

Hacia un Monitoreo In-situ de Calidad de Agua Subterránea: Revisión de Parámetros

Liz Báez^a, Juan Pablo Nogués^{a,b}, and Cynthia Villalba^a

^aFacultad Politécnica Universidad Nacional de Asunción.

^b Facultad de Ciencias de la Ingeniería Universidad Paraguayo Alemana.
San Lorenzo, Paraguay.

`lizbaezl@gmail.com, juan.nogues@upa.edu.py, cvillalba@pol.una.py`

Resumen Este trabajo revisa los parámetros de calidad de agua subterránea, así como los mecanismos e instrumentos que permiten el monitoreo in-situ. A su vez, lista sus posibles causas y efectos en la salud. Los mecanismos considerados fueron las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) y el Monitoreo Ciudadano (MC). Los resultados muestran que, utilizando instrumentos como sensores, test de colorimetría y medidores digitales, será posible realizar el monitoreo in-situ del 65% de los parámetros considerados. Entre ellos se encuentran contaminantes cuya ingesta genera efectos nocivos en la salud. Sin embargo, otros, como el antimonio, bario y uranio no pueden ser monitoreados utilizando los instrumentos mencionados. Al final, se incluye una estimación de costos de instrumentos de medición necesarios para implementar el monitoreo in-situ en un escenario específico. Se espera que la revisión ayude en la selección de mecanismos, instrumentos y parámetros a monitorear.

Keywords: mecanismos de monitoreo, red de sensores inalámbricos, WSN y monitoreo ciudadano.

1. Introducción

El agua subterránea es un recurso natural vital para el abastecimiento de la población que requiere agua suficiente y de buena calidad. No obstante, su calidad se ve afectada continuamente debido a la mala gestión del recurso hídrico y a los vertidos sobre la capa freática de los diferentes sectores económicos que contribuyen a la degradación de la calidad de dichas aguas.

Las actividades antropogénicas generan grandes volúmenes de aguas residuales y efluentes industriales. El uso de una gran variedad de hidrocarburos y productos químicos en los procesos industriales ocasionan la contaminación del suelo y de las fuentes de abastecimiento de agua potable [1, 2]. Lo que puede limitar el uso de estos recursos y generar consecuencias de riesgos para la salud [2].

Debido a lo expuesto anteriormente, se requiere un monitoreo continuo de calidad de agua subterránea. El monitoreo del agua se define como el proceso programado de muestrear, evaluar y registrar las distintas características o parámetros del agua [3].

La selección de los parámetros a monitorear es un punto crítico. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) [4], dependerá principalmente de los conocimientos locales acumulados a lo largo del tiempo mediante la experiencia práctica ya que permite conocer la presencia de ciertas sustancias químicas en un país específico. También indica que los parámetros recomendados para el monitoreo mínimo de los sistemas de abastecimiento comunitarios son aquellos que permiten evaluar

mejor la calidad higiénica del agua y, por consiguiente, su riesgo de transmisión de enfermedades [4].

Los parámetros de calidad de agua pueden ser analizados en el laboratorio utilizando química analítica. El inconveniente con este método es que generalmente, requiere de alto costo, personal calificado, considerable esfuerzo, y trasladar las muestras bajo ciertas normas para que estas no sean alteradas antes del análisis [6, 7]. Sin embargo, existen instrumentos que obtienen, leen y evalúan los parámetros de calidad de agua, permitiendo realizar monitoreos in-situ [6]. Este tipo de monitoreo es de interés para la determinación de parámetros que cambian rápidamente durante el almacenamiento o cuando el transporte de las muestras plantea problemas que hacen que las mediciones y los análisis convencionales no resulten prácticos [6].

Este trabajo revisa los parámetros de calidad de agua subterránea, así como los mecanismos e instrumentos que permiten el monitoreo in-situ. A su vez, lista sus posibles causas y efectos en la salud. La revisión realizada ayudará a los ingenieros en la selección de parámetros, mecanismos e instrumentos a monitorear.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. La segunda sección describe los mecanismos de monitoreos in-situ considerados como la red de sensores inalámbricos y el monitoreo ciudadano, incluyendo una recopilación de los antecedentes, trabajos relacionados y los usos; la tercera sección trata sobre la revisión de los mecanismos e instrumentos de monitoreo por cada parámetro de calidad de agua subterránea considerada; en la cuarta sección se realiza una estimación de costo a partir de un escenario propuesto para monitorear in-situ un pozo durante un año y por último indica las conclusiones y orientaciones futuras.

2. Mecanismos de Monitoreo In-Situ

Los mecanismos considerados para realizar el monitoreo in-situ son la red de sensores inalámbricos y el monitoreo ciudadano. A continuación se detallan ambos mecanismos, identificando las principales características, fortalezas y debilidades, junto con algunas experiencias de implementación.

2.1. Monitoreo Utilizando Red de Sensores Inalámbricos (WSN)

La Red de Sensores Inalámbricos (en adelante WSN de *Wireless Sensor Network*) consiste en una red inalámbrica que consta de sensores para recolectar datos en una variedad de entornos [8, 9]. Para el monitoreo de calidad de agua, los sensores son colocados en el agua, ya sea estática o en movimiento [8].

WSN está compuesta por nodos también llamados motes. Los nodos son componentes de la red equipados con sensores y actuadores, utilizados para evaluar e influir sobre el ambiente, procesar la información y comunicarla inalámbricamente [9].

Los datos recopilados por cada nodo se comunican inalámbricamente a través de la red (Wi-fi, bluetooth o ZigBee¹) con un centro de procesamiento denominado estación base (también conocido como sumidero o sink), que tiene la capacidad de comunicación con otras redes (LAN, WLAN, WPAN, GPRS/GSM e Internet) [8, 10–12].

¹ Conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (*Wireless Personal Area Network*, WPAN)

En la mayoría de las aplicaciones de WSN, la información obtenida por ellos fluye desde muchos nodos hacia una sola estación base, por lo que se tiene un patrón de tráfico “muchos-a-uno” [2, 12–14].

Las WSN poseen ciertas fortalezas y debilidades. Las fortalezas identificadas se listan a continuación:

- Realizan el monitoreo y control remoto inalámbrico en tiempo real [2].
- Son escalables, pudiendo llegar a tener una alta cantidad de nodos [12, 13].
- Presentan independencia de fuentes externas de alimentación, casi siempre son alimentadas por medio de baterías [12].
- Cooperación de diversos nodos para cumplir una misión. Si un nodo tiene algún problema, los nodos vecinos pueden procesar la información de la red y así evitar caídas innecesarias [12, 13].
- El sistema puede alcanzar las estructuras organizacionales necesarias sin intervención humana [13].

Entre las debilidades de las WSN caben mencionar las siguientes:

- El rango de comunicaciones, las capacidades computacionales, de almacenamiento y energéticas de los nodos son limitados [12, 13].
- Los nodos son propensos a fallas o daños físicos, por usarse generalmente en ambientes hostiles [12].
- Las redes WSN presentan cambios frecuentes en su topología, debido a daños o fallas en los nodos, desgaste energético o desvanecimiento del canal de comunicación [12].
- Usualmente no es posible obtener un esquema de direccionamiento global en una red de sensores, debido al gran número que la conforman [14].
- La duración de los nodos puede ser de unos pocos días o meses, por lo tanto, los cambios de diseño eficaces deben ser considerados para prolongar su tiempo de vida a años [2].
- El costo limita la implementación. La cantidad de nodos estará directamente relacionada con la implementación de la red [13]. Existencia de sensores costosos por ejemplo para el monitoreo de nitrato [2].
- Ausencia de sensores para todos los parámetros necesarios de calidad de agua [2].
- Existe la necesidad de sensores con bajo consumo de energía [2].

La búsqueda de trabajos que traten específicamente sobre implementaciones y experiencias de WSN para el monitoreo de calidad de aguas subterráneas, no arrojó resultados significativos. Las contribuciones en este campo carecen de un diseño del sistema integral y de una puesta en práctica, probablemente porque no existen normas para su desarrollo y la tecnología todavía se basa en la evaluación experimental [15]. Por otro lado, sí existen trabajos que presentan implementaciones en otros escenarios como aguas superficiales, agricultura y salud [11, 15].

En [16], implementaron una WSN con 8 nodos sensores, separados en distancias de hasta 1500 m, en un área de 6 km² y operando en el campo durante un mes, en Burdekin, Australia. Evaluaron la salinidad, el nivel de la napa freática, el flujo y el volumen de agua subterránea. Es objetivo fue recoger las mediciones de la calidad de agua en tiempo real junto con la cantidad de agua que se bombea fuera de la zona, e investigar el impacto de la práctica de riego, en particular la salinización del agua subterránea. Los resultados mostraron que las redes de sensores proporcionan una

solución para implementar un sistema de riego sostenible, por ejemplo, la maximización de la cantidad de agua bombeada fuera de un área con un impacto mínimo en la calidad del agua.

Los trabajos [15, 17], fueron propuestas de monitoreos automáticos con componentes armados para el nodo y sin utilizar soluciones comerciales, con el objetivo de disminuir los costos de implementación. En [15] propusieron evaluar la presión, el pH y la conductividad de aguas subterráneas en Marruecos, utilizaron la transmisión de paquetes de datos a través de Ondas de Radio Frecuencia y baterías solares; resultando en un costo de USD 254 por nodo. En [17] propusieron evaluar el nivel del agua subterránea en Nebraska, EE.UU, utilizaron la transmisión de paquetes de datos a través de GSM/GPRS y baterías solares; con un costo de USD 400 a 500 por nodo.

En [18] construyeron el prototipo completo propuesto en [19], y lo colocaron en un pozo de monitoreo activo. Utilizaron tecnologías basadas en plataformas de hardware libre para obtener dispositivos de almacenamiento, transmisión y medición de bajo costo para el monitoreo de aguas subterráneas. El nodo sensor se basó en el microcontrolador Arduino UNO, encargado de obtener los datos de los sensores y transmitir a la base de datos de Raspberry pi 3, para monitorear la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, oxígeno disuelto (DO) y el potencial de reducción de oxidación (ORP). No se menciona el costo requerido de inversión.

2.2. Monitoreo Ciudadano

En el monitoreo ciudadano (también conocido como ciencia ciudadana o monitoreo comunitario participativo), la sociedad en general o los actores locales contribuyen, colaboran con la investigación científica junto a los académicos en forma voluntaria, realizando las preguntas o hipótesis, colectando los datos y/o interpretando los resultados [21, 26].

Los monitoreos ambientales generalmente son efectuados por organismos gubernamentales, ONGs y universidades, pero a su vez, éste puede ser realizado de forma participativa, integrando voluntarios en la investigación, a menudo a través de la recolección de datos sobre una variedad de escalas espaciales y temporales [20]. Es importante determinar qué monitorear y quién participará, continuando con un plan de monitoreo para convertir los datos en información [22, 27, 28].

Las fortalezas identificadas en el monitoreo ciudadano se presentan a continuación:

- Amplía la capacidad y el alcance de observación, para responder a preguntas y obtener respuestas sobre cambios del ambiente a largo plazo y en regiones extensas [22].
- Permite el intercambio de información entre científicos y no científicos [26].
- Amplía la capacidad de los ciudadanos y comunidades en el conocimiento de su región [22, 26].
- Cuenta con la contribución de muchos individuos y sus observaciones de alguna variable en particular — agua, aves, flores, lluvia, reptiles, etc. — reunidas en una base de datos central, que puede ser analizada por científicos o por ciudadanos [22].
- Es una herramienta valiosa para el manejo integrado de cuencas y el manejo adaptativo de los ecosistemas, ya que involucra la participación de diferentes actores sociales (comunidades, instituciones, etc.) [22].
- El trabajo de campo puede realizarse en áreas más amplias y durante horas no laborales [26].

Mientras que las debilidades del monitoreo ciudadano son las siguientes:

- Pueden surgir problemas durante la recopilación de datos como: la fragmentación e inexactitud de los datos, y la falta de objetividad de los participantes [26].
- Se deberán comparar los datos obtenidos por voluntarios con los datos de investigadores profesionales a modo de validar la información [26].
- Pueden requerirse recursos financieros y técnicos a largo plazo para crear capital social [26].
- La comunidad académica en general considera poco fiables los datos comunitarios [24]. De este modo, los participantes o monitores reciben capacitación y certificación para realizar las técnicas de análisis del agua y sus procedimientos son revisados periódicamente, para asegurarse de obtener información de buena calidad con la resolución propia que estas técnicas ofrecen [25].
- Los datos generados por el monitoreo ciudadano deben ser concretos y relevantes al problema, accesibles, entendibles, útiles y oportunos. Para ser efectivos, la entrega y la comunicación deben sugerir un curso de acción, y permitir que los tomadores de decisiones hagan que los involucrados sientan que están en control del problema [28]. Es por eso que, en los trabajos realizados en el área ponen especial importancia en la capacitación del público que monitoreará para obtener información fiable.
- Los principales obstáculos para el monitoreo eficaz incluyen la comunicación, la logística y la confiabilidad del equipo de campo [31].

El tipo de monitoreo ciudadano más común es el monitoreo del agua [22]. El monitoreo ciudadano del agua es un proceso participativo que busca vincular a un grupo comunitario con las técnicas apropiadas para entender y proteger su cuenca, trabajando a favor de un modo de vida saludable y sustentable [23].

Se realizó una búsqueda de trabajos sobre el monitoreo ciudadano para evaluar la calidad de agua, en general, debido a que los instrumentos utilizados son los mismos para monitorear tanto aguas superficiales, subterráneas, costas y sistemas de suministro de agua potable. Para asegurar la calidad de los datos en este tipo de monitoreo, se deben establecer programas y/o proyectos basados en las guías de implementación [23,28], siguiendo sus directrices para la planificación y capacitación (en aula y campo), a los ciudadanos como un público monitor.

En la búsqueda realizada se identificaron varios trabajos: revisiones [20,21,25,26], guías para la implementación [23,28], y también proyectos y/o programas realizados [22,27,30,31].

Los programas de monitoreo ciudadano identificados incluyeron el uso de diferentes kits para el monitoreo de calidad de agua. El programa “Monitoreo Comunitario Participativo (MCP) de la calidad de agua” [27] fue realizado en México para evaluar aguas superficiales (dos manantiales y un arroyo) como fuentes de abastecimiento de agua potable para la comunidad, utilizaron un maletín denominado “*Water Quality Test Kit*”. Evaluaron los parámetros físico-químicos (temperatura, potencial de hidrógeno, dureza, alcalinidad, oxígeno disuelto y turbidez) y bacteriológicos (bacterias *Escherichia coli*). Los resultados obtenidos con el kit fueron validados con muestras en laboratorio y no identificaron variaciones significantes entre los análisis.

El programa “Kit Ciudadano para el control de la Calidad del Agua” [30] fue realizado en Venezuela con el objetivo detectar de forma cualitativa algunos criterios de calidad de agua como: pH, color, turbidez, dureza y sabor. Específicamente, se monitoreo los sistemas de suministros de agua potable, para evaluar la calidad de agua

que llega a los hogares y comparar los resultados con la norma de calidad de agua vigente en el país. El programa permitió que la población utilice una herramienta en el hogar para poder ser autónomos e inmediatos en las medidas a tomar, a los fines de informar apropiadamente a las autoridades ante evidencias cualitativas importantes.

La *Global Water Watch-México* (GWW-Mx) [22] promueve el monitoreo comunitario participativo en México. Capacitan a través de talleres de certificación con las técnicas para el monitoreo de características físicas, químicas y/o biológicas, dependiendo de las necesidades detectadas en los cuerpos de agua, y monitorear características básicas como temperatura, pH, dureza, alcalinidad, oxígeno disuelto y turbidez, flujo, sólidos suspendidos totales y contaminación fecal. Monitorean 163 sitios mensualmente formando diferentes grupos de monitoreo para aguas superficiales, subterráneas, costas y sistemas de suministro. Desde sus inicios GWW-Mx se ha extendido rápidamente, obteniendo datos confiables disponibles para la toma de decisiones respecto al agua y el interés ciudadano de participar en estas decisiones.

En el trabajo [31], realizaron el monitoreo ciudadano sobre la calidad del agua en Bénin, África. Los participantes fueron las poblaciones rurales impactadas por el estudio, involucrados en el monitoreo local (temporal), fueron capacitados para medir el nitrato usando tiras reactivas y colorimetría. El muestreo local permitió recolectar datos fiables y semanales en un período de más de tres años. Los datos fueron comparados con un muestreo espacial que se realizó regionalmente, mediante un análisis geostadístico en una escala de cientos de kilómetros. Los resultados mostraron que es eficaz confiar en una población local con educación formal mínima para recolectar datos confiables, de alta frecuencia y series de tiempo sobre la calidad de agua durante varios años.

3. Revisión de Parámetros y Mecanismos de Monitoreo

Esta sección resume la revisión de parámetros de calidad de agua subterránea, así como los mecanismos e instrumentos que permiten el monitoreo in-situ.

Para la selección de parámetros se consideró el estándar de vigilancia de calidad de agua indicado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) [5] y los parámetros de monitoreo operativo utilizados para la vigilancia de las medidas de control propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [4].

Para identificar los mecanismos e instrumentos se realizó una búsqueda de trabajos que tratan específicamente sobre implementaciones de WSN y monitoreo ciudadano para evaluar la calidad de agua. La búsqueda de instrumentos incluyó un estudio de mercado en sitios web de compañías que ofrecen soluciones comerciales integrales de monitoreo in-situ y Amazon.com.

La Tabla 1 lista los parámetros de calidad de agua subterránea indicados por la EPA y OMS. Específicamente, incluye los siguientes tópicos:

- **Parámetro:** nombre del parámetro de calidad de agua ordenado por tipo (físico-químico, bacteriológicos y estético).
- **Causas/Origen:** identifica cuál es la causa u origen de la presencia del parámetro en el agua.
- **Efectos:** identifica el posible efecto ocasionado en los seres humanos la ingesta de agua con dicho parámetro. En general, los efectos fueron obtenidos en base a las normas internacionales para el agua potable de la OMS, indicados en [4].

- Monitoreo in-situ: indica si el parámetro puede evaluarse a través de las WSN, MC cuantitativo (MC1) y/o cualitativo (MC2).
- Observaciones: lista los puntos a resaltar y/o comentarios identificados en el mecanismo de medición.
- Referencias: número de referencia bibliográfica y/o estudio de mercado (EM).

Existen contaminantes químicos que ocasionan efectos adversos para la salud y por lo tanto generan preocupación y aumentan el interés de su evaluación permanente. Los contaminantes que pertenecen a la categoría de las sustancias químicas de origen natural son: aluminio, arsénico, bario, cromo, fluoruro, plomo, sulfato y uranio. Los contaminantes originados por otras fuentes son: antimonio, cadmio, cobre, nitrato, nitrito, coliformes fecales y coliformes totales.

La mayoría de las sustancias químicas presentes en el agua, sólo después de una exposición prolongada (durante años, más que meses) son potencialmente peligrosas para la salud. El arsénico y cromo, son parámetros importantes a evaluar, ya que se ha demostrado que su ingesta produce cáncer en el ser humano [4].

El nitrato, cuya ingesta de agua con altas concentraciones se reduce a nitrito en el estómago de los lactantes, y puede oxidar la hemoglobina a metahemoglobina, que no puede transportar oxígeno por el organismo. La enfermedad, denominada metahemoglobinemia, produce cianosis y, en concentraciones más altas, asfixia [4].

El hierro y el manganeso también generan preocupación debido a sus efectos sobre la potabilidad del agua [4]. El pH es un parámetro básico que indica el grado de acidez o basicidad del agua, aunque no suele afectar directamente a los consumidores, es uno de los parámetros operativos más importantes de calidad de agua [4].

Los parámetros que ocasionan efectos adversos para la salud indicados anteriormente, son posibles evaluar con mecanismos de monitoreo in-situ, a excepción del antimonio, bario, fluoruro y uranio.

Entre los mecanismos de monitoreo, existen parámetros que solo pueden ser monitoreados con sensores (i.e. amonio y cloruro) y otros, solo a través del MC (i.e. alcalinidad, aluminio, cadmio, cobalto, cobre, cromo, dureza, total, hierro, manganeso, molibdeno, níquel, nitrito, plata, plomo, sulfato, coliformes fecales, coliformes totales y color).

La observación destacada en el uso de sensores es que necesitan de calibraciones. Los sensores se degradan con el paso del tiempo por efectos externos (temperatura o presión atmosférica). Por lo tanto, la falta de calibraciones periódicas, afectará en los resultados obtenidos indicando valores de concentraciones inexactos.

Referente a los parámetros monitoreados por los ciudadanos, se utilizaron diferentes kits para el monitoreo de calidad de agua [27, 29]. Los kits no siempre requieren de alguna calibración previa, se basa en el uso de diferentes instrumentos de evaluaciones o sustancias químicas preparadas en concentraciones listas para ser usadas dentro del cumplimiento de un protocolo establecido para la medición de cada parámetro [27].

En el estudio de mercado fueron identificados instrumentos para el monitoreo ciudadano como los medidores digitales portátiles que funcionan con baterías y son utilizados principalmente para la evaluación de conductividad, pH y temperatura, en una cantidad ilimitada de evaluaciones (dependiendo de la duración de la batería) con resultados cuantitativos; y kits para realizar hasta 150 pruebas colorimétricas que permiten llegar a un análisis químico del parámetro analizado como alcalinidad, cobre, dureza total, hierro, nitrato, nitrito, plomo y pH. Las pruebas colorimétricas presentan resultados cuantitativos o cualitativos.

Tabla 1
Parámetros de calidad de agua, importancias y mecanismos existentes para monitorearlos

Parámetro	Causas/Origen	Efectos en la salud por ingesta	Monitoreo In-situ				
			WSN	MC1	MC2	Observaciones	Ref.
Parámetros Físico-químico							
Alcalinidad (mg/L o ppm)	Disolución de rocas carbonatadas y la meteorización de alúmino-silicatos [39]	El agua se vuelve turbia y puede causar irritación [39]	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 test (EM)	[27], EM
Aluminio (mg/L)	Origen natural y las sales de aluminio utilizadas como coagulantes en el tratamiento del agua	Posible neurotoxicidad. Hipótesis: la exposición al aluminio es un factor de riesgo para desarrollar Alzheimer	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)	EM
Amonio (mg/L)	Aguas residuales domésticas o industriales, residuos de animales y descargas recientes de desagües	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud	Si	No	No	WSN: necesita calibración	[32], [35]
Antimonio (mg/L)	Descargas de la industria petrolera, cerámica, electrónica	No hay datos que indiquen capacidad cancerígena por vía oral (1)	No	No	No	N/A	N/A
Arsénico (mg/L)	Disolución de minerales y menas de origen natural. Relacionada con la profundidad del pozo	Produce cáncer	Si	Si	No	WSN: necesita calibración MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM), posibles errores de med.	EM
Bario (mg/L)	Origen natural	Causa hipertensión	No	No	No	N/A	N/A
Berilio (mg/L)	Elemento natural. Presente en una variedad de materiales (rocas, carbón, petróleo, suelo y polvo volcánico) [40]	No hay datos que indiquen capacidad cancerígena por vía oral (1) [40]	No	No	No	N/A	N/A
Boro (mg/L)	Minerales de la corteza terrestre [41]	Náuseas, diarrea y vómitos [41]	No	No	No	N/A	N/A
Cadmio (mg/L)	Corrosión de los tubos galvanizados, erosión de depósitos naturales, eflu-entes de refineries de metales o líquidos de escorrentía de baterías usadas o pinturas	Potencialmente tóxico y su ingestión tiene efectos acumulativos en el tejido del hígado y los riñones	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)	EM
Calcio (mg/L)	Presente en la corteza terrestre. En depósitos de piedra caliza, yeso y dolomita [42]	Agua dura. Piedras en los riñones, esclerosis y problemas en los vasos sanguíneos [42]	Si	Si	No	WSN: necesita calibración MC1: test colorimét. p/ 1 test	[32], EM
Carbono orgánico total (mg/L)	Carbón [42]	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud [42]	No	No	No	N/A	N/A
Cloruro (mg/L)	Intrusión del agua del mar, aguas residuales, vertederos industriales [42]	Hipertensión arterial [42]	Si	No	No	WSN: necesita calibración	[32], [35]
Cobalto (mg/L)	Elemento natural. Presente en minerales de hierro, níquel, cobre, plata, manganeso y zinc [42]	Vómitos, náuseas, problemas de visión, problemas de corazón y daño de tiroides [42]	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)	EM
Cobre (mg/L)	Corrosión de las cañerías, erosión de depósitos naturales y el percolado de conservantes de madera	Molestias gastrointestinales y lesiones hepáticas o renales	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests (EM), posibles errores de medición	EM
Conductividad (µS/cm)	Relacionado con la salinidad. Depende de la permeabilidad intrínseca del material, del grado de saturación, densidad y viscosidad del fluido [43]	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud. Afecta la viscosidades del agua [43]	Si	Si	No	WSN: necesita calibración MC1: medidores digitales p/ ilimitados tests depende de la duración de la batería (EM)	[15], [33], EM
Cromo (mg/L)	Origen natural. El cromo metálico y los derivados del cromo (VI)	El cromo (VI) es cancerígeno	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)	EM
DO (mg/L)	Proviene de la atmósfera y como un producto de desecho de la fotosíntesis [42]	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud [42]	No	No	No	N/A	N/A
Dureza total (mg/L)	Derivada de la presencia de calcio y magnesio, generalmente se pone de manifiesto por la precipitación de restos de jabón	Los niveles en el agua de consumo no son peligrosos para la salud	No	Si	Si	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests (EM), posibles errores de medición MC2: se realiza mediante evaluación visual y comparativa	[27], EM
Estroncio (mg/L)	Presente en la corteza de la Tierra [42]	Los niveles en el agua de consumo no son peligrosos para la salud [42]	No	No	No	N/A	N/A
Fluoruro (mg/L)	Origen natural	Puede generar manchas en los dientes y fluorosis ósea incapacitante	Si	Si	No	WSN: necesita calibración MC1: test colorimétrico p/ 5 test aprox., luego recargar la solución	EM
Fosfato total (mg/L)	Procesos biológicos. Descargas de aguas que contienen detergentes comerciales [42]	Riñones y osteoporosis [42]	No	No	No	N/A	N/A

Parámetro	Causas/Origen	Efectos en la salud por ingesta	Monitoreo In-situ				
			WSN	MC1	MC2	Observaciones	Ref.
Hierro (mg/L)	Presencia debido a la utilización de coagulantes de hierro o a la corrosión de tuberías de acero o hierro colado	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud	No	Si	No	MC1: medidores digitales p/ ilimitados tests depende de la duración de la batería (EM)	EM
Magnesio (mg/L)	Presente en minerales rocosos (dolomita, magnesita, olivina y serpentina) [42]	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud [42]	No	No	No	N/A	N/A
Manganeso (mg/L)	Origen natural. Asociado al hierro	Efectos neurológicos	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test	EM
Molibdeno (mg/L)	Proviene de minas y del cobre [42]	Dolores de articulación [42]	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)	EM
Níquel (mg/L)	Materiales en contacto con el agua, producción de acero inoxidable y de aleaciones de níquel	No hay datos que indiquen capacidad cancerígena por vía oral (1)	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)	EM
Nitrato (mg/L)	Asociado a las prácticas agropecuarias, fertilizantes y aguas residuales	Enfermedad metahemoglobine-mia o "síndrome del recién nacido cianótico"	Si	Si	No	WSN: necesita calibración, sen-sor costoso MC1: test colorimétrico p/ 150 t.	[2], [32], [35]; EM
Nitrito (mg/L)	Relacionado con el Nitrato	Relacionado con el Nitrato	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests	EM
pH	CO2 disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos; por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales, por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo	Irritación de la garganta	Si	Si	No	WSN: necesita calibración MC1: test colorimétrico p/ 100 tests (EM), medidores digitales p/ ilimitados tests depende de la duración de la batería (EM)	[15], [30], [34], [35]
Plata (µg/L)	Origen natural	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)	EM
Plomo (mg/L)	Materiales de plomo en contacto con el agua	Tóxico para el sist. Nervioso y efectos neurológicos	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests (EM)	EM
Potasio (mg/L)	Metales alcalinos, fertilizantes, jabones líquidos [42]	Perturbación en el ritmo cardíaco [42]	No	No	No	N/A	N/A
Sodio (mg/L)	Misma fuente que el cloruro. En algunas rocas sedimentarias, por el inter-cambio de calcio y magnesio por sodio	Problemas cardíacos e hipertensión [42]	No	No	No	N/A	N/A
Sulfato (mg/L)	Origen natural. Yeso, azufre	Efectos gastrointestinales	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 2 t.	EM
Uranio (mg/L)	Origen natural. Formaciones rocosas ricas en uranio y centrales nucleares	Nefritis. No hay datos suficientes sobre si es cancerígeno	No	No	No	N/A	N/A
Parámetros Bacteriológicos							
Coliformes fecales (UFC/100mL)	Pozos contaminados o abandonados, fosas sépticas, letrinas, materia fecal derivada de la ganadería intensiva	Enfermedades infecciosas y parasitarias del aparato digestivo. Diarrea, cólera, disentería	No	Si	Si	MC2: test colorimétrico p/ 1 test, resultado positivo/negativo MC1: Coliscan EasyGel p/ 1 test de E.coli, errores de medición	[27], EM
Coliformes totales (UFC/100mL)	Pozos contaminados o abandonados, fosas sépticas, letrinas, materia fecal derivada de la ganadería intensiva	Enfermedades infecciosas y parasitarias del aparato digestivo. Diarrea, cólera, disentería	No	No	Si	MC2: test colorimétrico p/ 1 test, resultado positivo/negativo (EM)	EM
Parámetros Estéticos							
Color	Composición química y acciones naturales externas	Enfermedades infecciosas	No	No	Si	MC2: se realiza mediante evaluación visual y comparativa	[30]
Temperatura (°C)	Depende de la conductividad térmica e hidráulica del medio, de la relación longitud/profundidad de la cuenca. configuración del nivel freático. distribución de la temperatura ambiente respecto a las zonas de recarga y descarga	Enfermedades infecciosas	Si	Si	No	WSN: necesita calibración MC1: medidores digitales p/ ilimitados tests depende de la duración de la batería (EM)	[32], [33], EM
Turbidez (UNT)	Composición química y acciones naturales externas	Enfermedades infecciosas	Si	No	Si	WSN: necesita calibración MC2: se realiza mediante evaluación visual y comparativa	[27], [30], [34]

MC-Cuanti. (MC1) = Monitoreo Ciudadano Cuantitativo

EM = Estudio de Mercado

MC-Cuali. (MC2) = Monitoreo Ciudadano Cualitativo

N/A = No Aplica

(1) Existen indicios de la capacidad cancerígena por inhalación y no por vía oral

4. Estimación de Costo

Esta sección presenta el costo aproximado de realizar un monitoreo in-situ de calidad de agua subterránea utilizando los mecanismos de WSN y monitoreo ciudadano cualitativo (MC1) y cuantitativo (MC2), considerando el siguiente escenario: se desea monitorear durante un año, 1 pozo profundo que abastece a una población de 15.000 habitantes. En base al escenario propuesto fueron considerados los siguientes tópicos:

- Frecuencia de muestreo: de acuerdo a la OMS, es necesaria una muestra al mes por cada 10.000 habitantes [4]. En ese caso, para el escenario considerado serían 24 muestreos en un año.
- Parámetros a monitorear: de acuerdo a la OMS, para garantizar sistemáticamente la inocuidad del agua de consumo y proteger la salud pública [4], se deberán tener en cuenta los siguientes parámetros: arsénico, coliformes fecales, coliformes totales, color, conductividad, cromo, nitrato, nitrito, pH, plomo, temperatura y turbidez.
- Monitoreo in-situ: si el parámetro puede evaluarse in-situ, se identifica el mecanismo para su medición: WSN, MC1 y MC2; a partir de los trabajos identificados en la revisión de la literatura y complementada con el estudio de mercado.
- Método: identifica el instrumento de medición utilizado para realizar el monitoreo ciudadano.
- Cantidad: mostrar el número de pruebas que permite realizar el kit de monitoreo ciudadano identificado en el estudio de mercado.
- Costo Unitario: identificar el costo unitario por kit de monitoreo ciudadano.
- Cantidad total de kits: identificar a partir de la Cantidad MC, el número total de kits que serán necesarios para realizar los 24 muestreos para un año de monitoreo.
- Total USD: obtener el costo total por cada kit para realizar el monitoreo ciudadano por un año. Se calcula el Costo Unit. MC por la Cantidad total de kits necesarios.

La Tabla 2 resume los costos considerados para calcular la inversión aproximada de realizar un monitoreo ciudadano, teniendo en cuenta los tópicos considerados para el escenario propuesto.

Las estimaciones de costos realizadas contemplan los montos de los instrumentos de medición y no de otros componentes necesarios como: servidor, nodo cabecera, capacitación de participantes del monitoreo ciudadano, etc.

Con el monitoreo ciudadano cuantitativo o MC1 se podría evaluar 9 parámetros: arsénico, coliformes fecales, conductividad, cromo, nitrato, nitrito, pH, plomo, temperatura. El cual requeriría de una inversión aproximada de USD 1,166 para el escenario dado.

Con el monitoreo ciudadano de manera cualitativa o MC2 solo se podría evaluar coliformes totales, arrojando un resultado de positivo/negativo, con un costo de USD 364. Así también, se podría evaluar visualmente, es decir sin costo de inversión, el color y la turbidez del agua.

De acuerdo a la literatura [15, 17], el costo promedio por nodo para realizar un monitoreo con WSN es de USD 377. Cabe mencionar que el monitoreo sería de 2 parámetros: conductividad y pH.

A modo de comparar los mecanismos de monitoreo, fueron seleccionados los parámetros comunes entre ellos. La Tabla 3 muestra los resultados.

Tabla 2

Parámetros identificados e instrumentos utilizados para realizar el monitoreo ciudadano cualitativo (MC1) y cuantitativo (MC2)

Parámetro	MC-Cuanti. (MC1)	MC-Cuali. (MC2)	Método	Cantidad	Costo Unit. (USD)	Muestreo/año MC	
						Cantidad total de kits	Total USD
Arsénico	Si	No	MC1: test colorimétrico	1	9.97	24	239.28
Coliformes fecales	Si	Si	MC1: medios de cultivo y placas petri	1	25.92	24	622.08
Coliformes totales	No	Si	MC2: test positivo/negativo	1	15.18	24	364.00
Color	No	Si	MC2: test de comparación visual	ilimitado	N/A	N/A	N/A
Conductividad	Si	No	MC1: medidor digital portátil	ilimitado	23.47	1	23.47
Cromo	Si	No	MC1: test colorimétrico	150	18.98	1	18.98
Nitrato	Si	No	MC1: test colorimétrico				
Nitrito	Si	No	MC1: test colorimétrico				
pH	Si	No	MC1: test colorimétrico y medidor digital portátil				
Plomo	Si	No	MC1: test colorimétrico	ilimitado	23.47	1	23.47
Temperatura	Si	No	MC1: medidor digital portátil	ilimitado	23.47	1	23.47
Turbidez	No	Si	MC2: test de comparación visual	ilimitado	N/A	N/A	N/A

N/A = No Aplica cuando el MC1 se evalúa con el instrumento de test de comparación visual.

Tabla 3

Comparación de costo de los mecanismos de monitoreo in-situ

Parámetros	WSN	MC1	MC2
Conductividad y pH	377.00 USD	42.45 USD	-
Parámetros microbiológicos (Coliformes fecales y totales)	-	622.08 USD	364.00 USD

5. Conclusiones

Para hacer frente a la necesidad de evaluar los contaminantes que afectan a las aguas subterráneas realizando un monitoreo regular y continuo, este trabajo revisó primeramente los mecanismos de monitoreo in-situ considerados como las WSN y el monitoreo ciudadano (MC). El trabajo se centró en listar (Tabla 1) los parámetros de calidad de agua subterráneas considerados por la EPA [5] y la OMS [4], y revisar los mecanismos e instrumentos de monitoreo por cada parámetro. Con los métodos de monitoreo in-situ es posible monitorear el 65% de los parámetros, utilizando los instrumentos como sensores (disponibles para 10 parámetros), test de colorimetría y/o medidores digitales (disponibles para 23 parámetros).

Los parámetros que generan preocupación debido a sus efectos para la salud son: aluminio, bario, cromo, fluoruro, manganeso, plomo, sulfato y uranio, arsénico, cadmio, cobre, nitrato, nitrito, coliformes fecales, coliformes totales, pH y hierro. Con los instrumentos para el monitoreo in-situ se pueden evaluar los contaminantes mencionados que generan preocupación, a excepción del antimonio, bario y uranio.

La estimación de costo a partir del escenario propuesto indicó que, con el MC1 será posible evaluar cuantitativamente 9 parámetros (arsénico, coliformes fecales, conductividad, cromo, nitrato, nitrito, pH, plomo, temperatura) a un costo de USD 1,166. Con WSN será posible evaluar solo 2 parámetros (conductividad y pH) a un costo de USD 377. En WSN y MC1 fueron identificados los parámetros comunes posibles de monitorear (conductividad y pH), donde el costo estimado es USD 377 y USD 42.45 respectivamente. Lo que indica una inversión superior considerable de WSN en comparación a MC1.

El costo y la ausencia de sensores para medir los parámetros necesarios de calidad de agua subterránea podrían limitar a las implementaciones de WSN para realizar el monitoreo in-situ. Sin embargo, es factible combinar ambos mecanismos de monitoreo (WSN y MC) y mitigar las debilidades de uno con las fortalezas del otro.

Este trabajo se utilizará como punto de partida para elaborar un plan de monitoreo in-situ para el acuífero Patiño, dentro de un área de 567 km^2 .

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de PROCENCIA, en el marco del proyecto INV-190 “Monitoreo y simulación del transporte de contaminantes en áreas urbanas del acuífero Patiño”. Con recursos del programa “Fondo para la Excelencia de la Educación e Investigación” - FEEI de FONACIDE, y por la Facultad Politécnica - Universidad Nacional de Asunción.

Referencias

1. Dávila Pórcel, R. A., Gómez, H. D. L.: Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. Boletín de la sociedad geológica mexicana, vol. 63(3), pp. 463-477 (2011)
2. Zia, H., Harris, N. R., Merrett, G. V., Rivers, M., Coles, N.: The impact of agricultural activities on water quality: A case for collaborative catchment-scale management using integrated wireless sensor networks. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 96, pp. 126-138 (2013)
3. UNEP/WHO: Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater. Quality Studies and Monitoring Programmes (1996)
4. Organización Mundial de la Salud. Guías para la calidad del agua potable. 3ra ed. Ginebra: OMS (2006)
5. EPA. Groundwater Quality Monitoring. Disponible en: <http://www.epa.ie/water/wm/groundwater/quality/>. [Accedido: 04-abr-2017]
6. Mecanismos e instrumentos para el monitoreo de la calidad de agua. Serie: gestión del agua en cuencas transfronterizas, ANAM, MINSA, Representantes de las Juntas y Asociaciones administradoras de acueductos rurales ubicados en la Cuenca Binacional del Río Sixaola, en Panamá y Costa Rica, (2010). [En línea]. Disponible en: http://lasa.ciga.unam.mx/monitoreo/images/biblioteca/29%20mecanismos_monitoreo_calidad_agua.pdf. [Accedido: 26-abr-2017]
7. UNICEF, OMS: Evaluación Rápida de calidad del agua Potable. Manual Práctico. Programa Conjunto de Monitoreo para el Abastecimiento y Saneamiento del Agua, Ginebra, (2003) [En línea]. Disponible en: http://lasa.ciga.unam.mx/monitoreo/images/biblioteca/25%20Evaluacion_CA_potable.pdf. [Accedido: 26-abr-2017]

8. Chaamwe, N.: Wireless Sensor Networks for Water Quality Monitoring: A Case of Zambia. *Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE)*, 2010 4th International Conference (2010)
9. Zennaro, M.: Introduction to Wireless Sensor Networks. Available: <http://wireless.ictp.it/wp-content/uploads/2012/02/Zennaro.pdf> [Accedido: 02-feb-2017]
10. Grossglauser M., Tse, D. N. C.: Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *IEEE Transactions on Networking*, vol. 10 no. 4 (2002)
11. Cama-Pinto, A., Gil-Montoya, F., Gómez-López, J., García-Cruz, A., Manzano-Agugliaro, F.: Wireless surveillance system for greenhouse crops. *Dyna*, vol. 81(184), pp. 164-170 (2013)
12. Regoli A., C. S.: Diseño de un Método de Enrutamiento Activo para Redes Inalámbricas de Sensores (WSN). Master en Automática, Robótica y Telemática, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla (2013)
13. Vela Velasco, A. M.: Estudio de la agricultura de precisión enfocado en la implementación de una red de sensores inalámbricos (WSN) para el monitoreo de humedad y temperatura en cultivos—caso de estudio hacienda Cabalinus ubicada en la provincia de Los Ríos. Master's thesis, PUCE (2016)
14. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E.: Wireless sensor networks. A survey. *Computer Networks* (2002)
15. Taffahi, H., Bensouda, N., Alj, Y. S.: Automated Groundwater Monitoring Using Telemetry. Presented at the 2013 4th International Conference on Intelligent Systems, Modeling and Simulation (2013)
16. Le Dinh, T., Hu, W., Sikka, P., Corke, P., Overs, L., Brosnan, S.: Design and deployment of a remote robust sensor network: Experiences from an outdoor water quality monitoring network. Presented at the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (2007)
17. Anumalla, S., Ramamurthy, B., Gosselin, D. C., Burbach, M.: Ground water monitoring using smart sensors. Presented at the 2005 IEEE International Conference on Electro Information Technology (2005)
18. Ilie, A. M. C., Nieto, D., Vaccaro, C.: Innovative groundwater monitoring technology. Conference: Le Giornate Dell'Idrologia 2017 della Società Idrologica Italiana, At Favignana (TP) (2017) Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/317436997_INNOVATIVE_GROUNDWATER_MONITORING_TECHNOLOGY [Accedido: 19-jul-2017]
19. Ilie, A. M. C., Vaccaro, C., Rogeiro, J., Leitão, T.E., Martins, T.: Configuration, programming and implementation of 3 Smart Water network wireless sensor nodes for assessing the water quality”, in the Proceedings of the: 2017 IEEE Smart World Congress (2017).
20. Allen, P., Cooper, C.: La ciencia ciudadana como herramienta para el monitoreo de la biodiversidad. En: Pisanty (2006) Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/507.pdf> [Accedido: 18-mar-2017]
21. Miller-Rushing, A., Primack, R., Bonney, R.: The history of public participation in ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 10(6), pp. 285–290 (2012)
22. Flores Díaz, A. C., Ramos Escobedo, M. G., Ruiz Córdova, S. S., Manson, R., Aranda, E., Deutsch, W. G.: Monitoreo Comunitario del Agua: Retos y Aprendizaje desde la Perspectiva de Global Water Watch-México (2013)
23. Deutsch, W. G., Ruiz-Córdova, S., Duncan, B. L.: Community-Based Water Monitoring. A practical model for Global Watershed Stewardship. In *Global Water Watch Program*, ed. Auburn University, Alabama, USA, p. 182 (2010)
24. Freitag, A.: Comparing best management practices of community based monitoring between habitats in the literature and in reality. Cornell University (2008)
25. Reutebuch, E., Deutsch, W. G., Ruiz-Córdova, S.: Community-Based Water Quality Monitoring – Data Credibility and Applications. *Alabama Water Watch*, Auburn University, Alabama (2008)

26. Conrad, C. C., Hilchey, K. G.: A review of citizen science and community-based environmental monitoring: issues and opportunities. *Environmental monitoring and assessment*, vol. 176(1), pp. 273-291 (2011)
27. Perevochtchikova, M., Hernández, N. A., Zamudio-Santos, V. Sandoval-Romero, G. E.: Community Participatory Monitoring of Water Quality: Case Ajusco, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 7(6), pp. 4, (2016)
28. CAO: Monitoreo Participativo del Agua. Guía para Prevenir y Manejar el Conflicto. Oficina del Asesor en Cumplimiento/Ombudsman (CAO), Washington DC, USA (2008). [En línea]. Disponible en: <http://www.cao-ombudsman.org/howwework/advisor/documents/watermonsp.pdf>. [Accedido: 19-mar-2017]
29. Vitalis: Kit ciudadano para el monitoreo de calidad del agua en Venezuela (2013). [En línea]. Disponible en: <http://www.vitalis.net/kitagua/>. [Accedido: 27-mar-2017]
30. Vitalis: VITALIS y AVEAGUA presentaron su kit ciudadano para monitorear la calidad del agua en Venezuela (2013). [En línea]. Disponible en: <http://www.vitalis.net/2013/11/vitalis-y-aveagua-presentaron-su-kit-ciudadano-para-monitorear-la-calidad-del-agua-en-venezuela/>. [Accedido: 27-mar-2017]
31. Silliman, S., Crane, P., Boukari, M., Yalo, N., Azonsi, F., Glidja, F.: Groundwater quality monitoring in collaboration with rural communities in Bénin. In *Groundwater and climate in Africa. Proceedings of the Kampala Conference, Uganda, 24-28 June 2008* (pp. 27-35). IAHS Press (2009)
32. Ramanathan, N., Balzano, L., Estrin, D., Hansen, M., Harmon, T., Jay, J., et al.: Designing wireless sensor networks as a shared resource for sustainable development. Presented at the 2006 International Conference on Information and Communication Technologies and Development (2006)
33. Solinst.com. [En línea]. Disponible en: <http://www.solinst.com> [Accedido:13-01-2017]
34. In-situ.com. [En línea]. Disponible en: <https://in-situ.com/product-category/water-quality-testing-equipment/> [Accedido:13-01-2017]
35. OTT Hydromet. [En línea]. Disponible en: <http://www.ott.com/es-la/aplicaciones/agua-subterranea-38/> [Accedido:13-01-2017]
36. Drever, James I.: *The Geochemistry of Natural Waters*, Second Edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. pp. 51-58 [52]. ISBN 0-13-351396-3 (1988).
37. Kotloff, R. M., Richman, P. S., Greenacre, J. K., Rossman, M. D.: Chronic Beryllium Disease in a Dental Laboratory Technician, *American Review of Respiratory Disease*, Vol. 147, No. 1, pp. 205-207 (1993).
38. Gogotsi, Y. G. and Andrievski, R.A.: *Materials Science of Carbides, Nitrides and Borides*. Springer. pp. 270-270. ISBN 0792357078 (1999).
39. Wright, J.: *Environmental chemistry*. Routledge (2004).
40. Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y.A., and Rawls, W.J.: Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*. 251 (3-4), pp. 123-150 (2001).