

Fluorímetro GGUN-FL24 para estudios hidrogeológicos con el empleo de trazadores

Rosa María Valcarce Ortega¹, Dianelis Acevedo Ferraz², Pablo Armando Topes Rojas³ y Willy Roberto Rodríguez Miranda⁴

¹ *Ingeniera Geofísica. Doctora en Ciencias Técnicas. Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», CUJAE, Calle 114, No. 11901 entre Ciclo Vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. Correo electrónico: rosy@tesla.cujae.edu.cu.*

² *Ingeniera Geofísica. Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», CUJAE, Calle 114, No. 11901 entre Ciclo Vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. Correo electrónico: dacevedo@gmail.com.*

³ *Ingeniero Geofísico. Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», CUJAE, Calle 114, No. 11901 entre Ciclo Vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. Correo electrónico: pablo.topes@gmail.com.*

⁴ *Ingeniero Geofísico. Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», CUJAE, Calle 114, No. 11901 entre Ciclo Vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. Correo electrónico: willy@civil.cujae.edu.cu.*

RESUMEN

Las sustancias fluorescentes se emplean en investigaciones hidrogeológicas con gran efectividad desde épocas remotas. Se utilizan como trazadores que se inyectan a flujos de agua superficiales o subterráneas y controlando su movimiento espacial y la variación de su concentración en el tiempo, es posible dar solución a importantes tareas hidrogeológicas, tales como: determinar la velocidad del movimiento del agua en ríos y lagos, explicar las características de las zonas de recarga de los acuíferos, definir el origen y dinámica de la intrusión salina en acuíferos costeros, cartografiar los conductos cársticos interconectados y la velocidad del flujo del agua subterránea en su interior, esclarecer las direcciones principales del flujo del agua subterránea, etc. El fluorímetro GGUN-FL24 es un equipo que permite realizar mediciones continuas de caudal y velocidad de las aguas subterráneas empleando trazado-

res químicos fluorescentes. En este trabajo se presentan las características generales del fluorímetro GGUN-FL24, su calibración y puesta en funcionamiento en condiciones de laboratorio. Para ello fueron medidos los valores de caudal de agua con el empleo del método volumétrico y el fluorímetro con las sustancias fluorescentes uranina y aminoácido G. Estos resultados fueron contrastados con la aplicación de pruebas estadísticas no paramétricas de igualdad de medias, también se aplicó el análisis de regresión lineal entre los caudales medidos. Se verificó que los valores de caudal obtenidos por el método volumétrico y midiendo con el fluorímetro, son iguales, para una probabilidad del 95 %. Se verificó también que para un 95 % de probabilidad existe correlación lineal estable entre los caudales medidos por los diferentes métodos empleados. Estos resultados permitieron comprobar el correcto funcionamiento del fluorímetro GGUN-FL24 y

demonstrar su poder resolutivo para caracterizar la dinámica de las aguas subterráneas y por tanto, la factibilidad de su empleo en las investigaciones hidrogeológicas.

Palabras clave: fluorímetro, fluorescencia, trazadores en hidrogeología, uranina, aminoácido G, caudal del agua subterránea, velocidad del agua subterránea.

ABSTRACT

Fluorescent substances have been used in hydrogeological research with great effectiveness since ancient times. They are used as tracers that are injected into surface or underground water flows, and by controlling their spatial movement and the variation of their concentration over time, it is possible to solve important hydrogeological tasks, such as: determining the speed of water movement in rivers and lakes, explain the characteristics of aquifer recharge zones, define the origin and dynamics of saline intrusion into coastal aquifers, map interconnected karst ducts and the speed of groundwater flow within them, clarify the main directions groundwater flow etc. The GGUN-FL24 fluorimeter is a device that allows continuous measurements of flow and velocity of groundwater using fluorescent chemical tracers. This work presents the general characteristics of the GGUN-FL24 fluorimeter, its calibration and commissioning under laboratory conditions. For this, the water flow values were measured using the volumetric method and using the fluorimeter with the fluorescent substances uranine and amino acid G. These results were contrasted by applying non-parametric statistical tests of equality of means, the linear regression analysis was also applied between the flows rates measured. It was possible to verify that the flow values obtained by the volumetric method and measuring with the fluorimeter are the same, for a probability of 95 %. It was also verified that for a 95 % probability there is a stable linear correlation between the flow rates measured by the different methods used. These results allowed verifying the correct operation of the GGUN-FL24 fluorimeter and demonstrating its resolving power to characterize the dynamics of

groundwater, and therefore the feasibility of its use in hydrogeological investigations.

Keywords: fluorimeter, fluorescence, tracers in hydrogeology, uranine, amino acid G, groundwater flow, groundwater velocity.

RESUMO

Substâncias fluorescentes têm sido utilizadas em pesquisas hidrogeológicas com grande eficácia desde os tempos antigos. São usados como traçadores que são injetados nos fluxos de água superficial ou subterránea e, controlando seu movimento espacial e a variação de sua concentração ao longo do tempo, é possível resolver importantes tarefas hidrogeológicas, tais como: determinar a velocidade do movimento da água em rios e lagos, explicar as características das zonas de recarga de aquíferos, definir a origem e dinâmica da intrusão salina nos aquíferos costeiros, mapear dutos cársticos interconectados e a velocidade do fluxo das águas subterráneas dentro deles, esclarecer as principais direções fluxo de águas subterráneas etc. O fluorímetro GGUN-FL24 é um dispositivo que permite medições contínuas do fluxo e velocidade das águas subterráneas usando traçadores químicos fluorescentes. Este trabalho apresenta as características gerais do fluorímetro GGUN-FL24, sua calibração e comissionamento em condições de laboratório. Para isso, os valores do fluxo de água foram medidos pelo método volumétrico e pelo fluorímetro com as substâncias fluorescentes uranina e aminoácido G. Esses resultados foram contrastados com a aplicação de testes estatísticos não paramétricos de igualdade de médias, a análise de regressão linear também foi aplicada entre as vazões medidas. Foi possível verificar que os valores de vazão obtidos pelo método volumétrico e medidos com o fluorímetro são os mesmos, para uma probabilidade de 95 %. Também foi verificado que, para uma probabilidade de 95 %, existe uma correlação linear estável entre as vazões medidas pelos diferentes métodos utilizados. Esses resultados permitiram verificar o correto funcionamento do fluorímetro GGUN-FL24 e demonstrar seu poder de resolução para caracterizar a dinâmica das águas sub-

terrâneas e, portanto, a viabilidade de seu uso em investigações hidrogeológicas.

Palavras-chave: fluorímetro, fluorescência, traçadores em hidrogeologia, uranina, aminoácido G, fluxo de águas subterrâneas, velocidade das águas subterrâneas.

INTRODUCCIÓN

El fluorímetro de campo de nombre comercial GGUN-FL24, es un equipo que permite determinar el caudal y velocidad del agua en movimiento en un pozo midiendo la variación en el tiempo de la concentración del colorante químico inyectado en el agua, utilizando la fluorescencia como propiedad básica. En la actualidad, como resultado de un proyecto de colaboración entre la Universidad de Neuchatel de Suiza y el Departamento de Geociencias de la Facultad de Ingeniería Civil de la CUJAE, se dispondrá de este equipo para desarrollar investigaciones en el campo de la hidrogeología en Cuba.

Las sustancias fluorescentes emiten luz de forma inmediata a partir de la irradiación de una fuente externa y la emisión cesa cuando cesa ese estímulo. La secuencia instantánea de eventos durante la fluorescencia es: absorción de energía de una fuente externa como el sol o una lámpara, excitación de algunos de los electrones de la sustancia fluorescente, (provocando que algunos pasen a órbitas de mayor energía) y emisión de energía en forma de fotones (luz) al tiempo que los electrones excitados regresan a su posición normal. Las sustancias fuertemente fluorescentes convierten un alto por ciento de la energía absorbida en energía emitida y precisamente, los colorantes usados como trazadores son fuertemente fluorescentes por lo que serán detectados con facilidad en pequeñas concentraciones (Wilson *et al.*, 1986).

Existen diferentes combinaciones de excitación y emisión espectral para cada sustancia fluorescente, al estudiar el espectro de la fluorescencia se hacen mediciones fluorométricas de alta precisión (fluorometría espectral).

Son varios los factores que afectan la fluorescencia, siendo el más importante, la concentración del

colorante. Además de la concentración, el factor significativo que afecta la fluorescencia de la solución diluida es la temperatura. La fluorescencia se incrementa (provocando altas lecturas del fluorímetro) cuando la temperatura disminuye. El efecto de esta debe ser considerado en el análisis de las mediciones y por ello se han desarrollado curvas de corrección por temperatura para diferentes trazadores colorantes (Wilson *et al.* 1986). El pH de la muestra también afecta la intensidad de la fluorescencia. La disminución de la fluorescencia, debido a variación en el pH por lo general no es un serio problema en los estudios hidrogeológicos, excepto en corrientes fuertemente ácidas donde la recuperación aparente del colorante es muy pequeña.

La fluorescencia será afectada por el *quenching* que es la luz fluorescente emitida y que es absorbida por otras moléculas, fenómeno que se produce por la acción de otras sustancias químicas en la solución. El cloro, por ejemplo, es conocido que apaga, extingue la fluorescencia de la rodamina. Por esta razón no debe ser usada agua con cloro para preparar soluciones estándar. El *quenching* provoca uno o todos los efectos siguientes: absorción de la luz excitante, absorción de la luz emitida por el colorante, disminución de la relación energía de la luz excitante – energía de la luz emitida.

Una reducción permanente en la fluorescencia será provocada por la desintegración fotoquímica o fotodescomposición del colorante. La luz del sol tiene este efecto sobre algunos colorantes fluorescentes y el efecto se incrementa con el tiempo. Este efecto es significativo para aplicaciones que requieren un alto por ciento de recuperación del colorante, o donde esté expuesto a la luz del sol por varios días (Wilson *et al.*, 1986).

El uso de trazadores químicos colorantes en el ámbito de la hidrogeología es una técnica muy antigua y una herramienta eficaz para la gestión y la protección de los recursos hídricos y del medio ambiente. La aplicación de estos trazadores en estudios hidrogeológicos ha permitido profundizar en: el conocimiento del origen de las infiltraciones de aguas salinas en acuíferos de agua dulce, las consecuencias de la deforestación

sobre las aguas subterráneas, la evaluación de la sobreexplotación de agua subterránea para consumo humano, la estimación de los recursos de aguas subterráneas y el riesgo de contaminación. Algunos ejemplos de aplicación de pruebas con trazadores colorantes fluorescentes se presentan a continuación.

En un ensayo de trazadores empleando uranina, investigadores de la universidad de Almería, España, lograron determinar el tiempo de residencia del agua de mar desde que penetra el acuífero hasta que es captada por el bombeo. El estudio se desarrolló en el acuífero detrítico costero ubicado en el delta del río Andarax (Sola *et al.*, 2011). En el año 2013, Bikse y colaboradores reportaron los resultados de pruebas con trazadores inyectando 500 g de uranina en el río Lecava. Instalando el fluorímetro GGUN-FL24 en pozos de monitoreo, pudieron conocer la existencia de conductos cársticos interconectados presentes en el área y estimar la velocidad del flujo del agua subterránea (Bikase *et al.*, 2013).

El empleo de trazadores fluorescentes contribuyó a aclarar los contactos hidrogeológicos entre sistemas acuíferos cársticos y fisurados en la parte central de Italia, así como a esclarecer las direcciones principales del flujo del agua subterránea. Los resultados mostraron que la mayor parte del flujo de agua subterránea sigue la dirección de los ejes de las estructuras tectónicas y también confirmaron la influencia de la carstificación en la recarga de los acuíferos, permitiendo una caracterización más detallada de la circulación del agua en la zona no saturada, información muy importante para evaluar la vulnerabilidad de los mantos y de los acuíferos (Aquilanti *et al.*, 2016). También en la cuenca cárstica ubicada en el límite entre Eslovenia e Italia se reportan numerosas investigaciones hidrogeológicas con el empleo de trazadores fluorescentes desde la década de los años 60, del pasado siglo hasta la actualidad. La mayoría de estas pruebas han permitido conocer las características del flujo principal del agua subterránea en grandes conductos cársticos. En años recientes se han realizado pruebas inyectando trazadores en varios puntos de esta cuenca para diferentes condiciones hidrogeológicas y los re-

sultados aportaron nuevas informaciones en las zonas menos investigadas, permitiendo una mejor comprensión de los modos de recarga del acuífero y la influencia de la heterogeneidad de la estructura del acuífero sobre las características del flujo del agua subterránea y del transporte de solutos (Patrick y Kogovsek, 2016).

Schnegg y Flynn (2001), refieren que empleando el fluorímetro GGUN-FL 24 para medir los cambios de concentración del trazador con el tiempo a lo largo de un pozo, es posible identificar zonas preferenciales del flujo de agua subterránea y evaluar la variabilidad de la conductividad hidráulica con la profundidad. Esta técnica será aplicada en pozos de inyección y en pozos de observación. La metodología consiste en inyectar en el pozo de radio r_o , un trazador colorante de concentración inicial C_o , que disminuirá con el tiempo Δt , hasta una concentración C , debido a la afluencia de agua subterránea al pozo, lo cual se relaciona con la velocidad aparente del flujo de agua subterránea V_f mediante la **Ecuación 1**.

$$V_f = \frac{\pi r_o}{2\Delta t} \ln\left(\frac{C}{C_o}\right) \quad (1)$$

Este enfoque es similar al uso de sal como trazador, comúnmente usado en investigaciones hidrogeológicas en Cuba, pero el fluorímetro es capaz de detectar trazadores a concentraciones mucho menores que el método de concentración de sal y lo que es más importante, evaluar la dinámica del agua subterránea por debajo de la intrusión salina en acuíferos abiertos.

En Cuba, son muy escasas las investigaciones hidrogeológicas empleando colorantes químicos como trazadores para evaluar el caudal y la velocidad de las aguas subterráneas. Según la bibliografía revisada solo se reportan investigaciones de Molerio, que utilizando estos trazadores, identificó la conexión entre zonas de carga y descarga en la Gran Caverna de Santo Tomás (Molerio, 2004).

Características generales y principio de funcionamiento del fluorímetro GGUN-FL24

Un fluorímetro es un instrumento que indica una me-

didada relativa de intensidad de la luz emitida por una muestra que contiene una sustancia fluorescente; la intensidad de la luz fluorescente es proporcional a la concentración de sustancia fluorescente presente. Cada fluorímetro es diferente y será calibrado de modo individual. En la **Figura 1** se aprecia el fluorímetro GGUN-FL24.



Figura 1. Fluorímetro GGUN-FL 24: sonda de medición, caja registradora, cables de conexión y frascos con los dos trazadores (uranina y aminoácido G).

Cualquier fluorímetro en su estructura interna presenta seis componentes básicas y en general se utilizará de forma simultánea hasta tres trazadores diferentes y convenientemente seleccionados (Wilson *et al.*, 1986). Las seis componentes básicas son (**Figura 2**):

- (1) Fuente de energía.
- (2) Filtro primario (pasa solo la banda seleccionada del espectro de la fuente que corresponde con la banda espectral de excitación de los colorantes seleccionados).
- (3) Recipiente de muestra (el ángulo recto en la trayectoria de la luz minimiza la cantidad de luz dispersada alcanzada por el dispositivo detector).
- (4) Filtro secundario (pasa solo una banda seleccionada del espectro de emisión del colorante y no la luz que pasa por el filtro primario).
- (5) Dispositivo detector (responde a la banda es-

- pectral que deja pasar el filtro secundario).
- (6) Dispositivo de lectura (entrega un valor proporcional a la luz que incide en el dispositivo detector).

El GGUN-FL24 es un fluorímetro de filtro y su sistema de medición consiste en: una sección de excitación que contiene una fuente de luz cuasi monocromática, un filtro y un lente condensador y una sección de detección orientada 90° con respecto al haz de excitación, con un lente, un filtro y un foto-detector (Schneegg, 2002).

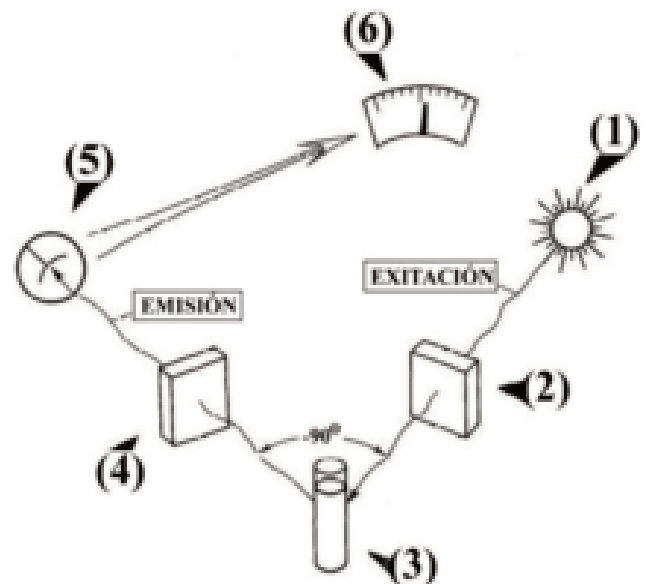


Figura 2. Estructura básica de la mayoría de los fluorímetros de filtros (Wilson *et al.*, 1986).

La fluorescencia se mide en un ángulo de 90° en relación a la luz de excitación. Esta geometría se utiliza a fin de evitar la interferencia de la luz de excitación transmitida. El agua a analizar fluye en el interior de la celda óptica del fluorímetro. El sistema óptico está compuesto por cuatro lámparas, tres se dedican a medir las concentraciones de colorantes y una cuarta a medir la turbidez del agua. También está compuesto por tres fotodiodos montados sobre 4 ejes perpendiculares dispuestos en 2 niveles (**Figura 3**). Cada eje está equipado con filtros y lentes de excitación y detección (Schneegg, 2002).

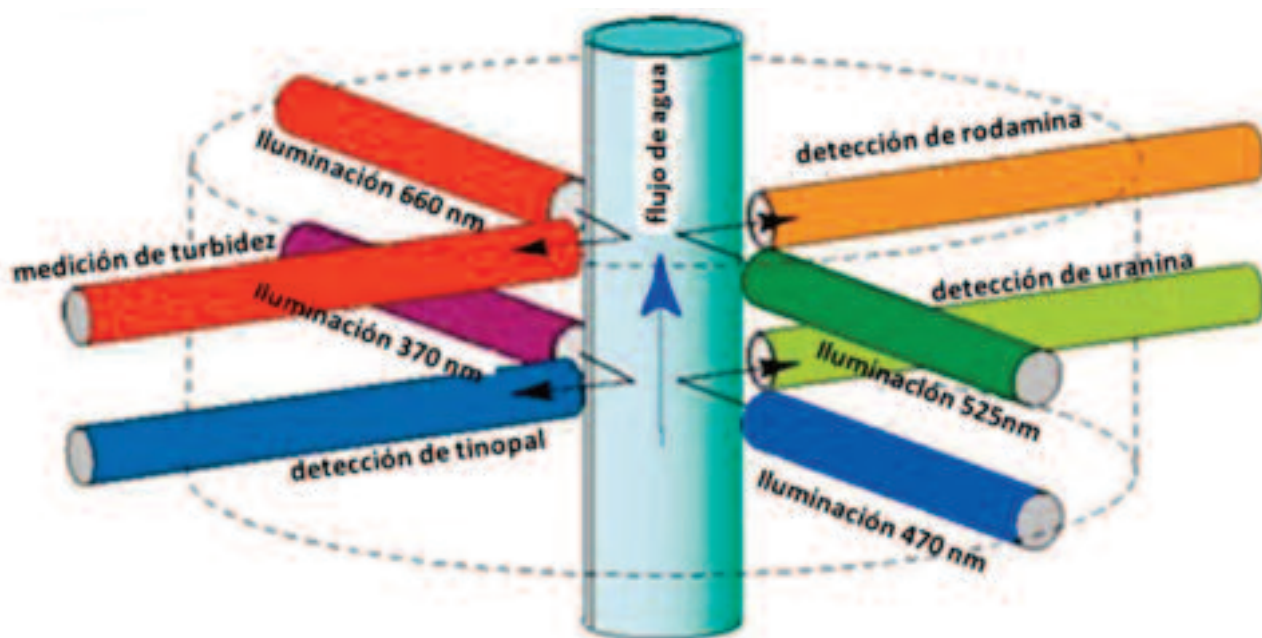


Figura 3. Disposición de las lámparas en el interior del fluorímetro GGUN-FL24 (Schneegg, 2002).

Las fuentes de luz son seleccionadas de acuerdo con los espectros de absorción-emisión de los trazadores. Esta geometría permite la instalación de hasta cuatro sistemas de medición en dos niveles. Uno de los conjuntos se dedica a la medición de la turbidez del agua mientras que los otros tres se utilizan para medir las concentraciones de colorante. La fuente de luz con los máximos espectrales en 370, 470 y 525 nm están acomodados de forma ideal para la excitación de colorantes como: tinopal, uranina y cualquier molécula de la familia de la rodamina (amidorodamina G, sulforodamina B y rodamina WT) respectivamente (Schneegg, 2002). El objetivo de la lámpara y del filtro de selección es obtener la mayor sensibilidad para detectar el colorante sin sacrificar la selectividad, que no es más que la capacidad de aislar una parte de la fluorescencia espectral de la interferencia potencial del fondo fluorescente (Wilson *et al.*, 1986).

El fluorímetro GGUN-FL24, consta de dos elementos unidos por un cable: el sensor o sonda de medición (en su interior están las lámparas y es por donde pasa el agua que se analiza) y la caja registradora o «*datalogger*» (que almacena los datos en una Tarjeta Compact Flash TCF, o se conecta a una PC me-

dante un cable RS232, para realizar y grabar las lecturas de las mediciones).

La sonda del fluorímetro contiene un conversor analógico-digital para transformar las señales en modo unipolar de 24 bits. Este dispositivo contiene una o dos baterías de plomo selladas y el circuito necesario para el registro de datos. Entre las especificaciones técnicas del Fluorímetro GGUN-FL24 se destaca: que los trazadores que detecta, son trazadores de las clases I / II / III, (I: uranina, piranina, eosina; II: amidorodamina G, sulforodamina B, rodamina WT; III: Tinopal CBS-X, CBS-CL, ácido amino-G, amoníaco); que puede trabajar para turbidez del agua entre 0.02–100 NTU; registra temperaturas mayores de 2 °C con una precisión de 0.1 °C; el límite de detección de la uranina es de 2×10^{-11} g/ml y para otros colorantes (ejemplo: rodamina WT, tinopal, etc.), tiene una sensibilidad de 8 a 10 veces menor; el intervalo de medición es a partir de 5 segundos; presenta una fuente de alimentación de 6 volts; la sonda se conecta a la caja registradora a través de un cable de 4 alambres con 2 conectores a prueba de agua y alcanza una profundidad de inmersión de 70 m; el peso de la sonda es de 2 kg y el peso de la caja registradora con dos baterías es de 6.4 kg (Schneegg, 2009).

El equipo consta del programa FLUO como herramienta de calibración, adquisición y procesamiento de los datos.

Calibración del Fluorímetro

Las lecturas del fluorímetro son valores relativos de intensidad de fluorescencia. Para convertir lecturas a concentraciones de una sustancia fluorescente es necesario calibrar el fluorímetro usando soluciones de concentraciones conocidas, típicamente en unidades de ppb o $\mu\text{g/l}$. Una calibración es la forma simple la relación entre la lectura del fluorímetro y las concentraciones del colorante (Wilson *et al.*, 1986).

Se recomienda calibrar el Fluorímetro de 2 a 3 veces al año, o cuando se vaya a utilizar un nuevo conjunto de trazadores. Además, para la calibración se utilizará la misma agua donde serán realizadas las mediciones o agua destilada.

Utilizando el programa FLUO como herramienta de calibración se crea un nuevo archivo de calibración (Calibrat. New.). El programa FLUO da la opción de calibrar hasta tres trazadores por separados. En este trabajo fue calibrado para agua destilada y para los trazadores uranina y aminoácido G en una concentración de 100 ppb. De modo inicial, la sonda es inmersa en un recipiente con agua destilada y se deja midiendo durante aproximadamente 10 minutos, luego se vierte el primer trazador y se toman lecturas de forma aproximada durante 5 minutos. Más tarde se enjuaga el recipiente y la sonda del fluorímetro con agua destilada para calibrar el segundo trazador. Cuando se tiene solo un trazador en solución se asume una respuesta lineal del fluorímetro y por lo tanto, su calibración necesitará solo una concentración (100 ppb).

La sensibilidad relativa del fluorímetro GGUN-FL24 para diferentes colorantes es similar a un espectrofotómetro de laboratorio. La uranina es la molécula más sensible y es detectada a concentraciones de aproximadamente 8 veces menos que otros colorantes. La variación de concentración más baja a la que puede ser detectada dicho colorante (en aguas claras) es de 0.02 ppb, mientras que para otros trazadores son de 0.14 a 0.2 ppb.

En el proceso de calibración del equipo se necesita medir y corregir el efecto que provoca la turbidez del agua en la fluorescencia, o asumir la corrección propuesta por el fabricante. La turbidez del agua es provocada por la materia insoluble, en suspensión o dispersión coloidal. Es un fenómeno óptico que consiste de forma esencial en una absorción de luz combinado con un proceso de difusión. La experiencia práctica indica, que, con frecuencia, es necesario medir la turbidez del agua, ya que altera la medición debido a dos efectos principales: la reducción de la luz de excitación y la fluorescencia a través de la absorción por partículas en suspensión y la dispersión de la luz de excitación hacia el detector (Schnegg y Nathalie, 1997).

Para eliminar los efectos de la turbidez, el fluorímetro será calibrado con diferentes suspensiones turbias, típicamente 1, 10 y 100 NTU. No obstante, el equipo está calibrado por el fabricante. Tener en cuenta que la relación entre la señal óptica y la turbidez es lineal en el espacio *log-log* (Schnegg, 2002).

Prueba de funcionamiento del fluorímetro en condiciones de laboratorio

Las pruebas para la puesta en funcionamiento del Fluorímetro GGUN-FL24 se realizaron en el laboratorio del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la Facultad de Ingeniería Civil de la CUJAE, empleando su canal de fluidos, que está constituido por paredes de vidrio, con una sección rectangular de 75 cm de ancho, 52 cm de alto y aproximadamente 5 m de largo. Este canal funciona por recirculación del agua almacenada en la cisterna del laboratorio y el rango de caudales alcanzará un valor máximo aproximado de 8 l/s.

Para diferentes caudales se realizaron mediciones con el fluorímetro GGUN-FL24, las que fueron procesadas con el programa FLUO empleando en cada caso dos colorantes como trazadores: uranina y aminoácido G, El objetivo fue comparar los caudales obtenidos con el fluorímetro y los caudales obtenidos con el método volumétrico.

El caudal Q se define como el volumen de agua V , que pasa por una sección transversal en un determinado tiempo t (**Ecuación 2**), es decir:

$$V_f = \frac{\pi r_o^2}{2\Delta t} \ln\left(\frac{C}{C_o}\right) \quad (2)$$

Entonces, para medir el caudal en un sistema hidráulico, se mide de forma directa el volumen que entrega el sistema en un recipiente en la unidad de tiempo medido con un cronómetro. Este método volumétrico es el más recomendable, sin embargo, a veces es difícil de aplicar, solo resulta útil para caudales pequeños y donde las características físicas lo permitan.

En la **Figura 4** se esquematiza el canal de fluidos que está constituido en lo básico por un canal de sección rectangular con paredes transparentes (1) por el que se hace circular agua. El agua es tomada del depósito de almacenamiento que en este caso es una cisterna (2) mediante una bomba hidráulica (3) y, por medio de la tubería (4) es conducida al tanque sumidero (5), tras lo cual circula por el canal, que descarga en el depósito de captación (6) para luego pasar a la tubería de desagüe (7).

La **Figura 5** muestra el canal de fluidos del laboratorio del CIH. En este canal se determina el caudal a través del método volumétrico.

Para definir la cantidad de trazador a inyectar (masa del trazador) existen muchas fórmulas empíricas,

una de las más usadas es la fórmula de Martel (**Ecuación 3**), que establece (Colectivo de Autores, 2012):

$$P = L * Q \quad (3)$$

donde P es el peso del trazador a inyectar [kg], L es la distancia en línea recta desde el punto de inyección hasta la surgencia más cercana [km] y Q el caudal en la surgencia con más caudal [m³/s].

Teniendo en cuenta las condiciones de medición se aplicó la **Ecuación 3** y se estimó que la masa del trazador a inyectar debía ser de 0.025 g. El procedimiento de medición en el laboratorio es expuesto a continuación:

- 1) Disponer de agua en la cisterna del laboratorio.
- 2) Conectar la sonda de medición y la caja registradora mediante el cable de conexión.
- 3) Colocar la sonda del fluorímetro en un extremo del canal de fluidos, asegurándose que el orificio de entrada del detector esté bien cubierto de agua para su correcto funcionamiento.
- 4) Disponer de deflectores de corriente u obstáculos en el canal de fluidos, a cierta distancia uno del otro, para lograr una buena mezcla del trazador con el agua.

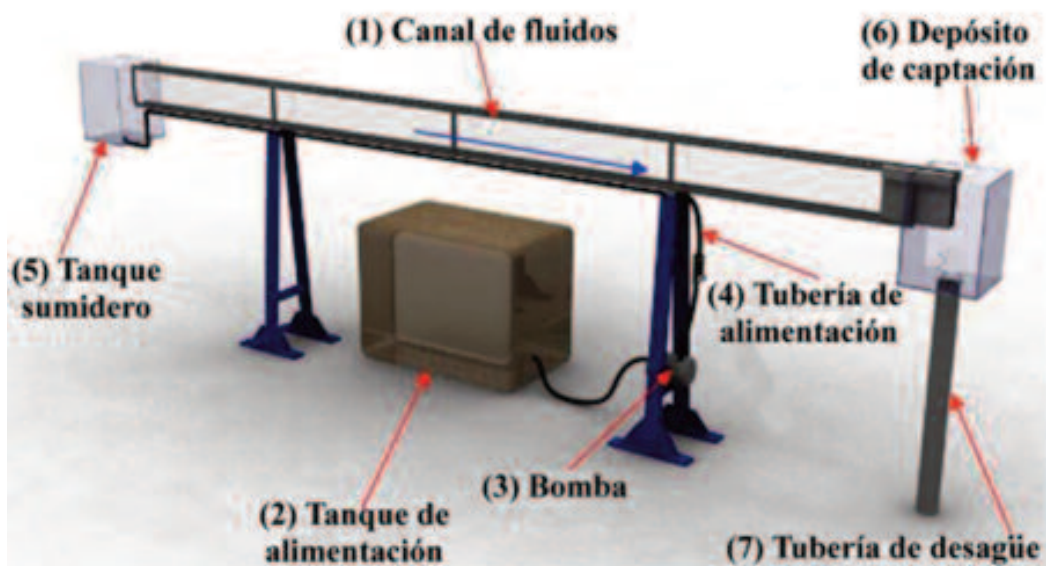


Figura 4. Montaje y disposición del canal de fluidos (Tabare, *et al.*, 2009).



Figura 5. Canal de fluidos del laboratorio del CIH, Facultad de Ingeniería Civil, CUJAE.

- 5) Dejar circular agua por el canal durante un tiempo de aproximadamente 10min, antes de encender la caja registradora o *datalogger*.
- 6) En la caja registradora (o *datalogger*) seleccionar SR=0, que es el módulo que permite estar conectado a una computadora de forma directa, para un tiempo de medición de 10 s (**Figura 6**).
- 7) Ingresar al programa FLUO y seleccionar Urarina, Aminoácido G y turbidez.
- 8) Una vez encendido el *datalogger*, pulsar en *new acquisition* (nueva adquisición de datos), de forma que el programa FLUO comience a registrar y graficar los datos de concentración y turbidez cada 10 s.
- 9) Una vez que se alcanza una señal base estable, en un extremo del canal de fluidos se realiza la inyección puntual (o sea, de una sola vez) de 0.025 g del trazador urarina, procedimiento que se repite para el otro trazador, es decir para el aminoácido G (**Figura 7**).
- 10) Observar las variaciones de concentración del trazador y el desarrollo de la gráfica que aparece en la computadora.
- 11) Al descender la concentración de los trazadores hasta la línea base, pulsar stop en el programa, luego pulsar el botón *Process mV* y abrir el archivo con los datos registrados. Seleccionar solo el trazador del que se desea visualizar su curva, para después colocar la cruz roja en el punto en el que inicia el ascenso brusco de la curva y la cruz amarilla en el punto en el que finaliza la misma.
- 12) Hacer doble *click* sobre la cruz amarilla, especificar al programa la cantidad de trazador inyectado en gramos (masa). Presionar *enter* y leer el valor del caudal en l/s que el programa ofrece (**Figura 8**).

El caudal se obtiene a partir de la **Ecuación 4**:

$$Q = \frac{A}{\int_a^{\infty} c(t) dt} \quad (4)$$

donde Q es el caudal, A es la masa del trazador y c(t) es la concentración medida con el fluorímetro.



Figura 6. Vista del «datalogger» mostrando los controles para la selección del ritmo de muestreo (SR y de las cuatros lámparas (1-4).



Figura 7. Canal de fluido donde se vierte el trazador a un extremo. Se observa el movimiento del trazador dentro del canal de fluido y la sonda de medición del fluorímetro sumergida en el agua.

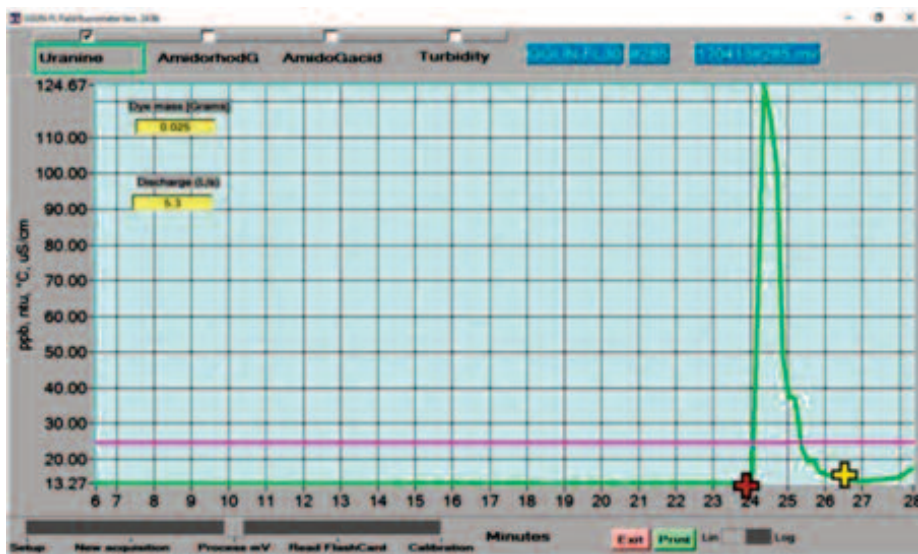


Figura 8. Curva de concentraciones del trazador (verde) y de temperatura (línea paralela al eje de abscisas) visualizadas en el programa FLUO.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados de las medidas de caudal por el método volumétrico y empleando el fluorímetro, obtenidos a partir del ensayo realizado en el laboratorio, se recogen en la **Tabla 1**.

Para validar el correcto funcionamiento del fluorímetro, fueron aplicadas técnicas estadísticas con el objetivo de verificar si existen o no diferencias significativas entre las mediciones del caudal al emplear el método volumétrico y también el fluorímetro. Las técnicas empleadas fueron: prueba de hipótesis no paramétrica para verificar igualdad de media de dos muestras (Prueba Wilcoxon-Mann-Whitney), prueba de hipótesis no paramétrica para verificar igualdad de medias poblacionales de un grupo de muestras (Criterio no paramétrico de Kruskal-Wallis) y análisis de correlación entre las variables medidas.

La prueba Wilcoxon-Mann-Whitney arrojó que los valores medios del caudal determinado por el método volumétrico y empleando el fluorímetro son iguales, con una probabilidad del 95 %.

La prueba Kruskal-Wallis se empleó para determinar si existían o no igualdad de medias poblacionales entre los valores de caudales determinados por el método volumétrico, utilizando uranina y el aminoácido G. Se obtuvo que los valores medios del caudal determinado por el método volumétrico y midiendo con el fluorímetro, usando uranina y aminoácido G, son iguales, para una probabilidad del 95 %.

Para finalizar, fue estudiada la correlación estadística entre el caudal medido por los diferentes métodos. Para ello fue empleado el coeficiente de correlación de Pearson y se verificó la hipótesis de existencia de correlación lineal.

Tabla1. Valores de caudal medidos por el método volumétrico y empleando el fluorímetro

QVolumétrica [l/s]	QFluorímetro [l/s]	
	QUranina [l/s]	QAmino Ácido G [l/s]
3	2.2	3.3
3	2.4	2.9
3	2.4	3.1
3	2.6	3.8
3.8	3.8	3.6
4.6	3.9	5.6
4.9	3.1	5.5
4.9	3.8	4.2
4.9	4.9	4.6
5.8	5.7	7.1
5.8	5.6	7
5.8	5.7	7
6	5.1	6.8
6.1	5.4	6.5
6.3	5.3	6.1
6.3	5.3	6.2

La **Figura 9**, muestra el análisis de regresión entre los valores de caudal obtenidos con el fluorímetro y obtenidos con el método volumétrico. Se presenta también para cada caso la ecuación de regresión lineal, el coeficiente de correlación lineal calculado (R) y su intervalo de confianza para una probabilidad del 95 %. En todos los casos se verificó que existe correlación lineal entre las variables y que esta correlación es estable para un 95 % de probabilidad. También se aprecia que la ecuación de regresión lineal presenta, en todos los casos, pendiente cercana a la unidad e intercepto cercano a cero, lo que ratifica que los resultados obtenidos son estadísticamente iguales independientes del método empleado.

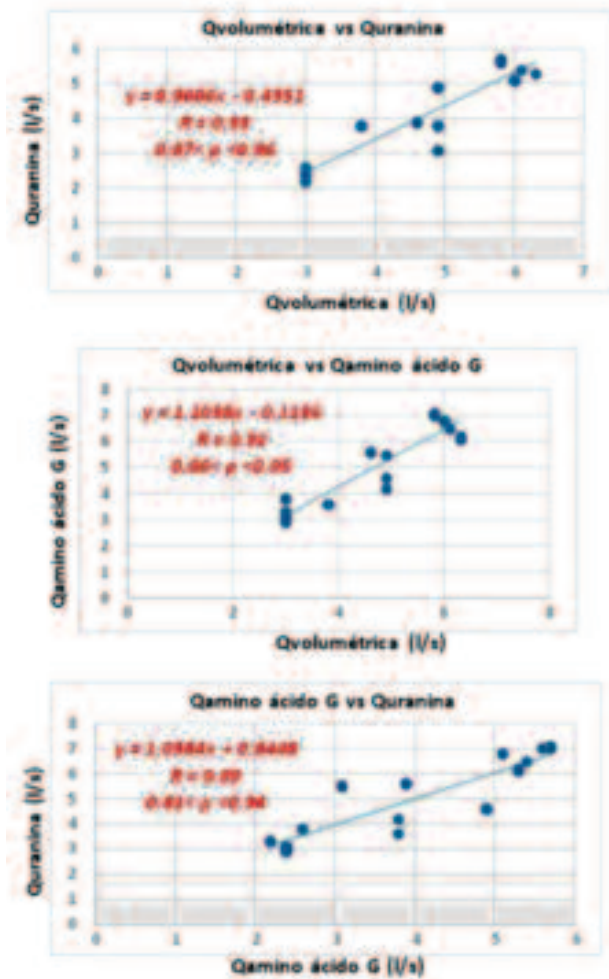


Figura 9. Análisis de regresión y correlación estadística entre los valores de caudal obtenidos con el fluorímetro y con el método volumétrico.

CONCLUSIONES

El trabajo realizado permitió conocer las características generales y el principio de funcionamiento del Fluorímetro GGUN-FL24, su calibración y validación en condiciones de laboratorio, demostrando que el equipo se encuentra en adecuadas condiciones para su introducción en las investigaciones hidrogeológicas en Cuba, aunque debe verificarse su funcionamiento para caudales superiores a 6 l/s.

La sencillez del montaje del equipo y su versatilidad de operación con el apoyo del programa FLUO, hacen que el empleo de trazadores fluorescentes sea un método alternativo válido, rápido y práctico para el estudio de la dinámica de las aguas subterráneas y la determinación de las propiedades hidrogeológicas de los acuíferos.

Se recomienda desarrollar un proyecto de investigación conjunto entre el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y el Departamento de Geociencias de la CUJAE, con el objetivo de validar el funcionamiento del Fluorímetro GGUN-FL24 en condiciones de campo y generalizar la introducción de trazadores fluorescentes en estudios hidrogeológicos en Cuba. De igual manera se recomienda organizar seminarios y talleres para preparar a los especialistas en el uso de este método y de este equipamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la dirección del Centro de Investigaciones Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Civil de la CUJAE, por facilitar sus instalaciones para el desarrollo de esta investigación. Sin este apoyo no hubiera sido posible obtener los resultados presentados.

REFERENCIAS

- Aquilanti, L.; Clementi, F.; Nanni, T.; Palpacelli, S.; Tazioli, A.; Vivalda, P.,** 2016, «DNA and fluorescein tracer tests to study the recharge, groundwater flow path and hydraulic contact of aquifers in the Umbria-Marche limestone ridge (central Apennines, Italy)». *Environmental Earth Science*, 2016, vol. 75, num 626, pp.1-17.

- Bikse, J., A. Babre, A. Delina Y K. Popovs.** 2013, «Analysis of multicomponent groundwater flow in karst aquifer by cfc, tritium, tracer test and modelling, case study at Skaistka vicinity, Latvia». University of Latvia, Faculty of Geography and Earth Sciences.
- Colectivo de Autores,** 2012, «Ensayos de Trazador». Unión de Espeólogos Vascos. pp. 204.
- Molerio, L.,** 2004, «El enlace absorción – descarga de la Gran Caverna de Santo Tomás: evidencias derivadas de un ensayo con trazadores artificiales». *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol., XXV, núm 3, pp. 22-26
- Petrick, M.; Kogovsek, J.,** 2016, «Identifying the characteristics of groundwater flow in the Classical Karst area (Slovenia/Italy) by means of tracer tests». *Environmental Earth Science*, vol. 75, núm 1446, pp. 1-13.
- Schnegg, P.-A.,** 2002, «An inexpensive field Fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement». *Groundwater and Human Development*, University of Neuchatel, Switzerland., pp: 1484-1488.
- Schnegg, P.-A.,** 2009, Manual del Usuario, Fluorímetro GGUN–FL. University of Neuchatel, Switzerland, 30 pp.
- Schnegg, P.-A., y D. Nathalie,** 1997, An inexpensive flow-through field fluorometer. 6th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media.
- Schnegg, P.-A., R. Flynn,** 2001, Online field fluorometers for hydrogeological tracer tests. University of Neuchâtel, Switzerland. 2001, pp: 29-36.
- Sola, F., A. Vallejos, F. Diez, J. Juárez, M. Fernández y J. López,** 2011, «Estimación del tiempo de tránsito en un acuífero detrítico costero sometido a bombeo, delta del río Andarax (Almería)». *GEOGACETA*, vol. 50, núm 1, p. 11-21.
- Tabare, J., A. Gonzáles, R. Miranda Y R. Rodolfo,** 2009, Determinación de caudal en un canal abierto didáctico, utilizando trazador fluorescente. Universidad Nacional de Asunción. Técnicas Nucleares-Ingeniería Química. pp. 9.
- Wilson, J., E. Cobb y A. Frederick,** 1986, Fluorometric Procedures for dye tracing. En: eds. Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey. pp. 44.
- Fue: recibido
corregido
aprobado

