	
	J	1.29	
	J	2.02	
	A	1.07	

En efecto, como muestra la Figura 3, las láminas acumuladas de lluvia y de tritio muestran despegues semejantes asociados a rupturas de pendiente que marcan, nítidamente, el fin de un período y el inicio de otro. Indirectamente, ello representa, de manera general, la lámina de lluvia requerida para representar recarga efectiva en el acuífero cársico, lo que tiene una especial importancia para el fechado de las aguas, toda vez que láminas menores que tal valor índice y, por ende, concentraciones menores de ^3H no representan eventos de recarga natural y, en consecuencia, no son tomados en cuenta para la estimación del tiempo medio de residencia de las aguas.

Obsérvese que las rupturas de pendiente corresponden, para los casos disponibles, con el inicio del período lluvioso en tanto las mesetas o menores pendientes con el período menos lluvioso. Este es un efecto importante a tomar en consideración sobre todo cuando se pretenden evaluar tiempos de tránsito que están asociado a altas velocidades de circulación de las aguas subterráneas a través de la zona no saturada, como es, presumiblemente, el caso de los sistemas cársicos. Por otro lado, este comportamiento es un indicador directo de que la mayor tasa de recarga debe ser esperada en los meses del período lluvioso y solo una componente muy pequeña, durante los meses menos lluviosos, entre Noviembre y Abril.

Variaciones locales pueden esperarse asociadas a lluvias torrenciales o a la influencia de eventos huracanados, como fue demostrado en su momento [2,60,84,103] para el ^{18}O y ^2H .



Fig 3. Lámina de lluvia y tritio acumulados durante el período de observaciones en la Estación La Quebrada

El régimen de lluvias en la cuenca de Vento ha sido analizado en un reporte anterior. Las características básicas se describen a continuación. Para el análisis del comportamiento del régimen pluviométrico de la cuenca del río Almendares hasta el cierre del embalse Ejército Rebelde, se ha tomado como patrón la serie de 63 años del pluviómetro Hb-26 (período 1937-1999), ubicado en las coordenadas Norte - 350.4 y Este - 376.4. Este pluviómetro es considerado uno de los más representativos de la cuenca ya que está localizado en la cabecera del embalse y tener la mayor longitud de serie entre los pluviómetros evaluados (Hb-26, Hb-303, Hb-126).

Análisis de tendencia y regularidad de las precipitaciones.

En el análisis de series de cualquier índole existen criterios por los que se hace necesario regirse, los fundamentales en hidrología son: la tendencia y la regularidad [72,73,88]. La tendencia de una serie de precipitaciones depende del período de tiempo que se esté analizando y esta puede manifestarse como un incremento o una disminución de valores. La regularidad consiste en la frecuencia con que se presentan los años húmedos y los años secos consecutivos.

En la Figura 4, se muestran las desviaciones de la lluvia anual respecto al valor promedio P_0 de 1588 mm para la serie pluviométrica escogida. Sobresalen dos períodos representativos de 30 a 31 años, donde se alternan años húmedos y años secos. El primero de ellos se extiende desde 1937 hasta 1968, con tendencia a ascender, y el segundo, de 1968 hasta 1999, con tendencia a descender.

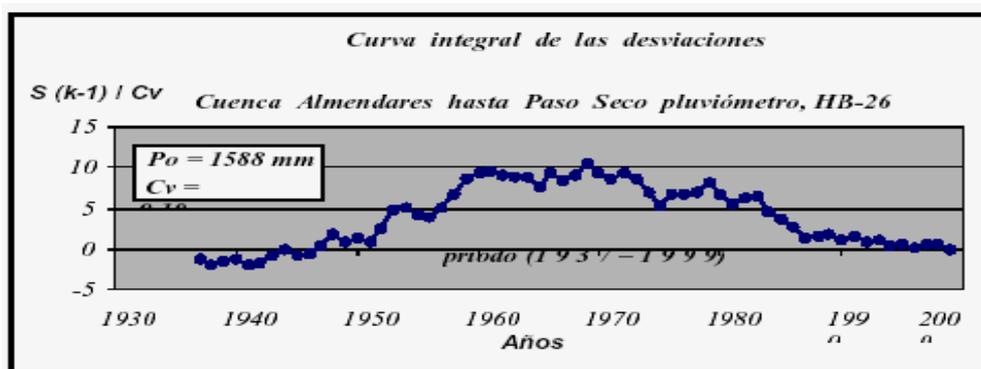


Fig. 4. Desviaciones de las precipitaciones

La Figura 5, muestra las desviaciones transformadas a láminas (mm). La regularidad observada muestra que de 1937 a 1962, la frecuencia de años consecutivos húmedos es 2 – 3 y secos de 1 – 2. A partir de 1963 el comportamiento del régimen se modifica, con una tendencia no sólo al aumento del número de años consecutivos por debajo del valor promedio de la cuenca, sino al aumento de la magnitud de las láminas (período seco).

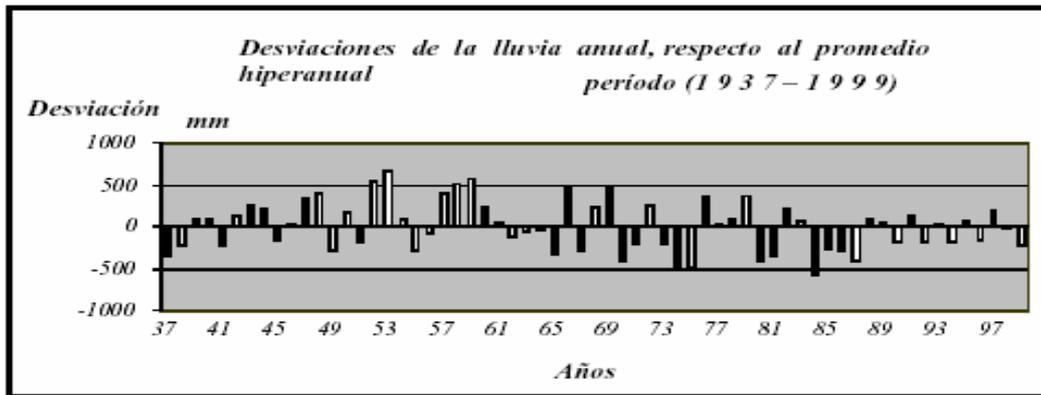


Fig. 5. Lámina de las desviaciones

El déficit que representa la Figura 5, como regla, no es superado por las láminas de los años subsiguientes. Por ejemplo, el comportamiento desde el año 1973 hasta el año 1975 presenta un déficit acumulado ascendente de -1190 mm, valor que no es superado por el acumulado de los 4 años posteriores que fue de sólo 834 mm por encima de la media. El período de 1984 a 1987 (años secos) muestra un déficit sumario de -1546 mm, aproximadamente la misma lámina de lluvia que como promedio debe precipitar en la cuenca en un año (1588 mm). Los dos años siguientes (1988 y 1989) fueron húmedos, pero el acumulado de las láminas por encima del valor promedio o norma de la cuenca, fue sólo de 111 mm; este valor no suple el déficit de los años secos que le anteceden.

La Figura 6, muestra la tendencia descendente de las desviaciones de la lluvia anual respecto a la lluvia media en el período de 33 años, comprendido entre 1967 y 1999.

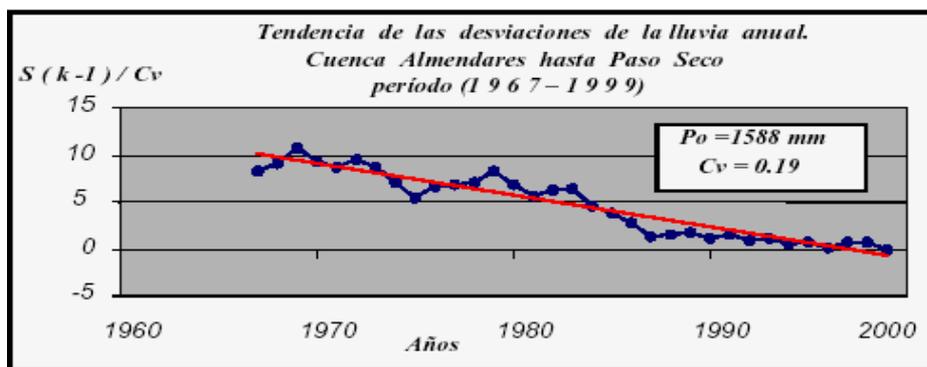


Fig. 6. Tendencia de las desviaciones de la lluvia

En la Figura 7, se puede apreciar que el comportamiento anual de la lluvia, a partir del año 1988, se regulariza y la tendencia promedio se caracteriza por la alternancia de años húmedos y secos Consecutivos.

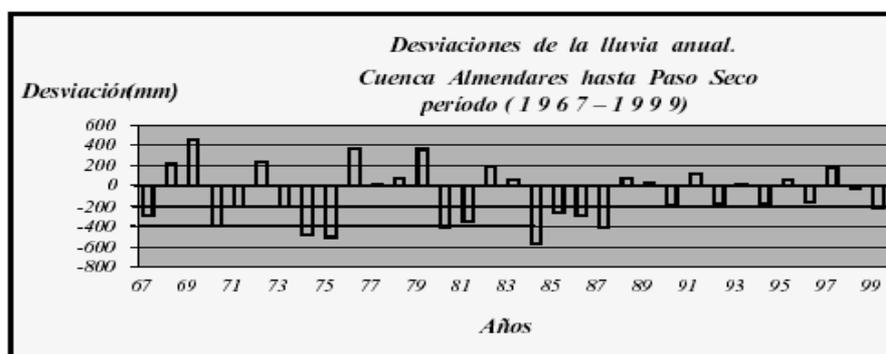


Fig. 7. Desviaciones de la lluvia anual

Función de salida: Tritio en las aguas subterráneas

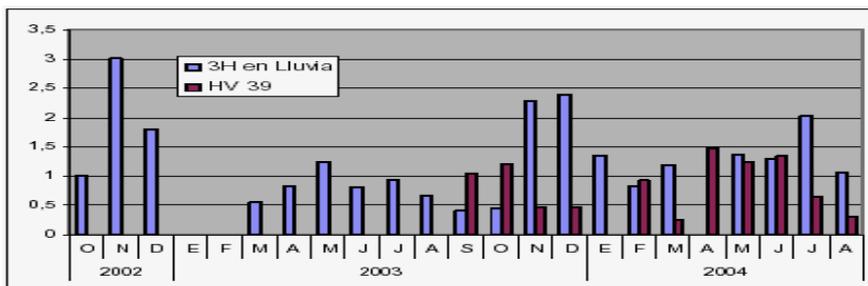
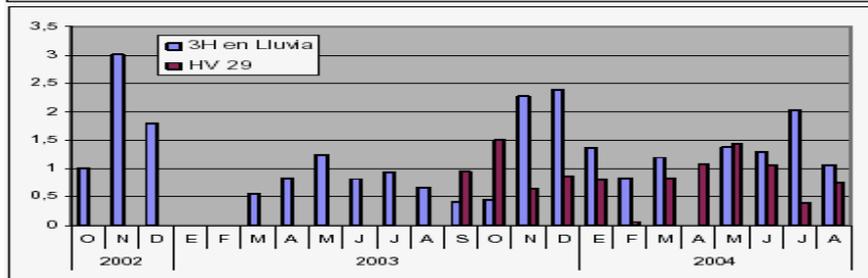
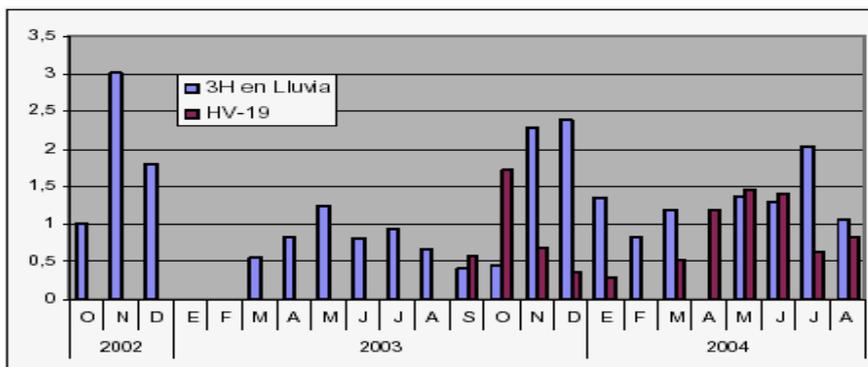
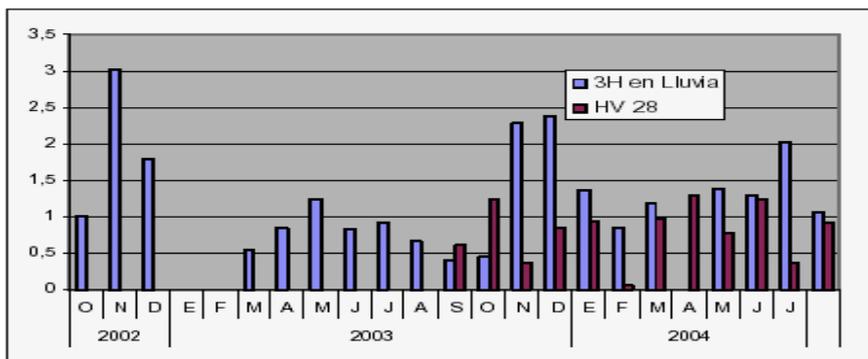
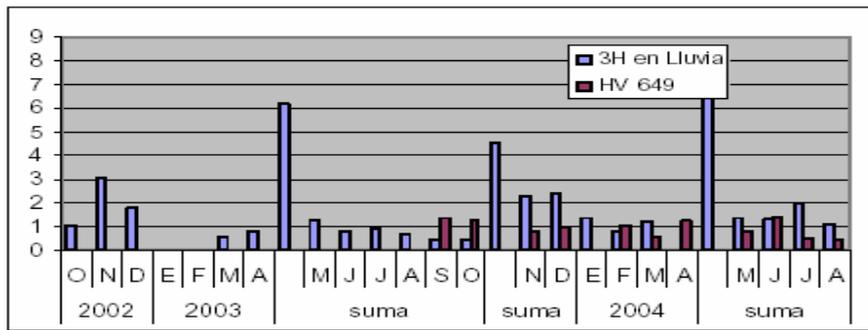
El muestreo de ^3H en las aguas subterráneas es mucho más limitado que el de las aguas de lluvias y corresponde a un muestreo discreto por 12 meses en los 11 puntos seleccionados de una Red de Monitoreo cuyo diseño y principales características fueron discutidos en un reporte inédito anterior.

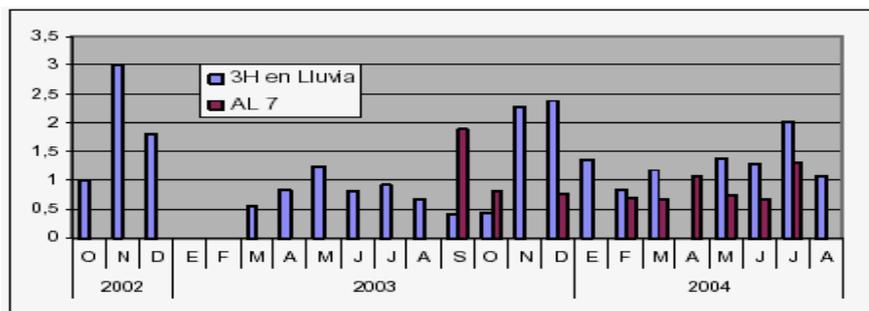
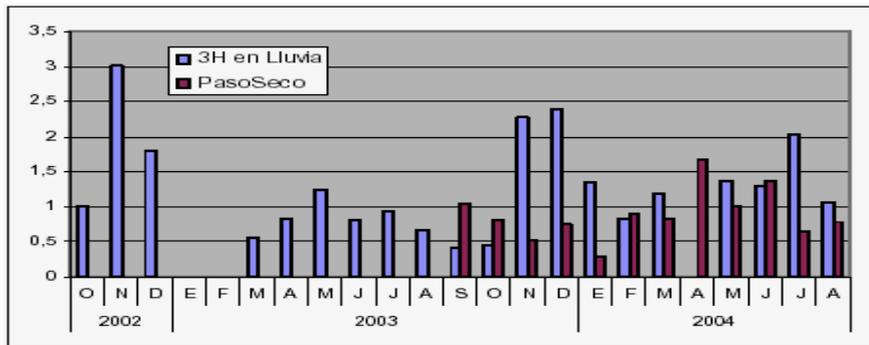
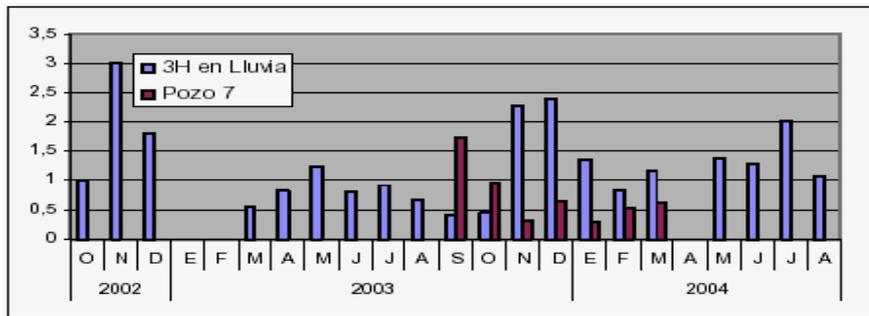
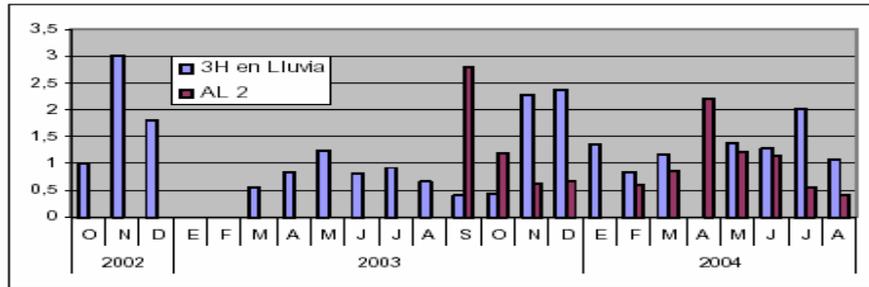
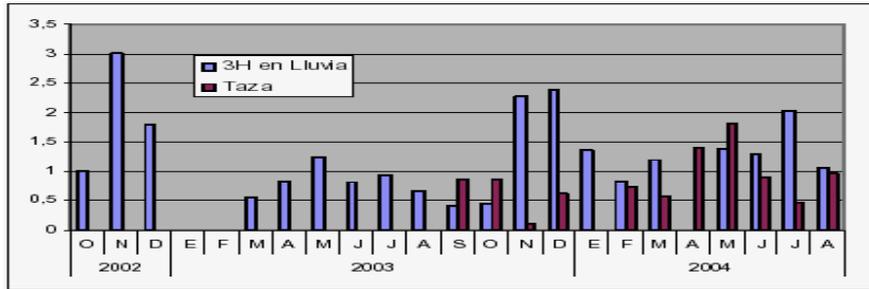
De estos puntos, uno de ellos, la Taza de Vento, corresponde a la principal zona de descarga del sistema regional de flujo, en el límite norte de la cuenca. El resto son estaciones de agua subterránea excepto una estación (Presa Ejército Rebelde –Paso Seco-) incluida deliberadamente por las dudas que existen si se trata de aguas superficiales o no.

La serie de muestreo abarcó el período Noviembre del 2003 hasta Octubre del 2004 y los resultados se presentan en la Tabla 3. Las Figuras 8–18, muestran la relación entre las actividades de ^3H medidas en la lluvia de la Estación La Quebrada y los puntos de muestreo de aguas subterráneas.

Tabla 3. Valores de Tritio medidos en las aguas subterráneas

	HV 649	HV 28	HV-19	HV 29	HV 39	Taza	AL 2	Pozo 7	Paso Seco	AL 7	AL 6
N	0.81	0.38	0.68	0.65	0.48	0.12	0.63	0.32	0.52	0.006	0.32
D	0.96	0.85	0.36	0.86	0.48	0.62	0.67	0.65	0.76	0.78	0.47
E	0	0.94	0.29	0.8	0	0	0	0.29	0.29	0	0.8
F	1.02	0.07	0	0.07	0.93	0.74	0.6	0.54	0.9	0.7	0.64
M	0.56	0.97	0.53	0.84	0.26	0.57	0.85	0.62	0.83	0.66	0.12
A	1.26	1.3	1.2	1.08	1.47	1.4	2.22		1.67	1.08	1.24
M	0.83	0.78	1.46	1.44	1.25	1.81	1.23		1.02	0.75	0.75
J	1.39	1.25	1.41	1.06	1.34	0.9	1.13		1.38	0.66	0.75
J	0.48	0.37	0.63	0.39	0.65	0.47	0.55		0.66	1.3	1.09
A	0.43	0.92	0.83	0.75	0.31	0.96	0.4		0.79	0	0.57
S	1.36	0.62	0.57	0.95	1.05	0.86	2.79	1.75	1.05	1.9	0.51
O	1.26	1.25	1.71	1.51	1.21	0.86	1.21	0.95	0.82	0.81	0.99





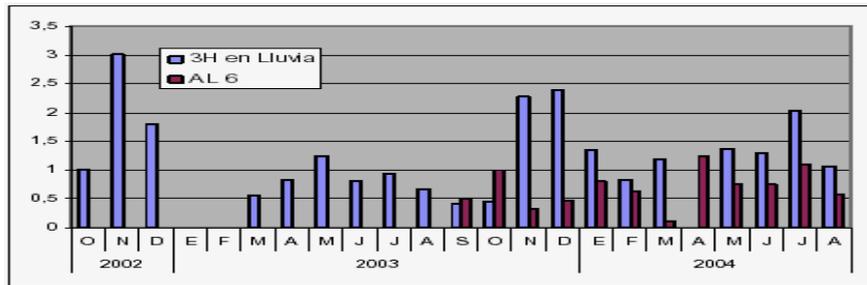


Fig. 8-18. relación entre las actividades de ^3H medidas en la lluvia de la Estación La Quebrada y los puntos de muestreo de aguas subterráneas.

Dos características destacan de la simple inspección de la Tabla 3 y de los gráficos de las Figuras 8-18:

- La falta de correspondencia entre la actividad de Tritio medida en las aguas de lluvia y en las aguas subterráneas en absolutamente todas las estaciones de muestreo durante el período evaluado.
- Los bajísimos valores de Tritio registrados en ciertas estaciones, en los que algunas, incluso, reportan cero ^3H .

Modelo de desintegración radioactiva con input conocido

Para la aplicación de esta aproximación se partió del input de tritio registrado en la lluvia de la Estación La Quebrada. El modelo es determinístico y se basa en la aplicación de la expresión siguiente [57,74,76,112]:

$$a_0 = \frac{a_t}{\exp(-0,056t)}$$

Siendo a_0 el valor de ^3H registrado, mensualmente, en la estación de referencia y la concentración medida en cada estación de muestreo de las aguas subterráneas. El modelo es exponencial por naturaleza y las curvas de desintegración teórica por cada mes de observaciones de pluviometría se representan en la Figura 19, extrapoladas hasta la fecha de las mediciones en las aguas subterráneas [26,32].

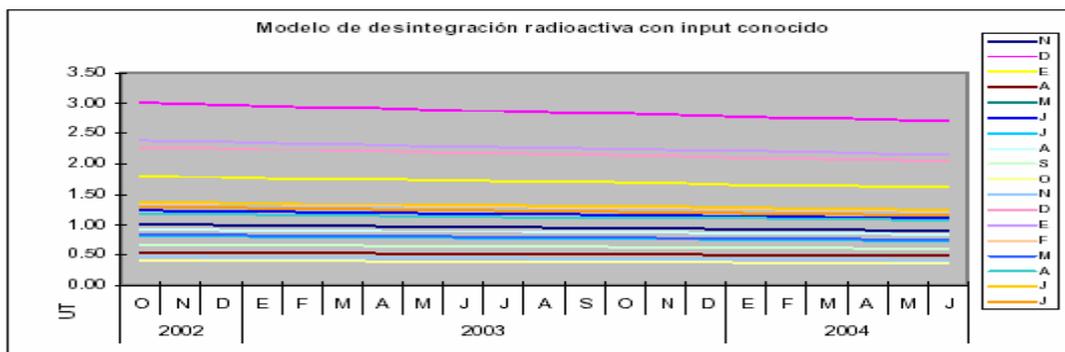


Fig. 19. Curvas de desintegración teórica por cada mes de observaciones de pluviometría

La comparación de los valores de la función de salida, en cada punto, con el input teórico del período de observación de la Estación La Quebrada se resume en la Tabla 4, en términos de tiempo; ello equivale a suponerlo equivalente del tiempo de tránsito a través de la zona no saturada.

Tabla 4. Input teórico (Fecha; mes-año) y tiempo de tránsito del trazador (Tt) en meses.

HV 649		HV 28		HV 19		HV 29		HV 39		Taza	
FECHA	Tt	FECHA	Tt	FECHA	Tt	FECHA	Tt	FECHA	Tt	FECHA	Tt
6-03	13	11-02	13	9-03	10	9-03	2	11-02	14	9-03	3
		10-03	9			8-03	4	2-04	3	8-03	10
		8-03	13			5-03	8	9-03	10		
						10-03	9				
						7-03	13				

AL 2		POZO 8		PSECO		AL 7		AL6	
FECHA	Tt	FECHA	Tt	FECHA	Tt	FECHA	Tt	FECHA	Tt
6-03	4	1-03	8	5-03	5	5-03	5	7-03	6
9-03	2	11-02	11	4-03	7	5-03	7	9-03	5
8-03	3	9-03	3	8-03	6	9-03	6	2-04	2
1-04	3	4-03	10	5-03	10	4-04	0	6-03	10
6-03	12			6-04	0	7-03	10	7-03	10
4-03	17			9-03	10	9-03	9	7-03	10
				5-03	15	2-04	5	7-03	11
				7-03	13				

Los resultados son interesantes.

La mayoría absoluta de los eventos de recarga que, eventualmente pudieran asociarse a un input conocido de tritio en las aguas de lluvia son, básicamente, producidos en el período lluvioso (Mayo a Octubre). Ello confirma que el sistema recibe recarga fresca anualmente pero no en toda la extensión del acuífero; ello significa que, normalmente, la alimentación y renovación de las reservas de agua subterránea no siempre se producen dentro del año, sino en plazos más largos.

Este resultado confirma los derivados del análisis autocorrelatorio y espectral de las series de niveles piezométricos (Portuondo, March y Guerra, 1997; Molerio y Pin, 2003) que identificaban, en algunos casos, largos momentos de inercia en la respuesta del sistema acuífero y una fuerte regulación interna de las cargas hidráulicas. Otro aspecto interesante es la confirmación de que, en el acuífero, existe una buena mezcla de aguas, ya que eventos sucesivos de recarga no son siempre consecutivos en el tiempo. Ello confirma que las aguas recargadas arriban al punto de muestreo de manera diferenciada, unas primero que otras pero sin seguir un estricto orden cronológico. Ello parece ser un rasgo típico de los sistemas cársicos según hemos observado en otras regiones del país (Molerio...) y está asociado a que la línea de flujo que se muestrea – cuando es diferente de la de descarga de todo el sistema- representa la edad del trazador para una línea de flujo particular y no, necesariamente, la de todo el sistema acuífero. Sin embargo, la multiplicidad de fuentes de alimentación natural que converjan a un mismo punto contribuye a diferenciar los tiempos de llegada del trazador.

Un tercer aspecto que merece atención es el escaso número de eventos de recarga que se registran, con este modelo, en la Taza de Viento, que es el punto de descarga de todo el sistema de flujo. Ello puede interpretarse como debido –básicamente- a que su zona de recarga se encuentra muy alejada y las aguas reflejarían un input mucho más antiguo, así como una mezcla más completa de las aguas de diferentes regiones del acuífero, lo que está en perfecta concordancia con la hidrogeología regional.

El comportamiento del modelo en el punto P. Seco, correspondiente a la presa Ejército Rebelde, es una buena evidencia de que, esencialmente, allí se trata de aguas subterráneas o al menos de una mezcla en la que predominan las aguas subterráneas sobre las superficiales, lo que contribuye a

aclarar ciertas dudas respecto al origen de las aguas en esta parte del acuífero. Desde el punto de vista de la gestión del recurso este es un resultado importante en tanto puede constituir un punto de pérdida de agua subterránea por evaporación y no alimentar al acuífero, como usualmente se supone. Los resultados isotópicos muestran que, al menos durante una parte del año, el intercambio en ese punto, favorece las pérdidas por evaporación de los recursos hidráulicos zonales. En otros momentos, sin embargo, los eventos de recarga local funcionan muy rápidamente.

Las zonas de recarga menos activas están relacionadas con el área de influencia de las estaciones HV 649, HV 19, HV 28 y la Taza de Vento. Si bien esta última queda clara, por las razones antes apuntadas, en las restantes no puede explicarse satisfactoriamente aún. Una fuerte actividad de recarga natural se identifica asociada al sistema drenado hacia las estaciones AL 2, AL 6 y AL 7 que, en particular, deben ser protegidas adecuadamente por constituir áreas de alimentación de acuífero rápidas y muy efectivas. Por los mismos motivos son zonas en extremo vulnerables a la contaminación, lo que incrementa la importancia de su adecuada protección.

Piezometría. Relaciones de Saturación

Modelo exponencial

En los acuíferos agrietados, parte del agua se concentra inmóvil en la matriz microporosa y se considera estática, mientras que otra parte fluye directamente por las grietas (agua móvil).

El trazador se difunde entre las dos fases, la móvil y la estática, lo que provoca un cierto retardo en el transporte del trazador en comparación con el flujo en el agua móvil. Una vez que el trazador dispone de tiempo suficiente para penetrar toda la matriz microporosa, el transporte puede considerarse similar al que ocurre en un medio poroso (utilizando modelos de caja negra). No obstante, en tal caso, el modelo matemático suministra el tiempo de tránsito del trazador; éste es R_p veces mayor que el tiempo medio de tránsito del agua t_w . El parámetro t_t equivale a la relación entre el volumen total de agua en el sistema V , y la tasa de flujo volumétrico Q , a través del sistema. El volumen de agua móvil (V_m), igual a la relación V/R_p , requiere del conocimiento del factor de retardo R_p que, a su vez, representa la relación entre la porosidad total n_t , y la porosidad de fisuras, n_f . En el área considerada para el modelo, ambas porosidades se asumieron, respectivamente, del 40 y el 5%, lo que resulta en un valor $R_p=8$.

Al aplicar el modelo de dispersión (DM) se requiere de un parámetro adicional de ajuste; éste es el llamado parámetro de dispersión $(D/vx)^*$. En sistemas de doble porosidad, del tipo grieta-poro, el parámetro (D/vx) describe la variación de los tiempos de tránsito del trazador a través de las grietas y resulta de la dispersión en las fisuras (o su distribución) y de la difusión entre el agua móvil y la estática. En el sistema se aplicó el modelo de dispersión (DM) para determinar los tiempos de tránsito del tritio a través del acuífero cedido amablemente, para su ensayo en estas condiciones por el Dr. P. Malosewski, Director del GSF-Instituto de Hidrología de Neuherberg, Alemania.

En condiciones de régimen permanente, la relación entre las concentraciones de entrada, $C_{in}(t)$ y salida $C_{out}(t)$ del trazador en el sistema hidrogeológico, se describen mediante la integral de convolución:

$$C_{out}(t) = \int C_{in}(t - \tau)g(\tau)\exp(-\lambda t)d\tau$$

en la que λ es la constante de decaimiento radioactivo para el tritio (cero para isótopos estables) y $g(\tau)$ es la función de ponderación que, en el modelo de dispersión, se define como:

$$g(\tau) = \{Pd / 4\pi / tt\} 0.5 \exp[-Pd(1 - \tau / tt)^2 / (4\tau / tt)] / \tau$$

donde tt es el tiempo medio de tránsito del trazador y Pd es 1/(D/vx)*.

Para cada año, la función de entrada se calcula según la expresión siguiente:

$$C = [\alpha \sum (PiCi)s + \sum (PiCi)w] / [\alpha \sum (Pi)s + \sum (Pi)w]$$

en la que Pi y Ci son, respectivamente, la lámina de lluvia y el contenido de tritio en ésta, en el i-ésimo mes del año en consideración. Empleando esta ecuación se calculó la función de entrada de ³H para el período de observación 2003-2004, sobre la base de datos medidos directamente en el sistema acuífero, en tanto para años anteriores se correlacionaron con los datos de la estación OIEA-OMM del Instituto de Ciencias Marinas de Miami, Estados Unidos (Figura 20), [36], el mismo adoptado por Molerio [84,89,90], para la contigua Cuenca Jaruco Aguacate. La tasa de infiltración α se tomó igual a la unidad.

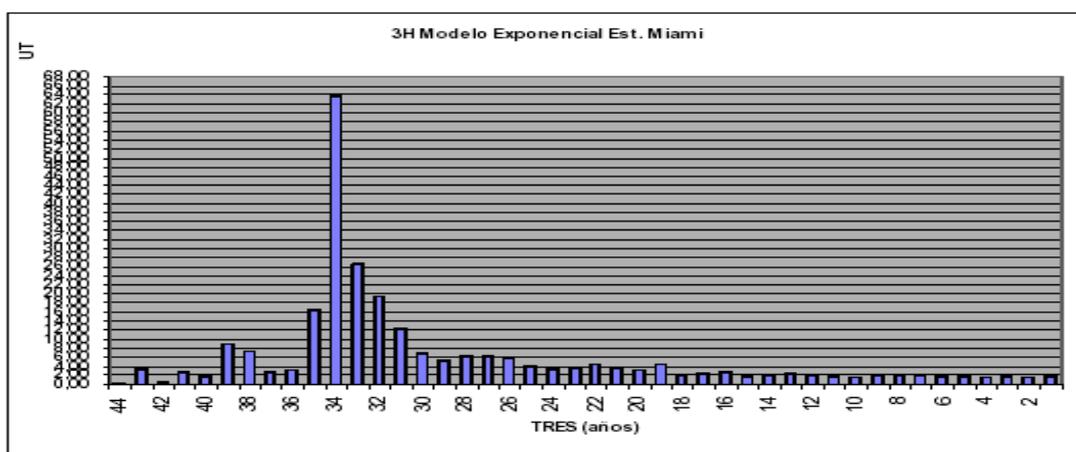


Fig. 20. Datos de concentraciones de ³H en la estación OIEA-OMM del Instituto de Ciencias Marinas de Miami, Estados Unidos

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5

Tabla 5. Concentraciones de ³H obtenidas del modelo desarrollado.

	LL	HV 649	HV 28	HV-19	HV 29	HV 39	Taza	AL 2	Pozo 7	PasoSeco	AL 7	AL 6	
N	2,28	0,81	0,38	0,68	0,65	0,48	0,12	0,63	0,32	0,52	0,00	0,32	
D	2,39	0,96	0,85	0,36	0,86	0,48	0,62	0,67	0,65	0,76	0,78	0,47	Aguas de 100 a
E	1,36	0,00	0,94	0,29	0,80	0,00	0,00	0,00	0,29	0,29	0,00	0,80	
F	0,84	1,02	0,07	0,00	0,07	0,93	0,74	0,60	0,54	0,90	0,70	0,64	
M	1,19	0,56	0,97	0,53	0,84	0,26	0,57	0,85	0,62	0,83	0,66	0,12	Mezcla de aguas de 100a y pre 1952
A	0,84	1,26	1,30	1,20	1,08	1,47	1,40	2,22		1,67	1,08	1,24	
Suma	8,9	4,61	4,51	3,06	4,3	3,62	3,45	4,97	2,42	4,97	3,226	3,59	
M	1,24	0,83	0,78	1,46	1,44	1,25	1,81	1,23		1,02	0,75	0,75	
J	0,82	1,39	1,25	1,41	1,06	1,34	0,90	1,13		1,38	0,66	0,75	Mezcla de aguas recientes
J	0,93	0,48	0,37	0,63	0,39	0,65	0,47	0,55		0,66	1,30	1,09	
A	0,67	0,43	0,92	0,83	0,75	0,31	0,96	0,40		0,79	0,00	0,57	
S	0,41	1,36	0,62	0,57	0,95	1,05	0,86	2,79	1,75	1,05	1,90	0,51	
O	0,46	1,26	1,25	1,71	1,51	1,21	0,86	1,21	0,95	0,82	0,81	0,99	
Suma	4,53	5,75	5,19	6,61	6,1	5,81	5,86	7,31	2,7	5,72	5,42	4,66	

Estudios empleando isótopos estables (^2H y ^{18}O)

La molécula de agua está formada por dos elementos: hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno se presenta en la naturaleza bajo la forma de dos isótopos estables, el protio (^1H) y el deuterio (^2H), y uno radiactivo, el tritio (^3H). El oxígeno posee tres isótopos estables: ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O . La sustitución de isótopos, tanto de oxígeno como de hidrógeno, en la molécula de agua produce variaciones en aquellas propiedades controladas directamente por la masa molecular, como la densidad, presión de vapor, velocidad de difusión, etc. Estas variaciones dan lugar al llamado fraccionamiento isotópico (en adelante fraccionamiento) que consiste en la reacomodación de las especies isotópicas entre las distintas sustancias o fases intervinientes de forma que las concentraciones de las mismas resultan ser diferentes a las del estado inicial.

La relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ es de aproximadamente 1: 500 y la $^2\text{H}/^1\text{H}$ de 1:6600 en el agua del océano. Estas proporciones pueden variar de un agua a otra, según su historia, como se verá más adelante. Las tres especies moleculares del agua poseen distintas masas molares, este hecho produce comportamientos diferentes en los procesos físicos tales como los cambios de estado, difusión, etc. Las aguas que contienen una mayor proporción de la especie molecular ligera, $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, tienen una presión de vapor mayor que aquellas más ricas en las especies moleculares pesadas. Como la presión de vapor determina la velocidad de evaporación o condensación del agua, las moléculas ligeras evaporan más rápidamente y condensan en forma más lenta que las moléculas pesadas. Es decir, presentan una tendencia mayor a permanecer en la fase vapor durante el cambio de estado y por lo tanto el vapor que escapa de una superficie líquida para formar una nube es más pobre en ^{18}O y ^2H que el agua que le dio origen, que queda así enriquecida en isótopos pesados. Este enriquecimiento será más notorio en reservorios confinados como lagos y embalses, a diferencia del mar, "reservorio infinito", donde la composición isotópica permanece más bien constante.

De esta forma tiene lugar un **fraccionamiento isotópico**, que es más importante a medida que disminuye la temperatura. Esta dependencia del factor de fraccionamiento con la temperatura, como así también la condensación parcial durante las precipitaciones, genera los llamados efectos de "altitud", "continental", "latitud" y las variaciones estacionales. El efecto de "altitud" se debe a que el vapor residual después de una precipitación parcial es más liviano que el original (menor contenido de isótopos pesados). Por lo tanto, a medida que la masa de aire asciende, las precipitaciones serán más livianas, observándose valores más empobrecidos a medida que aumenta la altitud. Una situación similar tiene lugar a medida que la masa de aire avanza tierra adentro, generándose un efecto "continental" con lluvias más ligeras al ir avanzando sobre el continente. El efecto de "latitud" se debe a que el fraccionamiento isotópico producido durante los cambios de estado aumenta con la disminución de la temperatura. Por lo tanto, como al aumentar la latitud disminuye la temperatura, en líneas generales, las precipitaciones cercanas a los polos son isotópicamente más ligeras que las próximas al Ecuador. Esta dependencia con la temperatura también da origen a variaciones estacionales, siendo las precipitaciones más ligeras en invierno que en verano.

Por estas razones, los procesos físicos y los fenómenos meteorológicos responsables del transporte del agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico producen una caracterización isotópica del agua de acuerdo a su historia, que puede ser de gran utilidad en el estudio de su origen y comportamiento. Cuando la precipitación alcanza la superficie del suelo su composición química puede modificarse, principalmente, por evaporación o por mezclado con aguas de distinta composición. Estas modificaciones serán tanto más importantes cuanto mayor sea el tiempo de permanencia del agua en superficie, que depende, a su vez entre otros factores, de la permeabilidad

de los materiales superficiales del suelo. Si la permeabilidad es elevada, la infiltración es rápida y la composición isotópica del agua infiltrada puede ser idéntica o similar a la de las precipitaciones. En caso contrario, se produce evaporación previa y el agua infiltrada es más pesada.

Una vez que el agua se infiltra a profundidades mayores de 3 ó 4 metros en general deja de estar sometida al proceso de evaporación y por lo tanto su composición isotópica se mantiene constante. Sin embargo, la composición isotópica de las aguas subterráneas puede modificarse por mezclado con aguas de diferentes procedencias y en el caso de aguas sometidas a altas temperaturas, por intercambio isotópico entre el oxígeno del agua y el de las rocas, generalmente en sistemas carbonáticos.

Cuando el agua experimenta un cambio de estado se produce fraccionamiento tanto para el ^{18}O como para el ^2H , de acuerdo con sus respectivos coeficientes termodinámicos de fraccionamiento (δ). En la naturaleza, el proceso de condensación tiene lugar en condiciones de equilibrio, mientras que el de evaporación suele realizarse en condiciones de no-equilibrio. Si la evaporación ocurre en condiciones de equilibrio, la composición isotópica del vapor producido está determinada por la presión de vapor de las distintas especies moleculares, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ se relacionan entre sí según la expresión: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O}$

Cuando no se cumplen las condiciones de equilibrio, la velocidad de evaporación de las distintas especies moleculares del agua depende tanto de las respectivas presiones de vapor, como de sus coeficientes de difusión en el agua y en el aire. Las velocidades de difusión de las tres especies moleculares del agua mencionadas anteriormente se ordenan de la siguiente forma:

$$V[\text{H}_2\text{O}] > V[^2\text{HHO}] > V[\text{H}_2^{18}\text{O}]$$

Como consecuencia de esta relación, cuando se produce la evaporación en condiciones de no-equilibrio, el vapor producido tendrá una mayor proporción de ^2HHO que aquel originado en condiciones de equilibrio, generándose un "exceso de deuterio" en el agua a partir de la cual se producirán las precipitaciones. Posteriormente las precipitaciones conservarán como resultado del proceso de condensación, que tiene lugar en condiciones de equilibrio el mencionado exceso de deuterio. De esta forma se explica que la composición isotópica de la mayor parte de las precipitaciones se encuentre dentro de una línea cuya pendiente coincide con la descrita anteriormente para condiciones de equilibrio, ya que en ambos casos la condensación se produce de ese modo, pero con un valor de exceso de deuterio prefijado durante la evaporación (d). La línea obedece en promedio a la siguiente ecuación, con un valor $d=10\text{‰}$: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$. La representación gráfica de esta recta recibe el nombre de **recta meteórica** y la ordenada al origen es el **exceso de deuterio**.

En el caso de evaporación a partir de un cuerpo de agua cerrado, como se comentó anteriormente, se produce un enriquecimiento de isótopos pesados en la fase líquida. El efecto cinético de la evaporación hace que las moléculas de H_2^{18}O queden retenidas preferentemente en el líquido, y su concentración aumenta más rápidamente que la de ^2HHO . Como resultado, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se modifican a lo largo de una recta, llamada **línea de evaporación**, Figura 2, 2-3-4, cuya pendiente oscila, en la mayoría de los casos, entre 4 y 6. El valor de la ordenada al origen suele ser menor que 10‰ y puede disminuir hasta hacerse negativa. En general, estos parámetros son buenos indicadores del proceso de evaporación. Sin embargo, existen casos en que este proceso se puede confundir, por ejemplo, con un fenómeno de mezcla de aguas, y por lo tanto se debe recurrir a otros parámetros, como la comparación con datos químicos, para identificar de que fenómeno se trata.

Composición isotópica (^2H y ^{18}O) en las aguas de la cuenca Almendares-Vento

Los análisis isotópicos ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) fueron realizados en el Laboratorio de Isótopos Estables del INGEIS (Argentina). Las muestras fueron tratadas siguiendo técnicas establecidas. Las mediciones de las relaciones isotópicas se realizaron en un espectrómetro de masas de triple colector, sistema de introducción múltiple, Finnigan MAT Delta S. Los resultados se expresan como d, definido como: $d = (1000 * \text{RS} - \text{RP} / \text{RP}) \text{‰}$, donde: d: desviación isotópica en ‰; S: muestra; P: referencia internacional; R: relación isotópica ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$). La referencia utilizada es Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW).

Para la evaluación de la función de entrada al sistema, se utilizaron los datos de la Estación “La Quebrada”-CPHR perteneciente a la Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP) (IAEA/WMO, 2002). Los registros de precipitación en la zona son escasos, razón por la cual no se puede elaborar una recta meteórica local. Se calcularon los promedios ponderados considerando los datos disponibles de los años 1991 y 2002 (Tabla 6) y se tienen en cuenta los datos individuales. Los excesos de deuterio (“d”) de estas precipitaciones tienen valores en general >10 para el período lluvioso (mayo-octubre) y <10 para el resto de los meses.

Tabla 6. Datos GNIP Estación “La Quebrada”, CPHR

	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d	T _H	mm	$\delta^{18}\text{O}_p$ (‰)	$\delta^2\text{H}_p$ (‰)	d	T _H (UT)	
15-01-90	-0,4	-1	2	3	39	-0,01028	-0,02571		0,00593	
15-02-90	-2,3	-5	13	3,4	80	-0,12129	-0,26368		0,00762	
15-03-90	-2,1	-5,5	11	3,1	75	-0,10382	-0,27192		0,00633	
15-04-90	-2,1	-5	12	2,9	72	-0,09967	-0,23731		0,00554	
15-05-90	-3,7	-25	5	3,9	544	-1,32683	-8,96506		0,01003	
15-06-90	-3,5	-23,4	5	4,1	100	-0,23072	-1,54252		0,01108	
15-07-90	-2,1	-12,6	4	3	140	-0,19380	-1,16282		0,00593	
15-08-90	-3,1	-17,7	7	3,2	175	-0,35761	-2,04186		0,00675	
15-09-90	-3,1	-20	5	4,6	93	-0,19005	-1,22610		0,01395	
15-10-90	-3	-11,2	13	3,2	131	-0,25906	-0,96717		0,00675	
15-11-90	-3,4	-13,1	14	3,8	49	-0,10982	-0,42314		0,00952	
15-12-90	-2,2	-3,6	14	3,3	19	-0,02755	-0,04509		0,00718	
lluvia total					1517	-3,0	-17,2	7	0,1	valores ponderados
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d	T _H	mm	$\delta^{18}\text{O}_p$ (‰)	$\delta^2\text{H}_p$ (‰)	d	T _H (UT)	
15-03-02	-2,5	-12,3	8	2,4	0,3	44,6	-0,07534	-0,37089		0,00389
15-04-02	-1,1	5,9	15	2,1	0,3	75,1	-0,05582	0,29941		0,00298
15-05-02	-4,1	-22,7	10	1,6	0,3	168,1	-0,46571	-2,57846		0,00173
15-06-02	-9,4	-66,3	9	2	0,3	292	-1,85472	-13,08169		0,00270
15-07-02	-1,4	-6,8	4	2,4	0,2	171,5	-0,16224	-0,78803		0,00389
15-08-02	-0,8	-1,2	5	2,1	0,2	124,6	-0,06736	-0,10103		0,00298
15-09-02	-6,1	-38,9	10	1,9	0,2	257,8	-1,06263	-6,77642		0,00244
15-10-02	-4,1	-24,6	8	1,6	0,2	177,6	-0,49203	-2,95220		0,00173
15-11-02	-2,5	-2,5	18	2	0,2	36,2	-0,06115	-0,06115		0,00270
15-12-02	-2,8	-11,4	11	1,9	0,2	132,4	-0,25050	-1,01991		0,00244
lluvia total					1479,9	-4,5	-27,4	9	0,03	valores ponderados

En la figura 21, $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, se presentan los resultados de las muestras analizadas, conjuntamente con la línea de aguas meteóricas mundial, *i.e.*: $\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰}$ las lluvias individuales y el promedio ponderado de las lluvias 1990 y 2002 y la lluvia de noviembre de 2005.

La composición isotópica de las aguas señala su origen meteórico. Las aguas subterráneas y las superficiales se ubican sobre una línea de evaporación con origen en la recta meteórica. Sin embargo no todas las muestras responden a un patrón de evaporación (Figura 21) y esto probablemente se deba a la acción de varios procesos conjuntos, tales como: infiltración selectiva, evaporación previa, infiltración directa a través de canales preferenciales en el karst que no alteran

la composición isotópica de la lluvia original y mecanismos de mezcla. El tiempo de permanencia del agua de lluvia en la superficie del suelo depende de la permeabilidad de los materiales superficiales. Si es elevada, la infiltración es rápida y la composición isotópica del agua que percola puede ser idéntica o muy similar a la de las lluvias.

En caso contrario se produce evaporación previa y el agua infiltrada es isotópicamente enriquecida. En el caso de esta región, se construyeron, aprovechando las propiedades de la roca caliza, 2 presas (Ejército Rebelde y Paso Sequito), con el objetivo principal de la recarga del acuífero, favoreciendo los procesos de evaporación. Las bajas concentraciones en el contenido de ^3H , responden a los mismos fenómenos, principalmente todos aquellos que modifican el tiempo de tránsito.

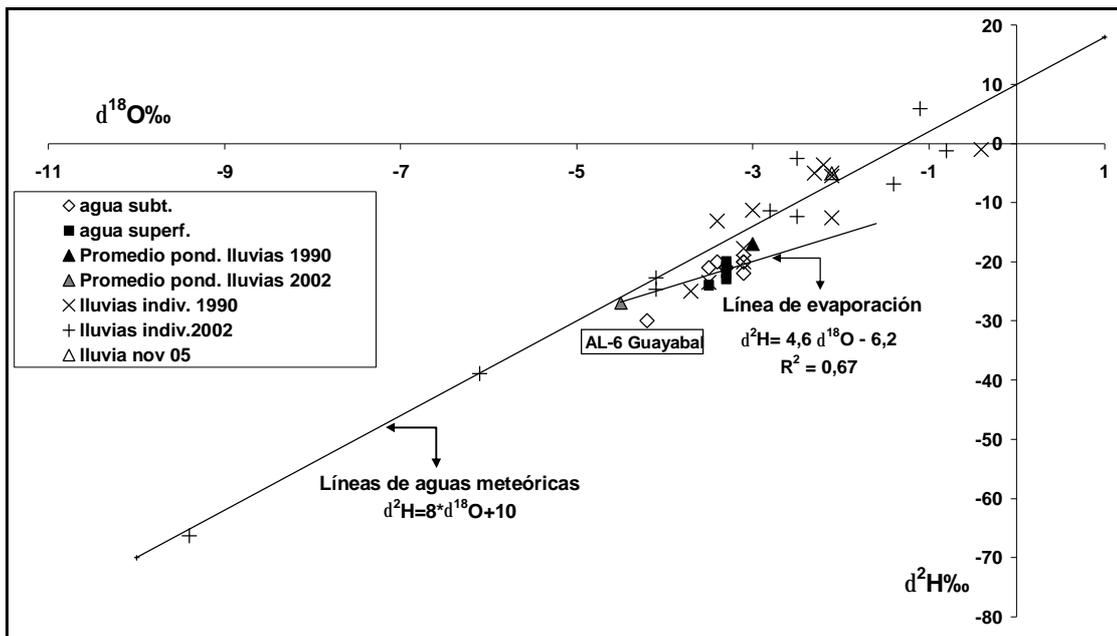


Fig. 21. $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, líneas de aguas meteóricas mundial, lluvias individuales 1990 y 2002, promedio ponderado lluvias 1990 y 2002, lluvia noviembre 2005 y muestras analizadas.

Por otro lado, la muestra 11 (AL-6 Guayabal) tiene una composición isotópica más empobrecida, sugiriendo distintas alternativas como infiltración selectiva o recarga en otra zona.

Un mayor tiempo de registro de la composición isotópica (^2H y ^{18}O) de las precipitaciones y muestreos periódicos del agua subterránea permitirán ajustar las hipótesis sobre los mecanismos de la recarga y los tiempos de tránsito del agua subterránea.

Conclusiones del Resultado 4

1. El modelo empleado muestra que el sistema recibe recarga fresca anualmente, pero no en todo el acuífero, o sea, la alimentación y renovación de las reservas de agua subterránea no siempre se producen dentro del año, sino en plazos más largos.
2. En el acuífero, existe una buena mezcla de aguas, confirmando que las aguas recargadas arriban al punto de muestreo de manera diferenciada, unas primero que otras pero sin seguir un estricto orden cronológico.
3. El punto de descarga principal de todo el sistema de flujo de la Cuenca (Tasa Vento), muestra registros que evidencian escasos eventos de recarga, evidenciándose una sobreexplotación del acuífero en el punto actual de su principal extracción de agua.
4. Se evidencia que las aguas de las Presa Ejercito Rebelde corresponden a aguas subterráneas, o al menos a una mezcla en que predomina esta agua sobre las superficiales, constituyendo esta presa un punto de pérdida de agua de la Cuenca por evaporación y no un punto de alimentación del acuífero.
5. Las zonas de recarga menos activas están relacionadas con el área de influencia de los puntos 1, 2, 3, y 6 (la Taza de Vento), siendo estas zonas las de mayor vulnerabilidad a la explotación del recurso hídrico.
6. Una fuerte actividad de recarga natural se identifica asociada al sistema drenado hacia los puntos 7, 10 y 11 los que deben ser protegidos adecuadamente por constituir áreas de alimentación de acuífero rápidas y muy efectivas. Por los mismos motivos son zonas en extremo vulnerables a la contaminación, lo que incrementa la importancia de su adecuada protección.
7. Los estudios empleando isótopos estables corroboraron los resultados obtenidos con la técnica del tritio, demostrándose que la composición isotópica de las aguas señala su origen meteórico.
8. Se demostró que las aguas de las presas Paso Sequito y Ejército Rebelde favorecen los procesos de evaporación previa, lo cual se corresponde con los bajos contenidos de ^3H , encontrados en esta agua, los cuales responden a los mismos fenómenos, principalmente todos aquellos que modifican el tiempo de tránsito.
9. En el punto 11, se evidenció una composición isotópica más empobrecida, sugiriendo una infiltración selectiva o recarga en otra zona. Estos resultados se corresponden con los obtenidos mediante la hiroquímica y los estudios empleando el tritio como trazador.

APORTE CIENTÍFICO Y SOCIAL

El trabajo presentado presenta aporte científico y social, sin dejar de mencionar su indirecto, pero muy importante impacto económico.

El aporte científico se refiere al empleo de una herramienta novedosa en el país. Es la segunda ocasión en que se emplean las técnicas nucleares de manera eficaz para resolver los problemas ambientales, en particular la gestión sostenible de los recursos hídricos de una de las Cuencas hidrográficas más importantes del país y la más importante de la capital. Se emplea una técnica no invasiva en la investigación, se hace uso de los isótopos del agua (radiactivo y estables) para caracterizar tanto el líquido como el medio que lo hospeda. El trabajo permitió además, esclarecer un grupo de incertidumbres, de orden geológico e hidrogeológico que existían sobre la Cuenca (incertidumbres imposibles de determinar con el uso de técnicas tradicionales), las cuales hacen cambiar conceptos en el modo de explotar el acuífero, permitiendo una optimización en la toma de decisiones a las Empresas e Instituciones responsables de trazar las estrategias de extracción de este preciado recurso.

El aporte social radica en la contribución a mejorar la calidad de vida de la población. Se crea una herramienta muy útil para la toma de decisiones de diferentes empresas encaminadas al saneamiento de las aguas y la gestión sostenible de los recursos hídricos. Es importante también mencionar que, al demostrar que existen fuentes contaminantes que están afectando la calidad de las aguas, se pueden concentrar los esfuerzos de la comunidad y el estado con el objetivo de lograr una conciencia general de protección ambiental.

CONCLUSIONES FUNDAMENTALES GENERALES

1. Los pozos que se mantienen de la red actual son el HV-645, HV-28, HV-19, HV-29, AL-3, AL-4, AL-5, AL-6 y el AL-7. Por el análisis de los espectro de varianzas se llega a la conclusión de que la frecuencia de muestreo de los pozos en la Cuenca no debe mantenerse como hasta ahora lo realiza la Empresa de Aprovechamiento hidráulico de la Ciudad de la Habana, sino variar en la forma siguiente:

HV-28 mensual; HV-19 mensual; AL-5 mensual; AL-6 mensual; AL-7 mensual; AL-3 mensual; AL-4 semestral; HV-19 Mensual; HV-645 Mensual; Limnígrafo de la Taza diario

La Red de Monitoreo de Tritio tuvo la siguiente estructura.

Tipo	Estación	Frecuencia	Contenido
Aguas de lluvia	Pluviómetro Estación “La Quebrada” CPHR	Mensual	Tritio
Aguas de descarga del sistema acuífero	Taza de Vento	Mensual	Caudales, niveles, pH, Conductividad eléctrica específica, macrocomponentes, propiedades físico-químicas y concentraciones de Tritio
Aguas subterráneas	HV-28 HV-19 AL-5 AL-6 AL-7 AL-3 AL-4 HV-19 HV-645	Mensual	Caudales, niveles, pH, Conductividad eléctrica específica, macrocomponentes, propiedades físico-químicas y concentraciones de Tritio
Pozo de abasto del acueducto de Paso Seco		Mensual	Caudales, niveles, pH, Conductividad eléctrica específica, macrocomponentes, propiedades físico-químicas y concentraciones de Tritio
Aguas superficiales	Aguas superficiales en la Presa Ejército Rebelde	Mensual	Caudales, niveles, pH, Conductividad eléctrica específica, macrocomponentes, propiedades físico-químicas y concentraciones de Tritio

2. El estudio geo-matemático y estadístico realizado se comparó con los resultados del modelo matemático AQUIMPE que se encuentra actualmente en calibración en la Delegación de la Ciudad Habana, llegándose a precisiones con respecto a los pozos necesarios para el trazado de hidroisohipsas. En tal sentido, se observa la necesidad de incluir pozos al norte y al sur de la Cuenca, por lo que se sugiere incluir los pozos HV-290, HV-88A, HV-11A y HV-7a en la red de monitoreo con frecuencia semestral.

3. Se seleccionan los modelos de computo que más se ajustan a las condiciones reales que rigen la simulación en cada caso particular del objeto de estudio y las consideraciones generales y necesarias a tener en cuenta durante el proceso de modelación. Se obtiene la base teórica de las herramientas necesarias a utilizar en la modelación computarizada de los eventos existentes en el objeto de estudio, mostrando toda la literatura necesaria y utilizada tanto para todas las etapas del análisis (etapa de identificación y/o selección de modelos de computo, etapas de cálculo e interpretación para la obtención de los resultados finales).
4. El modelo empleado muestra que el sistema recibe recarga fresca anualmente, pero no en todo el acuífero, o sea, la alimentación y renovación de las reservas de agua subterránea no siempre se producen dentro del año, sino en plazos más largos.
5. El punto de descarga principal de todo el sistema de flujo de la Cuenca (Tasa Vento), muestra registros que evidencian escasos eventos de recarga, evidenciándose una sobre-explotación del acuífero en el punto actual del su principal extracción de agua.
6. Se evidencia que las aguas de las Presa Ejercito Rebelde corresponden a aguas subterráneas, o al menos a una mezcla en que predomina esta agua sobre las superficiales, constituyendo esta presa un punto de pérdida de agua de la Cuenca por evaporación y no un punto de alimentación del acuífero. La gran interrelación existente entre las aguas de la Presa (superficial) y los puntos de muestreo de agua subterránea más cercano (puntos 7 y 8), evidencian la conexión directa entre estas. Se demuestra que la Presa Ejercito Rebelde, juega un papel relevante como foco de alimentación de aguas no limpias a la Cuenca.
7. Las zonas de recarga menos activas están relacionadas con el área de influencia de los puntos 1, 2, 3, y 6 (la Taza de Vento), siendo estas zonas las de mayor vulnerabilidad a la explotación del recurso hídrico.
8. Una fuerte actividad de recarga natural se identifica asociada al sistema drenado hacia los puntos 7, 10 y 11 los que deben ser protegidos adecuadamente por constituir áreas de alimentación de acuífero rápidas y muy efectivas. Por los mismos motivos son zonas en extremo vulnerables a la contaminación, lo que incrementa la importancia de su adecuada protección.
9. Se entrega un resultado que tiene un impacto social relevante, puesto que el mismo permite la toma de decisiones por parte de la empresa gestora de los recursos hídricos de Ciudad de la Habana, encaminada al manejo sostenible de los recursos hídricos de la principal fuente de abasto de agua de la ciudad, repercutiendo en una mejor distribución del agua a la población y con mejor calidad. Además, el resultado contribuye a trazar políticas concretas, dirigidas al saneamiento de las aguas subterráneas de esta cuenca con el menor gasto de recursos.

RECOMENDACIONES

- 1- Deben realizarse estudios de detalle, en aquellos puntos señalados como anómalos, de acuerdo al comportamiento de sus macrocomponentes químicos (aniones, cationes y SST) y parámetros físico químicos (CE, pH), haciendo énfasis en el análisis de otros parámetros de calidad de agua (metales pesados, nitritos, nitratos, STD, DBO, DQO, etc.).
- 2- Se recomienda el uso de las técnicas nucleares como herramienta eficaz en la evaluación de la gestión optimizada y sostenible de los recursos hídricos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arellano Acosta, D.M., R. Feitoo, K.P. Seiler, W. Stichler, W. Rauert. Estudio isotópico de la Llanura Costera Sur, Pinar del Río. Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina, IAEA TECDOC-502, Austria:229-243. 1989.
2. Arellano Acosta, M.; L.F. Molerio León & A. Surí Hijos. ¿Efecto de Altitud del ^{18}O en la Zona de Articulación de Llanura Criptocársica con Carso de Montaña?. GTICEK. Taller Internac. sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Publ. Universitat Jaume I de Castelló,:29-42. 1992.
3. Arellano, D.M.; L.F. Molerio León & A. Santos Sanamé. Dinámica del Flujo Regional en el Macizo Metamórfico de la Isla de la Juventud. In/ Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 1994, IAEA TECDOC-835, Viena, :175-194. 1993.
4. Arellano Acosta, Daniela M.; B. Degournay; J. Gutiérrez Díaz; L.F. Molerio León; O. Ascanio & A. Santos. Isotope Hydrogeochemistry in the Study of Saline Aquifers. Case of Study-Isle of Youth, Cuba. Symp. Isotope Tech. in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere, IAEA, Vienna, Paper IAEASM- 329/27P,:514-516. 1993
5. Adar, E.M., Neuman, S.P. The use of environmental tracers (isotopes and hydrochemistry) for quantification of natural recharge and flow components in arid basins. Proc. 5th International Symposium on Underground Tracing, Athens, Greece: 235-253. 1986.
6. Adar, E.M., Neuman, S.P., Woolhiser, D.A. Estimation of spatial recharge distribution using environmental isotopes and hydrochemical data. I. Mathematical model and application to synthetic data. J. Hydrol., Vol. 97: 251-277. 1988.
7. Adar, E.M., Neuman, S.P., Estimation of spatial recharge distribution using environmental isotopes and hydrochemical data. II. Application to Aravaipa Valley in Southern Arizona, USA. J. Hydrol., Vol. 97: 297-302. 1988.
8. Adar, E. Sorek, S. Multi-compartmental modelling for aquifer parameter estimation using natural tracers in non-steady flow. Advances in Water Resources, Vol. 12: 84-89. 1989.
9. Adar, E., Sorek, S. Numerical method for aquifer parameter estimation utilizing environmental tracers in a transient flow system. MODEL CARE 90. Proc. Intern. Conf. on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, The Hague, Holland, K. Kover, (ed.), IAHS Publ. No. 195: 135-148. 1990.
10. Adar, E.M.. Quantitative evaluation of flow systems, groundwater recharge and transmissivities using environmental tracers. Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrology. IAEA-TECDOC-910, IAEA, Vienna: 113-154. 1996.
11. Andersen, L.J., and Sevel, T. Six years' environmental ^3H profiles in the unsaturated and saturated zones. Isotope Techniques in Groundwater Hydrology 1974. IAEA, Vienna:3-20. 1974.
12. Anderson, M.P., Woessner, W.W. Applied Groundwater Modelling. Academic Press, San Diego: 381 pp. 1992.
13. Andrew Porteous. Dictionary of environmental science and Technology. Second Edition. England. 1996.
14. Arias, M.E. Evaluación del acuífero de Jaco, Cantón de Garabito, Provincia de Puntarenas, Costa Rica. 74 págs. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (informe interno). 1997.
15. Ballagas Flores, B., L.F. Molerio León. Programa para el transporte de radionucleidos en aguas subterráneas (ERAS 2.0). VII Jor. Cient. Inst. Geof. Astron., Dic. 20-21, La Habana, :35. 1999.
16. Bajracharya, K., Bary, D.A. Note on common mixing cell models. J. Hydrol., Vol. 153: 189-214. 1994.

17. Behaviour of Tritium in the Environment, San Francisco, USA, 711 pp. (STI/PUB/498) ISBN 92-0-020079-6. 16-20 October 1978.
18. Beilin, B.V. Sobre las investigaciones hidrogeológicas para el estudio de la fuente de abasto a la Ciudad de La Habana-Acueducto El Gato. Arch. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. C. Habana, s/p. 1984.
19. Benischke, R., H. Zojer, P. Fritz, P. Maloszewski, W. Stichler. Environmental and artificial tracer studies in an alpine karst massiff (Austria). IAH 21st. Congr. Karst hydrogeology and karst environmental protection, Guilin, China: 938-947. 1988.
20. Bredehoeft, J.D., Konikow, L.F. Ground-water models: Validate or invalidate. Ground Water 31 (2): 178-179. 1993.
21. Campana, M.E. Finite-state models of transport phenomena in hydrologic systems. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, pp. 252. 1975.
22. Campana, M.E., Simpson, E.S. Groundwater residence times and recharge rates using a discrete state compartment model and C-14 data. J. Hydrol., Vol. 72: 171-185. 1984.
23. Campana, M.E., Mahin, D.A.,. Model-derived estimates of groundwater mean ages, recharge rates, effective porosities and storage in a limestone aquifer. J. Hydrol., Vol.76: 247-264. 1985.
24. Campana, M.E. Generation of ground-water age distributions. Ground Water, Vol. 25, No. 1: 51-58. 1987.
25. Campana, M.E., Byer, R.M. A conceptual evaluation of regional groundwater flow, southern Nevada-California, USA. Environmental and Engineering Geoscience Vol. II, No. 4: 465-478. 1996.
26. Celle-Jeanton, H., L. Gourcy, P. Aggarwal. Reconstruction of Tritium Time Series in Precipitation. IAEA, 1: 2000.
27. CENHICA-CPHR. Certificaciones técnicas del laboratorio del Centro Nacional de Hidrología y Calidad de las aguas. 2003-2004.
28. Clark, I.D. , P. Fritz. Environmental Isotopes in Hydrogeology. ISBN 1-56670-249-6 Lewis Publ., Boca – Raton, New York, 328: 1997.
29. Colectivo de Autores. Informe del estudio de la Cuenca hidrográfica Almendares-Vento. Consejo de la Cuenca Almendares-Vento. 2001.
30. Coplen, T.B. Uses of Environmental Isotopes, in Regional Ground Water Quality. Chap. 10 (Alley, W.A., Ed.), Van Nostrand Reinhold, New York: 227-254. 1993.
31. Dinçer, T., Davis, G.H. Application of environmental isotope tracers to modelling in hydrology. J. Hydrology 68: 95-113. 1984.
32. Doney, S.C., D.M. Glover, W.J. Jenkins. A model function of the Global Bomb- Tritium Distribution in Precipitation., Jour. Geophys. Res. 97 No. C4, :5481-5492. 1992.
33. Dooge, J.C.I. The routing of groundwater recharge through typical elements of linear storage. Publ. 52, General Assembly of Helsinki, Intern. Assn. of Sci. Hydrology, 2: 286-300. 1960.
34. Dooge, J.C.I., Linear theory of hydrologic systems. Technical Bulletin 1468, U.S. Dept. of Agriculture, pp 327. 1973.
35. E. Mazor. Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology – The applied approach. ISBN 0-8247-9803-1. Marcel Dekker Inc. 1998.
36. Environmental Isotope Data no.1–10: World Survey of Isotope Concentration in Precipitation, Data from network of IAEA and WMO over period 1953-1991, published 1969-1994.
37. Eriksson, E. The possible use of tritium for estimating groundwater storage. Tellus 10: 472-478. 1958.
38. F. Gasse Ch.Causse. Hydrology and Isotope Geochemistry. ISBN 2-7099-1377-1. Editions de l'Orstom, Paris. 1998.
39. Gardner, R.P., and Ely, R.I.. Radioisotope Measurement Applications in Engineering, Reinhold, New York, N.Y. 1967.

40. González Báez, A., K.P. Seiler, W. Stichler, W. Rauert. Estudio mediante isótopos ambientales del origen de las aguas subterráneas y de la intrusión salina en la parte central de la Cuenca Sur de Matanzas, Cuba. Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina, IAEA TECDOC-502, Austria:245-258. 1989.
41. Grabczak J., Zuber, A., Małozzewski, P., Róžański, K., Weiss, W., and Śliwka, I.,. New mathematical models for the interpretation of environmental tracers in groundwaters and the combined use of tritium, C-14, Kr-85, He-3 and freon-11 methods. Beitr. Geol. Schweiz. – Hydrologie 28: 395-405. 1982.
42. Grabczak J., Małozzewski, P., Róžański, K., and Zuber, A. Estimation of the tritium input function with the aid of stable isotopes. Catena 11: 105-114. 1984.
43. Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology, by Working Group IAEA, Vienna, 439 pp. (STI/DOC/10/91/2). 1983.
44. Hem, J. Studying and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Geol. Surv. Water Supply Paper 1473, 363. 1970.
45. Herman, A., B. Finke, M. Schöniger, P. Malozzewski, W. Stichler. The environmental tracer approach as a tool for hydrological evaluation and regionalization of catchment systems. Regionalization in Hydrology, Proc. Ljubljana Symp. IAHS, Publ. 191:45-58. 1990.
46. Interpretación de análisis de aguas. 2003. http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Interpretación.html
47. Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology, Proc. Adv. Group Meeting, Vienna, 27-31 January 1975, IAEA, Vienna, 230 pp. (STI/PUB/429) ISBN 92-0-141076-X. 1976.
48. Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, Vienna, , IAEA, Vienna, 2 volumes: 504 and 500 pp. (STI/PUB/373) (out of print). 11-15 March 1974.
49. Isotope Hydrology, Vienna, , IAEA, Vienna, (in co-operation with UNESCO), 873 pp. (STI/PUB/650) ISBN 92-0-040084-1. 12-16 September 1983.
50. Isotope Techniques in Water Resources Development, Vienna, IAEA, Vienna, (in co-operation with UNESCO), 815 pp. (STI/PUB/757) ISBN 92-0-040087-6. 1987. 30 March-3 April 1987.
51. Isotope Techniques in the Study of the Hydrology of Fractured and Fissured Rocks, Proc. Adv. Group Meeting, Vienna, 17-21 November 1986, IAEA, Vienna, 306 pp. (STI/PUB/790). 1989.
52. Isotope Techniques in Water Resources Development, Vienna, 11-15 March 1991, IAEA, Vienna, (in co-operation with UNESCO), 790 pp. (STI/PUB/875) ISBN 92-0-000192-0. 1992.
53. Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere, Vienna, IAEA, Vienna, 624 pp. (STI/PUB/908) ISBN 92-0-103293-5. 19-23 April 1993
54. Isotopes in Water Resources Management (in 2 volumes), IAEA, Vienna, IAEA, Vienna, 2 volumes: 530 and 463 pp. (STI/PUB/970) ISBN 92-0-105595-1 and 92-0-100796-5. 20-24 March 1995
55. Isotope Techniques in the Study of Environmental Change, Vienna, , IAEA, Vienna, 932 pp. (STI/PUB/1024) ISBN 92-0-100598-9. 14-18 April 1997.
56. Isotope Techniques in Water Resources Development and Management, 10-14 May 1999, IAEA, Vienna, CD-Rom (IAEA-CSP-2/C) ISSN 1562-4153.
57. Johnson, T.M., Depaolo, D.J. Interpretation of isotopic data in groundwater-rock systems, Model development and application to Sr isotope data from Yucca Mountain. Water Resources Res. 30 (5): 1571-1587. 1994.
58. José L. Peralta Vital, Reinaldo G. Castillo, Leslie M. Leon, Manuel Pin, Dennys L. Bombuse. “Caracterización del acuífero cársico de la Cuenca de Vento utilizando técnicas nucleares. Propuesta de medidas para su mejor explotación”. Agencia de Energía Nuclear y ciencias de avanzadas (AENTA). CITMA. 2004.

59. Kaufmann, S., W.F. Libby The natural distribution of Tritium. *Phys. Rev.*, 93:1337-1344.1954.
60. Kirk, S.T., Campana, M.E.,. A deuterium-calibrated groundwater flow model of a regional carbonate-alluvial system. *J. Hydrol.*, Vol. 119: 357-388. 1990.
61. Konikow, L.F., and Bredehoeft, J.D.,. Ground-water models cannot be validated. *Adv. Water Resource*. 15: 47-62. 1992.
62. Kreft, A., and Zuber, A. On the physical meaning of the dispersion equation and its solutions for different initial and boundary conditions. *Chem. Eng. Sci.* 33: 1471-1480. 1978.
63. Levenspiel, O., 1972. *Chemical Engineering*. Elsevier, Amsterdam.
64. Lohman, S.W. et al. *Definitions of Selected Ground-Water Terms – Revisions and Conceptual Refinements*. US Geol. Surv. Pap. 1988: 21 pp. 1972.
65. Małoszewski, P., and Zuber, A. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, I. Models and their applicability. *J. Hydrol.* 57: 207-231. 1982.
66. Maloszewski, P., W. Rauert, W. Stichler, A. Herrmann. Application of flow models in an alpine catchment area using tritium and deuterium data. *Jour.Hydrol.* 66: 319-330. 1983.
67. Maloszewski, P., A. Zuber. Mathematical modeling of tracer behaviour in short term experiments in fissured rocks. *Water Resource. Res.* 26(7): 1517-1528. 1990.
68. Maloszewski, P., A. Zuber. Influence of matrix diffusion and exchange reactions on radiocarbon ages in fissured carbonate aquifers. *Water Resour.Res.* 27(8):1937- 1945. 1991.
69. Maloszewski, P., A. Zuber. On the calibration and validation of mathematical models for the interpretation of tracer analysis in groundwater. *Adv. Water Resour.* 15:47-62. 1992.
70. Maloszewski, P. Mathematical modeling of tracer transport in different aquifers: results from ATH test fields. *Proc. 6th. Internatl.Symp. Water Tracing, Karlsruhe, Ger., A.A. Balhema, Rotterdam: 25-30. 1992.*
71. Małoszewski, P., and Zuber, A. Principles and practice of calibration and validation of mathematical models for the interpretation of tracer experiments in groundwater. *Adv. Water Resour.* 16: 173-190. 1993.
72. Małoszewski, P., and Zuber, A. Lumped parameter models for interpretation of environmental tracer data. *Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrogeology, IAEA: 9-58. 1996.*
73. Maloszewski, P., A. Zuber. *Manual of lumped parameter models used for the interpretation of environmental tracer data in groundwaters*. Inédito. GSF-Institute of Hydrology, Nehuerberg. 2004.
74. Maloszewski, P., W. Stichler, A. Zuber Interpretation of environmental tracers in groundwater systems with stagnant water zones. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 40 (1);21-33. 2004.
75. Mandeville, A.N., O'Donnell, T. Introduction of time variance to linear conceptual catchment models. *Water Resources Res.*, Vol. 9, No. 2: 298-310. 1973.
76. *Manual on Mathematical Models in Hydrogeology, IAEA, Vienna, 107 pp. (TECDOC-910). 1996.*
77. McDonald, M.G., Harbauch, A.W.. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. *Techniques of Water Resources Investigations of the U.S.Geol. Surv.*, Book 6, Ch. A1: pp 586. 1988.
78. Molerio León, Leslie F. Aplicación del método de recesión al estudio hidrodinámico de las fuentes del río Mayabeque. *Simposium XXXV. Aniversario Sociedad Espeleológica. Cuba, La Habana 67. 1975.*
79. Molerio León, Leslie F. y M. G. Guerra Oliva Notas sobre la problemática hidrogeológica de la porción oriental del polje Jaruco-Aguacate, provincias Habana y Matanzas. *Arch.Instituto Nacional Recursos Hidráulicos. La Habana 60. 1981.*

80. Molerio León, Leslie F. Inducción artificial de la respuesta jerarquizada de los espacios acuíferos en el carso. Jornada Científico-Técnica. Sociedad Cubana de Geología. La Habana 35. 1988.
81. Molerio León, Leslie F. Hidrogeología y recursos explotables del Acueducto El Gato. Arch. Instituto Nacional de Recursos Hidrogeología. La Habana 180. 1990.
82. Molerio León, Leslie F., D. Arellano, A. Surí, A. Santos. Dinámica de las aguas subterráneas en la cuenca Jaruco-Aguacate. ARCAL XIII-RLA/8/14. Primera Reunión de Responsables de los Estudios de los Recursos y la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Inst. Pesquisas Hidr., Univ. Fed. Río Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil: 13-15. 1990.
83. Molerio León, Leslie F. Investigaciones hidrogeológicas en cuencas representativas del Occidente de Cuba. Arch. Instituto Nacional Recursos Hidráulicos. La Habana 200. 1991.
84. Molerio León, Leslie F.. Composición Química e Isotópica de las Aguas de Lluvia de Cuba. II Cong. Espel. Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba, :20-21. 1992.
85. Molerio León, L.F.; P. Maloszewski; M.G. Guerra Oliva; O. A. Regalado; D. M. Arellano Acosta; C. March Delgado & K. del Rosario. Dinámica del Flujo Regional en el Sistema Cársico Jaruco-Aguacate, Cuba. In/ Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 1994, IAEA TECDOC-835, Viena, :139-174. 1993.
86. Molerio León, L.F. Geostadística. Notas de Clase. Primer Curso Internacional de Agua Subterránea y Medio Ambiente, Ciudad de La Habana, 59. 1997.
87. Molerio León, L.F. & Y. Portuondo López. Técnicas Geomatemáticas Aplicadas en Hidrogeología. Notas de Clase. CENHICA, Inst. Nacional de Recursos Hidráulicos. Circ.restr. 69. 1997.
88. Molerio León, L.F., K. Del Rosario, J.C. Torres. Mathematical modeling of tritium and deuterium behavior in a tropical karstic coastal aquifer. Internatl. Conf. On Tracers and Modeling in Hydrogeology. 2000.
89. Molerio León, L.F., K. del Rosario, J.C. Torres Rodríguez, E. Rocamora Alvarez, M.G. Guerra Oliva. Factores de control de la composición química e isotópica de las aguas subterráneas en la región Varadero-Cárdenas, Matanzas, Cuba. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana, XXIII (2):36-46. 2002.
90. Molerio León, L.F., P. Maloszewski, M.G. Guerra Oliva, D.M. Arellano, K. del Rosario. Hidrodinámica isotópica de los sistemas acuíferos Jaruco y Aguacate, Cuba. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana, XXIII (2):3-9. 2002.
91. Morales Juberías, T. Estudio Hidrogeológico de la Zona Norte de Vizcaya. Tesis. Univ. País Vasco., Leioa, 505. 1991.
92. Norma Cubana, NC 93-02. Higiene Comunal. Agua potable. Requisitos sanitarios y muestreo. 1985.
93. NEA (Nuclear Energy Agency). The International Hydrocoin Project, Level 2: Model Validation, Paris. 1990
94. Oreskes N., Shrader-Frechette, K., Belitz, K.,. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. Science 263: 641-646. 1994.
95. Peralta Vital José Luis, Gil Castillo Reinaldo, Leyva Bombuse Dennys. Notas de campo sobre el muestreo del agua subterránea en los puntos seleccionados. CPHR. 2003-2004.
96. Piñera Caso, J., L.F. Molerio León, C. March Delgado. Análisis de un modelo estadístico para la regionalización de las transmisividades en un polje. Col. Internac. Hidrología Cársica de la Región del Caribe. UNESCO. La Habana: 303-321. 1982.
97. Rao, B., Hathaway, D.,. A three-dimensional mixing-cell solute transport model and its application. Ground Water, Vol. 27, No. 4: 509-516. 1989.

98. Seiler, K.P., P. Maloszewski, H. Behrens. Results on hydrodynamic dispersion in the karstified aquifer of the Upper Jura of Frankonian Alb, FR Germany. Proc. Internatl. Symp. Contaminant transport in groundwater, Stuttgart, Balhema, Rotterdam: 83-87. 1989.
99. SENARA. Normativa Costarricense vigente sobre aguas, superficiales y subterráneas, Departamento Legal, Costa Rica. 1995.
100. SENARA. Archivo Nacional de Pozos, Hoja topográfica Herradura, escala 1: 50000, Área de Aguas Subterráneas. Costa Rica. 1997.
101. Schmidt, E. Reevaluación de los recursos de explotación de los pozos del Acueducto El Gato, cuenca Jaruco-Aguacate. Arch. Instituto Nacional Recursos Hidrológicos. La Habana 30. 1979.
102. Simpson, E.S., Duckstein, L.. Finite-state mixing-cell models. In Karst Hydrology and Water Resources, Vol. 2, V. Yevjevich (ed.). Water Resources Publications, Ft. Collins, CO.: 489-512. 1976.
103. Stable Isotope Hydrology Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle, (J.R.Gat and R.Gonfiantini eds.), Monograph by Working Group, IAEA, 340 pp. (STI/DOC/10/210). Vienna, 1981.
104. Van Ommen, H.C.The “mixing-cell” concept applied to transport of non-reactive and reactive components in soils and groundwater. J. Hydrol., Vol. 78: 201-213. 1985.
105. Waterloo hydrogeology INC.. AQUACHEM software, V-4 for windows. 2003.
106. Weiss, W., W. Roether. The rates of Tritium input to the World Ocean. Earth Plante. Sci.Lett., 49, 435-446. 1980.
107. W.Kaess. Tracing in Hydrogeology. ISBN 3-443-01013-X (1998). Balkema. 1999.
108. Yurtsever, Y., Payne, B.R. A digital simulation approach for a tracer case in hydrological system (multi-compartmental mathematical model). Proc. Intern. Conf. on Finite Elements in Water Resources, London. 1978.
109. Yurtsever, Y., Payne, B.R., Time-variant linear compartmental model approach to study flow dynamics of a karstic groundwater system by the aid of environmental tritium (a case study of south-eastern karst area in Turkey). Proc. Symp. on Karst Water Resources, Ankara-Antalya, IAHS Pub. No. 161: 545-561. July 1985.
110. Yurtsever, Y., Payne, B.R. Mathematical models based on compartmental simulation approach for quantitative interpretation of tracer data in hydrological systems. Proc. 5th Intern. Symp. on Underground Water Tracing, Inst. Geol. and Min. Explor., Athens, Greece: 341-353. 1986.
111. Zheng, C., Bennett, G.D. Applied Contaminant Transport Modelling: Theory and Practice. Van Nostrand Reinhold: pp 440. 1995.
112. Zuber, A.,. Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater systems. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 2, Part B (Eds. P. Fritz and J.Ch. Fontes), Elsevier, Amsterdam: 1-59. 1986.
113. Zuber, A., Małoszewski, P., Stichler, W., and Herrmann, A.,. Tracer relations in variable flow. 5th International Symposium on Underground Water Tracing. Institute of Geology and Mineral Exploration (IGME), Athens: 45-57. 1986.
114. Zuber A., Grabczak, J., and Garlicki, A. Catastrophic and dangerous inflows to salt mines in Poland as related to the origin of water determined by isotope methods. Environm. Geol. 39(3-4): 299-311. 2000.