

ANÁLISIS DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO PATIÑO

Liz Verónica Báez Lovera

Orientadores: Prof. Cynthia Villalba, Dra.
Prof. Juan Pablo Nogués, Dr.

Tesis presentada a la Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción,
como requisito para la obtención del Grado de Máster en Ciencias de la
Computación.

ASUNCIÓN - PARAGUAY

Diciembre - 2017

Datos internacionales de Catalogación en la Publicación (CIP)
DE BIBLIOTECA CENTRAL DE LA UNA

Báez Lovera, Liz Verónica

Análisis del riesgo de contaminación del acuífero Patiño/ Liz Verónica Báez
Lovera. – Asunción, 2017.

96 p. : il.

Tesis (Maestría en Ciencias de la Computación) – Facultad Politécnica,
2017.

Bibliografía.

Palabras clave:

1. DRASTIC. 2. Optimización Multi-Objetivo. 3. NSGA-II. 4. WSN.
5. Monitoreo Ciudadano.

CDD 519.4

*Dedicado a mi mamá, papá y hermanos.
Porque cada uno de ustedes ha aportado grandes cosas a mi vida.
Les agradezco por todo, en especial por ser los principales
benefactores del desarrollo de mi tesis.*

Liz Verónica

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a la Virgen María por acompañarme y guiarme en mi camino, y llenarme de bendiciones y alegrías.

A mis padres Melanio y Verónica, por el inmenso amor, por enseñarme que los sueños se logran a base de esfuerzo y dedicación, y por transmitirme su valor para no darme por vencida. Muchas gracias.

A mi hermano José, gracias por todo su apoyo incondicional, enseñanzas y por su disponibilidad de ayudarme.

A mis hermanas Katya y María Paz, por darme la oportunidad de crecer al lado de ellas y el cariño que me brindan día a día. Gracias.

A mi compañero de vida Ariel, gracias por su amor, por creer en mí y por ser el impulso para llegar a la meta.

A mi gran familia, gracias por todo su apoyo y disponibilidad de ayudarme e impulsarme siempre.

A mis amigos, que están en las buenas y en las malas, por comprenderme en mis ausencias y hacerme la vida más amena. Gracias.

A mis orientadores, porque me han aportado un sin fin de conocimientos. Gracias por su tiempo, paciencia y preocupación. El desarrollo de esta tesis se los debo a ellos.

A mis profesores, compañeros y colaboradores del NIDTEC, gracias por abrirme sus puertas y por estar siempre dispuestos a ayudarme.

Al CONACyT, gracias por la ayuda brindada al otorgarme la beca.

A todos, ¡Gracias!

ANÁLISIS DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO PATIÑO

Autor: Liz Verónica Báez Lovera

Orientadores: Cynthia Villalba, Dra.

Juan Pablo Nogués, Dr.

RESUMEN

Las aguas del acuífero Patiño abastecen a la zona urbana más grande y densamente poblada del país. Actualmente no existe mayor información de los posibles contaminantes, la calidad de sus aguas y los puntos que necesitan ser monitoreados para encontrar posibles focos de contaminación. Por ello, es de suma importancia evaluar el riesgo de contaminación de sus aguas subterráneas.

Basados en un análisis de datos existentes se realizó una modificación del modelo de vulnerabilidad DRASTIC adicionando parámetros antropogénicos como: uso de la tierra (L), densidad de pozos ciegos (P) y vías principales de transporte (VP) como indicadores de riesgo de contaminación. El modelo se calibró con los valores de concentraciones de nitrógeno total (N_T) y coliformes totales (C_T). Los coeficientes de correlación antes y después de la calibración fueron 0.07 y 0.5 respectivamente para el mapa de riesgo de N_T , mientras que los coeficientes de correlación pre y post calibración para los mapas de C_T fueron 0.3 y 0.7 respectivamente. Los mapas develaron que el 42% del acuífero tiene un riesgo de contaminación de medio a alto (60-100), principalmente en Asunción y el Gran Asunción ¹.

Ante la necesidad de realizar una campaña de análisis de calidad de agua en las zonas de mayor riesgo, se seleccionaron 70 pozos de los 2.830 conocidos, utilizando el algoritmo NSGA-II. Además se presentó un diseño de monitoreo remoto, combinando la Red de Sensores Inalámbricos (WSN), para monitorear automáticamente, mediante evaluaciones fiables, recolección y envío de datos en tiempo real; y el Monitoreo Ciudadano (MC), de manera a disminuir los costos, abarcar una mayor área de monitoreo y ampliar la cantidad de parámetros a evaluar.

¹Luque, Fernando de la Mora, San Lorenzo, Villa Elisa, Lambaré, Mariano Roque Alonso, Ñemby, Capiatá, Limpio y San Antonio

ANALYSIS OF THE RISK OF CONTAMINATION OF THE PATIÑO AQUIFER

Author: Liz Verónica Báez Lovera

Advisors: Cynthia Villalba, Dra.

Juan Pablo Nogués, Dr.

SUMMARY

The waters of the Patiño aquifer supply the largest and most densely populated urban area of the country. Currently there is no more information about the possible pollutants, the quality of their waters and the points that need to be monitored to find possible sources of contamination. Therefore, it is very important to evaluate the risk of contamination of its groundwater.

Based on an analysis of existing data, a modification of the DRASTIC vulnerability model was made by adding anthropogenic parameters such as: land use (L), density of cesspools (P) and major transport routes (VP) as indicators of contamination risk. The model was calibrated with the values of total nitrogen concentrations (N_T) and total coliforms concentrations (C_T). The correlation coefficients before and after the calibration were 0.07 and 0.5 respectively for the risk map of N_T , while the pre and post calibration correlation coefficients for the maps of C_T were 0.3 and 0.7 respectively. The maps revealed that 42 % of the aquifer has a medium to high contamination risk (60-100), mainly in Asunción and Gran Asunción².

In view of the need to carry out a water quality analysis campaign in the areas of greatest risk, 70 wells of the 2,830 known wells were selected, using the NSGA-II algorithm. In addition, a remote monitoring design was presented, combining the Wireless Sensor Network (WSN), to automatically monitor, through reliable evaluations, dispatch and collection of data in real time; and Citizen Monitoring (MC), in order to reduce costs, cover a larger area of monitoring and expand the number of parameters to be evaluated.

²Luque, Fernando de la Mora, San Lorenzo, Villa Elisa, Lambaré, Mariano Roque Alonso, Ñemby, Capiatá, Limpio y San Antonio

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	5
1.1.1 Objetivo General	5
1.1.2 Objetivos Específicos	5
1.2 Estructura de la Tesis	6
2 RIESGO DE CONTAMINACIÓN	7
2.1 DRASTIC	9
2.2 Metodología para Determinar el Riesgo de Contaminación: Método DRASTIC Modificado	13
2.2.1 Análisis Comparativo	22
2.3 Resultados y Discusión	24
2.3.1 Validación de los Resultados	30
2.3.2 Comparación de Mapas de Riesgos	30
2.4 Resumen	35
3 SELECCIÓN DE POZOS PARA CAMPAÑA DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA	38
3.1 Marco Teórico	39
3.1.1 Algoritmos Evolutivos	40
3.1.2 Algoritmos Genéticos	40
3.1.3 Algoritmo NSGA-II	41
3.2 Selección de Pozos Utilizando NSGA-II	44
3.3 Resultados Experimentales	47

3.3.1	Mapas de Pozos Seleccionados	51
3.4	Resumen	54
4	DISEÑO DE SISTEMA DE MONITOREO REMOTO	55
4.1	Requisitos del Sistema	57
4.2	Revisión de Métodos de Monitoreo Remoto	57
4.3	Parámetros de Monitoreo	66
4.4	Propuesta de Monitoreo Remoto	72
4.4.1	Selección de Parámetros	73
4.4.2	Arquitectura del Sistema	74
4.5	Guía de Trabajo	79
4.6	Resumen	79
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	82
5.1	Trabajos futuros	84
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

1.1	Fuentes de contaminación de aguas subterráneas.	1
1.2	El acuífero Patiño y las ciudades que comprende.	2
1.3	Fuentes puntuales de contaminación sobre el acuífero Patiño. . . .	3
2.1	Esquema DRASTIC.	10
2.2	Mapa resultante de la interpolación Cokriging de 46 piezómetros utilizados con los valores de NE (2007 y 2013).	16
2.3	Mapa de recarga con valores en mm.	17
2.4	Mapa de litología del acuífero, 192 pozos y piezómetros georrefe- renciados.	18
2.5	Mapa de tipo de suelo en el área del acuífero Patiño	19
2.6	Mapa de topografía del terreno con valores en porcentaje.	19
2.7	Mapa de conductividad hidráulica (m/d)	20
2.8	Mapa del uso de la tierra.	21
2.9	Mapa de la densidad de viviendas con pozos ciegos/ha.	21
2.10	Mapa de las vías principales de transporte.	22
2.11	Mapas de riesgo de contaminación para el área de estudio.	24
2.12	Relaciones entre los Índices de riesgo y las concentraciones de N_T y C_T (con transformación logarítmica).	31
2.13	Histogramas y resumen estadístico.	32
2.14	Variograma Isotrópico (omnidireccional) de los índices de N_T y C_T hasta una distancia de 15 km.	33
2.15	Variogramas Anisotrópicos en 2D de los índices.	33
2.16	Porcentaje de áreas que tienen el mismo valor, en un radio de búsqueda determinado.	35
2.17	Probabilidad de encontrar celdas similares en diferentes radios de búsquedas al comparar los mapas de riesgos.	36

3.1	Distribución de los 2.830 pozos identificados en el área de Asunción y Gran Asunción.	39
3.2	Ejemplo de una zona <i>buffer</i> con bordes disueltos alrededor de los pozos, correspondientes a puntos vectoriales.	45
3.3	Comparación de los frentes iniciales y finales, del problema de maximización, implementando el algoritmo NSGA-II con 400 generaciones en la Prueba 1.	49
3.4	Comparación de los frentes iniciales y finales, del problema de maximización, implementando el algoritmo NSGA-II con 400 generaciones en la Prueba 2.	51
3.5	Selección de pozos multi-objetivo.	52
3.6	Selección de pozos multi-objetivo.	53
4.1	Arquitectura del sistema de las WSN para el monitoreo automático.	60
4.2	Propuesta de solución para el monitoreo remoto, combinando las tecnologías de las WSN y el Monitoreo Ciudadano.	75
4.3	Arquitectura del Centro de datos.	75
4.4	Arquitectura de las WSN.	76

LISTA DE TABLAS

2.1	Calificaciones y pesos de los parámetros DRASTIC	11
2.2	Calificaciones originales y modificadas de los parámetros DRAS- TIC según la media de N_T y C_T	28
2.3	Calificaciones originales, propuestas y modificadas de los parámetros L , P y VP adicionados a DRASTIC según la media de N_T y C_T	29
2.4	Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, in- cluidos los parámetros L , P y VP para las calibraciones con N_T y C_T	30
3.1	Resumen de resultados de la Prueba 1 considerando el área de cobertura.	48
3.2	Individuos seleccionados en la Prueba 1 con sus respectivos valores de funciones objetivos.	48
3.3	Resumen de resultados de la Prueba 2 con el cálculo de área de influencia.	50
3.4	Individuos seleccionados en la Prueba 2 con sus respectivos valores de funciones objetivos.	50
4.1	Parámetros de calidad de agua, importancias y mecanismos exis- tentes para monitorearlos	67
4.2	Selección de parámetros de calidad de agua posibles de evaluar con WSN, MC cuantitativo (MC1) y MC cualitativo (MC2).	74

LISTA DE ABREVIATURAS

A: Litología del Acuífero
API: *Aplicación Programming Interface*
C: Conductividad hidráulica
CE: Criterios de Exclusión
CI: Criterios de Inclusión
CRU: *Climate Research Unit*
CSV: *Comma Separated Value*
CT: Coliformes totales
CV: Coeficiente de Variación
D: Profundidad del agua subterránea
DEM: Modelo Digital de Elevaciones
DIGESA: Dirección General de Saneamiento Ambiental
DO: Oxígeno Disuelto
DRASTIC: *Depth to water, Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the vadose zone, Conductivity*
EA: *Evolutionary Algorithms*
EM: Estudio de Mercado
ESSAP: Empresa de Servicios Sanitarios del Paraguay
GAs: *Genetic Algorithms*
GIS: *Geographic Information System*
GPRS: *General Packet Radio Service*
GSM: *Global System for Mobile*
HTTP: *Hypertext Transfer Protocol*
I: Impacto de la zona vadosa
I: índice
IP: Identificadores de Pozo
L: Uso de la tierra
LAN: *Local Area Network*
MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería

MC: Monitoreo Ciudadano
MC1: Monitoreo Ciudadano Cuantitativo
MC2: Monitoreo Ciudadano Cualitativo
MCU: *Micro Control Unit*
MOEA: *Multiobjective Evolutionary Algorithms*
NE: Niveles Estáticos
NSGA-II: *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, version II*
NT: Nitrógeno total
OMS: Organización Mundial de la Salud
ORP: Potencial de Reducción de Oxidación
P: Densidad de pozos ciegos
POSH: *Pollutant Origin and Surcharge Hydraulically*
R: Recarga
R2: Coeficiente de determinación
RQ: Pregunta de Investigación
S: Tipo de Suelo
T: Topografía
US EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
VP: Vías Principales de transporte
WLAN: *Wireless Local Area Network*
WPAN: *Wireless Personal Area Network*
WSN: *Wireless Sensor Networks*

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas son un recurso natural vital para el suministro de agua potable a los habitantes de áreas urbanas y rurales, pero frecuentemente poco apreciado y utilizado de manera desmedida, donde el riesgo de contaminación pasa a ser una amenaza latente y es necesario estudiarlo para evaluar los peligros potenciales de contaminación, y asegurar la calidad natural del agua.

Entender el riesgo de contaminación, sirve para realizar acciones preventivas, evitar una contaminación futura y realizar acciones correctivas para controlar la amenaza de contaminación por actividades presentes o pasadas [FHG⁺03]. La Figura 1.1 ilustra las diferentes fuentes de contaminación de aguas subterráneas.

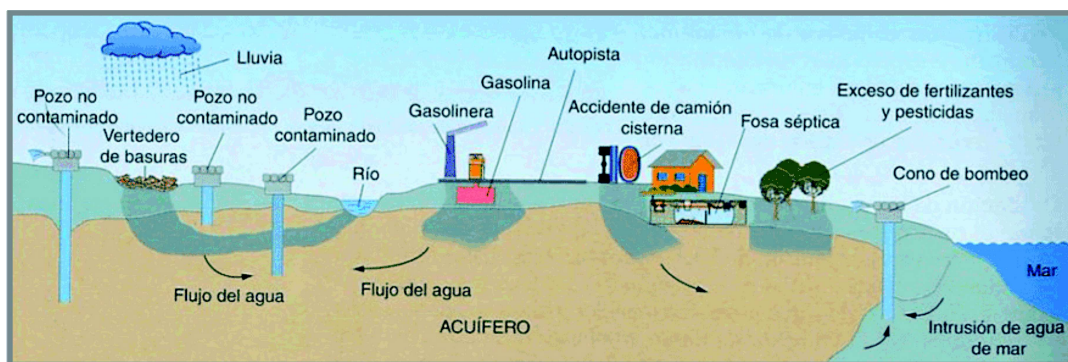


Figura 1.1: Fuentes de contaminación de aguas subterráneas.
Fuente [San].

En Paraguay, una de las principales fuentes de suministro de agua para uso doméstico y para el riego, son las aguas del acuífero Patiño (Figura 1.2), localizado en la Región Oriental del Paraguay, es un acuífero libre de 1173 km^2 de extensión [sen01].

La zona tiene forma triangular y está bordeada en el noroeste y oeste por el río Paraguay. Las alturas máximas encontradas en el área van entre 200 y 300 msnm, y las partes más bajas se encuentran a un nivel alrededor de 60

msnm, en los márgenes del río Paraguay. De acuerdo a [ckc07], la morfología del acuífero Patiño presenta una profundidad de 300 m, aproximadamente 65 kilómetros de largo y con una anchura aproximada máxima de 30 kilómetros. La unidad litológica principal ocupa la zona central de la cuenca geológica y está rodeada de los lados y del fondo por una unidad de más baja conductividad [ckc07]. Según uso del suelo, densidad y nivel de consolidación, el 29% (km^2) corresponde a área urbana y 71% (km^2) a área rural [ice].

Las aguas del acuífero Patiño abastecen, de alguna forma u otra, a la zona urbana más grande y más densamente poblada del país que abarca Asunción y las demás ciudades de los departamentos Central y algunas del departamento de Paraguarí, con más de 2.976.400 habitantes [dge12a]. En la Figura 1.2 se visualizan las ciudades que comprenden el área de estudio, además de las distribuciones de muestras obtenidas de las concentraciones de Nitrógeno total (N_T) y Coliformes totales (C_T), con 71 y 37 valores respectivamente, obtenidos de [CLCR06].

Además de dicha realidad demográfica, el acuífero abastece de agua a una gran parte del sector comercial, industrial y agropecuario de la zona, en donde se estima alrededor de 8.000 fuentes potenciales de contaminación [dge12a]. La Figura 1.3 muestra la clasificación de las fuentes potencialmente contaminantes, basado en el método POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulically*) [FHG⁺03] que establece tres categorías de la carga contaminante del subsuelo (POSH 1 o reducido, POSH 2 o moderado y POSH 3 o elevado).

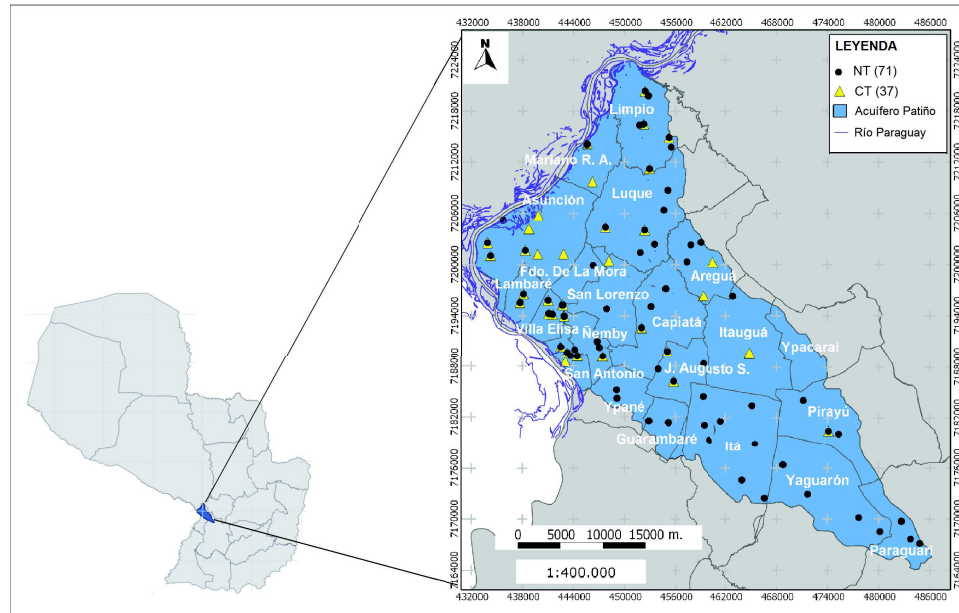


Figura 1.2: El acuífero Patiño y las ciudades que comprende. Distribuciones de las concentraciones de N_T y C_T , con 71 y 37 valores respectivamente, obtenidos de [CLCR06].

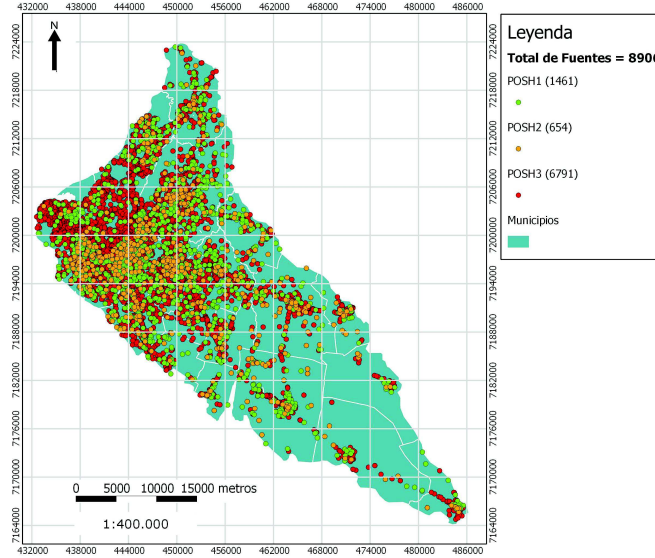


Figura 1.3: Fuentes puntuales de contaminación sobre el acuífero Patiño.

Actualmente hay una baja concentración e intensidad de monitoreo del acuífero Patiño, se realizan muestreos basados en campañas, utilizando métodos analíticos para agua potable. Los resultados, de estos muestreos, son generalmente escasos y están diseminados en varios estudios realizados por diferentes instituciones gubernamentales. Esto conlleva a la carencia de información de calidad de agua e información para la toma de decisiones.

Dada la actual coyuntura socio-ambiental de las aguas del Paraguay, en particular de la contaminación de los arroyos del Gran Asunción y el Lago Ypacaraí, es de suma importancia entender la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de las aguas del acuífero Patiño. Además de su uso desmedido y usos urbanos, también corre el riesgo de contaminación constante por los vertidos sobre la napa freática y la poca cobertura de desagüe cloacal.

La vulnerabilidad a la contaminación es una propiedad intrínseca del medio que determina la sensibilidad a ser afectados negativamente por un contaminante externo [Fos87]. La vulnerabilidad de contaminación del acuífero (ver Figura 1.1), consiste en la introducción de contaminantes potenciales desde una ubicación en la parte superior, a una posición en un sistema subterráneo [NPPS14].

El grado de vulnerabilidad puede expresarse mediante un índice, métodos que emplean modelos de simulación y modelos estadísticos [Lin05]. De acuerdo a [PAL06, Rah08, AZ02, MZDE15], el índice muy difundido para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca es el índice DRASTIC [ALPB87]. Dicho índice se refiere a la incidencia de parámetros de un acuífero que implican una mayor chance de contaminación dadas sus características naturales.

Existe una vulnerabilidad cuando el acuífero es condicionado por las características hidrogeológicas del terreno. La vulnerabilidad puede ser específica cuando se consideran factores externos como el propio contaminante [MF98], por lo tanto, existe un riesgo de contaminación cuando se refiere al peligro de deterioro en relación a sustancias contaminantes específicas [Aug08]. En este trabajo se evalúa el riesgo de contaminación debido a la inclusión de parámetros de índole antropogénico.

En este contexto, el objetivo de este trabajo consiste en evaluar el riesgo de contaminación del acuífero Patiño y presentar una propuesta para el monitoreo continuo de calidad de agua subterránea en las zonas identificadas con mayores riesgos de contaminación.

Este trabajo evalúa el riesgo, basado en el análisis de datos existentes sobre la hidrogeología de la región, usando el índice de vulnerabilidad proporcionado por el método DRASTIC [ALPB87], el cual será modificado para incorporar la influencia antropogénica. Los parámetros antropogénicos utilizados son: uso de la tierra, densidad de pozos ciegos y vías principales de transporte. El modelo de riesgo es calibrado con valores de concentración de Nitrógeno total (N_T), que es la suma de Nitritos y Nitratos, y además las concentraciones de Coliformes totales (C_T). Como resultado se presentan dos mapas de riesgos de contaminación por diferentes contaminantes y éstos a su vez, son comparados con técnicas de geoestadísticas, para estudiar si es necesario un mapa de riesgo por tipo de contaminante o si un mapa podría reemplazar al otro.

Identificadas las zonas con mayores riesgos de contaminación del acuífero Patiño, se realiza la selección de pozos para realizar una campaña de análisis de calidad de agua dentro del área de Asunción y Gran Asunción. En esta área se conocen 2.830 pozos, correspondientes a pozos profundos de la Empresa de Servicios Sanitarios del Paraguay (ESSAP), aguaterías privadas, juntas de saneamientos y piezómetros. Sin embargo, se cuenta con fondos para el análisis de calidad de agua subterránea de 70 pozos. Dada la limitación de números de pozos a analizar, y la necesidad de obtener las muestras de agua subterránea en lugares con altos índices de riesgos de contaminación por N_T y C_T , se utiliza un método basado en Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivo (MOEAs) para la selección óptima de pozos.

De acuerdo a [TRW05], existe una amplia literatura sobre recursos hídricos, demostrando la importancia de los MOEAs como herramientas de solución. En este trabajo se considera la utilización del algoritmo NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*, versión II) [DAPM00] es un MOEA, basado en el

ordenamiento no-dominado para asignar el valor de adaptabilidad a los elementos de la población genética [VL03].

El análisis de riesgo de contaminación continúa ante la necesidad de un monitoreo continuo de las aguas del acuífero Patiño, principalmente en las zonas identificadas con altos índices de riesgos de contaminación, mantener un registro periódico, con la posibilidad de compartir y facilitar los resultados obtenidos, y proveer de un análisis de datos orientado a la toma de decisiones. Por ello, se realiza una revisión de la literatura para identificar los métodos existentes para el monitoreo remoto de calidad de agua subterránea en tiempo real y considerarlas en la presentación de la propuesta de monitoreo remoto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Evaluar el riesgo de contaminación del acuífero Patiño, utilizando la metodología DRASTIC y presentar una propuesta para el monitoreo continuo de la calidad de agua subterránea en las áreas urbanas como Asunción y Gran Asunción.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Modificar el método DRASTIC para crear el mapa de riesgo de contaminación del acuífero Patiño.
- Calibrar el método DRASTIC modificado para crear mapas de riesgo de contaminación por dos diferentes contaminantes Nitrógeno total y Coliformes totales.
- Crear mapas para identificar las zonas de mayor riesgo de contaminación.
- Comparar los mapas de riesgo de contaminación con el fin de determinar la existencia de una diferencia significativa entre un mapa y otro.
- Seleccionar pozos para realizar una campaña de análisis de calidad de agua subterránea.
- Presentar un diseño de sistema de monitoreo remoto de la calidad de agua subterránea en las áreas urbanas como Asunción y Gran Asunción.

1.2 Estructura de la Tesis

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presenta la metodología elaborada y los resultados de los mapas de riesgos del acuífero Patiño. En el capítulo 3 se propone una selección de pozos para realizar una campaña de análisis de calidad de agua subterránea en las zonas con mayores índices de riesgo de contaminación identificados, utilizando el algoritmo NSGA-II. En el capítulo 4 se presenta un diseño de sistema de monitoreo remoto de calidad de agua subterránea para Asunción y Gran Asunción; y en el capítulo 5 las conclusiones y trabajos futuros.

Capítulo 2

RIESGO DE CONTAMINACIÓN

Las aguas del acuífero Patiño abastecen, de alguna u otra forma, a la zona urbana más grande y densamente poblada del país que abarca Asunción y las demás ciudades de los departamentos Central, y algunas del departamento de Paraguari, con más de 2.976.400 habitantes [dge12a]. Además de esta realidad demográfica, el acuífero abastece de agua a una gran parte del sector comercial, industrial y agropecuario de la zona. Dada su ubicación geográfica y sus condiciones geológicas [Fig07], el acuífero corre el riesgo de contaminación constante por los vertidos sobre la napa freática de los diferentes sectores económicos. Aparte de los desechos/vertidos de los sectores económicos, existe la carga orgánica de los desechos humanos, que es una constante, sobre el acuífero debido a que la zona tiene muy poca cobertura de desagüe cloacal (Figura 2.9).

La dependencia de la población sobre el acuífero Patiño no es nada despreciable ya que la mayoría de la población depende del acuífero para agua potable. Solo un porcentaje reducido de la población cuenta con abastecimiento de agua potable proveída por la Empresa de Servicios Sanitarios del Paraguay (ESSAP), concentrado básicamente en la Capital. Las zonas de Limpio, San Antonio, Ñemby, Ypané, Luque, San Lorenzo, Capiatá, Fernando de la Mora, Mariano Roque Alonso, entre otros municipios, dependen de agua suministrada por Juntas de Saneamiento o por aguaterías privadas. Estos entes secundarios son responsables del abastecimiento de agua del 72,4% de las viviendas del departamento central [mop10], y extraen caudales de agua en su mayor parte del subsuelo, que luego son distribuidos, con muy poco tratamiento sanitario, a las residencias del área. Otra cifra alarmante, es la del desagüe sanitario, que indica que el 93,1% de las viviendas en el área del acuífero dependen de cámaras sépticas o pozos ciegos [dge12b] para desechar los residuos cloacales. Todos estos puntos pueden ser considerados posibles puntos de contaminación.

El agua subterránea del acuífero Patiño se utiliza en gran escala para el consumo humano, por ello, realizar un estudio del riesgo de contaminación en la zona se constituye en una herramienta indispensable para la toma de decisiones referentes a la protección de este recurso natural.

El riesgo es definido por [dAS] como la probabilidad de ocurrencia de una consecuencia ambiental en un sitio particular, durante un tiempo de exposición determinado y se obtiene de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad. La vulnerabilidad puede ser intrínseca cuando es condicionada por las características hidrogeológicas del terreno, y específica cuando se consideran factores externos como el propio contaminante [MF98]. Por lo tanto, la vulnerabilidad específica incluye el concepto de riesgo, cuando se refiere al peligro de deterioro en relación a sustancias contaminantes específicas [Aug08]. En este trabajo se define riesgo de contaminación debido a la inclusión de parámetros de índole antropogénico.

El grado de vulnerabilidad y riesgo pueden expresarse mediante un índice, y calculado para crear mapas de riesgos de contaminación. Dichos mapas son herramientas de toma de decisión para reguladores, planificadores e inversionistas, en cuanto a nuevas propuestas de desarrollo, de control de contaminación y de monitoreo de la calidad del agua subterránea [VT10].

En este trabajo se elaboraron mapas de riesgo de contaminación del acuífero Patiño basado en el análisis de datos existentes sobre la hidrogeología de la región y aplicando una modificación del modelo DRASTIC original propuesto por Aller et al. [ALPB87]. Se incorporaron parámetros antropogénicos como el uso de la tierra (L), la densidad de pozos ciegos (P) y las vías principales de transporte (VP). El índice de riesgo fue calibrado con valores de concentración de Nitrógeno total (N_T), que es la suma de Nitritos y Nitratos, y además las concentraciones de Coliformes totales (C_T).

En Paraguay, estudios anteriores han mencionado el peligro a la contaminación del agua subterránea del acuífero Patiño. Específicamente en el 2007, el proyecto “Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - acuífero Patiño” [ckc07] indicó que las actividades humanas favorecen la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. El estudio identificó diferentes tipos de contaminaciones: por actividades domésticas, agrícolas, ganaderas, industriales, por pozos mal construidos y/o abandonados, por sistemas de vertido de aguas residuales, por pozos de inyección, por vertido de basuras, entre otros.

Pero hasta el momento no se ha hecho un análisis detallado y exhaustivo sobre los riesgos de contaminación del agua subterránea en Paraguay, sólo estudios

anteriores que fueron hechos a pequeña escala o con un análisis muy básico de la vulnerabilidad a la contaminación. Entre ellos cabe mencionar el proyecto “Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA (FEHS)” [sen01], realizado en el año 2001, donde se estudió el acuífero Patiño a través de una Zona Piloto ubicada al sudeste de Asunción, que abarcó una extensión aproximada de km^2 (entre la cuenca de los arroyos Mbocayaty y Ñemby) donde se determinó la vulnerabilidad en dicha área usando los métodos GOD [FH88] y DRASTIC [ALPB87]. Por otra parte, el trabajo de grado denominado “Estudio de la Contaminación del acuífero Patiño” [CLCR06], realizado en el año 2006, presentó un panorama de la situación del acuífero mediante la determinación cuantitativa de las áreas con presencia de agua salada, concentraciones de nitratos, nitritos y coliformes. Por último, el “Estudio de la Vulnerabilidad Ambiental de los Acuíferos en las Áreas Urbanas de San Juan Bautista e Itauguá” [CV11], realizado en el año 2011, presentó trabajos de campo consistentes en el análisis de geofísica de superficie, relevamiento de informaciones de pozos someros y profundos, y la toma de análisis de muestras de agua (contenido de nitratos, nitritos, coliformes totales y coliformes fecales) para determinar la vulnerabilidad en el área de Itauguá. Los estudios mencionados fueron realizados en áreas puntuales, sin abarcar la totalidad del acuífero Patiño, por lo que aún no se cuenta con un estudio de vulnerabilidad que lo cubra en toda su extensión y con índices específicos. En este contexto, los resultados obtenidos en el presente estudio se convierten en un buen punto de partida para la realización de trabajos de investigación, encaminados a la protección de esta prioritaria fuente de agua.

En este capítulo se presentan los principales conceptos teóricos sobre el método DRASTIC, y la metodología propuesta para determinar el riesgo de contaminación y elaborar dos mapas de riesgo de contaminación del acuífero Patiño. Además se verificó si existe alguna diferencia estadística entre los diferentes mapas creados y determinar si, un mapa de riesgo de contaminación, calibrado usando valores de un contaminante específico, puede predecir o no el riesgo de contaminación por otro contaminante.

2.1 DRASTIC

DRASTIC es una metodología para evaluar sistemáticamente la contaminación de un área [ALPB87], utilizada para realizar mapas donde se visualizan las zonas más vulnerables a la contaminación de un acuífero basado en datos hidrogeológicos. Fue desarrollado en el año 1987 por la Agencia de Protección Ambiental de Esta-

dos Unidos (US EPA por sus siglas en inglés), con el objeto de evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos. Es uno de los métodos más empleados para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero [KKB⁺94, PAL06].

DRASTIC es el acrónimo en inglés de un Índice (I) que involucra siete parámetros hidrogeológicos (Figura 2.1.a): profundidad del agua subterránea (D), recarga (R), litología del acuífero (A), tipo de suelo (S), topografía (T), impacto de la zona vadosa (I) y conductividad hidráulica del acuífero (C). Los valores físicos que describen los parámetros son reemplazados por calificaciones con valores del 1 al 10 (Figura 2.1.b). Cada parámetro es multiplicado por un peso ponderado que se ha determinado, basándose en el juicio de los autores de este método, empleando la siguiente ecuación lineal:

$$I = \sum_{i=1}^7 R_i \cdot W_i \quad (2.1)$$

donde I es el índice de vulnerabilidad intrínseca, “ R ” y “ W ” se refieren a la calificación y al peso respectivo para cada parámetro. Los siete parámetros considerados son los mencionados anteriormente, los pesos y las calificaciones propuestas por Aller et al. [ALPB87] se muestran en la Tabla 2.1.

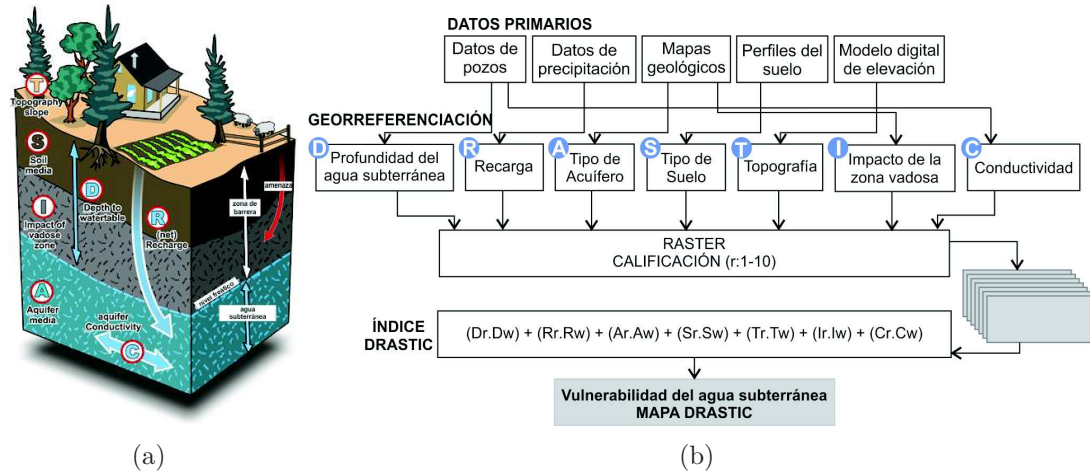


Figura 2.1: Esquema DRASTIC.

(a) Parámetros DRASTIC. (b) Metodología para el análisis de vulnerabilidad de aguas subterráneas utilizando el modelo DRASTIC propuesto por Aller et al. [ALPB87].

Los valores o índices de vulnerabilidad DRASTIC van de un mínimo de 23 a un máximo de 230, utilizando la ecuación 2.1 con las calificaciones y pesos ponderados (Tabla 2.1). El método califica a la vulnerabilidad en forma cualitativa y su mayor utilidad es que permiten realizar comparaciones relativas dentro de una misma región, o entre regiones distintas.

Tabla 2.1: Calificaciones y pesos de los parámetros DRASTIC
propuestos por Aller et al. [ALPB87]

(D) Profundidad del agua subterránea. Peso = 5		(R) Recarga Peso = 4		(A) Litología del acuífero Peso = 3		
Rango (m)	Calificación	Rango (pulgadas)	Calificación	Tipo de Acuífero	Valoración	Valor típico
0 - 1,524	10	0 - 2	1	Lutita masiva	1 - 3	2
1,524 - 4,572	9	2 - 4	3	Metamórfica/Ígnea	2 - 5	3
4,572 - 9,144	7	4 - 7	6	Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 - 5	4
9,144 - 15,24	5	7 - 10	8	Till glacial	4 - 6	5
15,24 - 22,86	3	10+	9	Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5-9	6
22,86 - 30,48	2			Arenisca masiva	4-9	6
30,48+	1			Caliza masiva	4-9	6
(S) Tipo de suelo Peso = 2		(T) Topografía Peso = 1		Arena o grava		
Tipo de Suelo	Calificación	Rango (porcentaje)	Calificación	Basaltos	2-10	9
Delgado o ausente	10	0 - 2	10	Caliza kárstica	9-10	10
Grava	10	2 - 6	9	(I) Impacto de la zona vadosa. Peso = 5		Valoración
Arena	9	6 - 12	5	Capa confinante	1	1
Agregado arcilloso o compacto	7	12 - 18	3	Cieno-arcilla	2-6	3
Arenisca margosa	6	18+	1	Lutita	2-5	3
Marga	5	(C) Conductividad hidráulica Peso = 3		Caliza	2-7	6
Limo margoso	4	Rango (m/d)	Calificación	Arenisca	4-8	6
Arcilla margosa	3	0,04 - 4,08	1	Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4-8	6
Estiércol-cieno	2	4,08 - 12,22	2	Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4-8	6
Arcilla no compactada y no agregada	1	12,22 - 28,55	3	Metamórfica/Ígnea	2-8	4
		28,55 - 40,75	6	Grava y arena	6-9	8
		40,75 - 81,49	8	Basalto	2-10	9
		81,49+	10	Caliza kárstica	8-10	10

Las ponderaciones del modelo DRASTIC tradicional pueden contener cierta ambigüedad [HWT12] porque los parámetros tienen diferente influencia sobre la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en diferentes regiones o áreas de estudios. Por ejemplo en el estudio realizado por Huan et al. [HWT12], el tipo de suelo y tipo de acuífero, fueron afectados altamente con la concentración de nitratos en las aguas subterráneas, teniendo bajas ponderaciones. Sadat-Noori and Ebrahimi [SNE16], indicaron que al incorporar el uso de técnicas estadísticas se optimizan las calificaciones de los parámetros del modelo DRASTIC, para obtener un mapa de vulnerabilidad más preciso. Por esto, varios investigadores han desarrollado modelos usando diferentes métodos.

Algunos de los estudios notables, en donde se agregaron nuevos parámetros al modelo para luego compararlo con contaminantes, incluyen los de Secunda et al. [SCM98] y Sadat-Noori and Ebrahimi [SNE16] donde se agregó el uso de la tierra, Secunda et al. [SCM98] compararon el resultado del modelo con la concentraciones de nitratos, y Sadat-Noori and Ebrahimi [SNE16] compararon el modelo con concentraciones de cloruro en aguas subterránea. Dixon[Dix05]

y Saha and Alam [SA14] , incorporaron la aplicación del uso de pesticidas y la estructura del suelo, Dixon [Dix05], desarrolló tres modelos difusos, para crear mapas de sensibilidad y compararlos con el índice DRASTIC; los modelos se compararon con el índice DRASTIC, donde se obtuvieron mejores resultados cuando se compararon con los datos de campo. Saha and Alam [SA14], elaboraron tres mapas de vulnerabilidad aplicando los modelos (DRASTIC, Pesticide DRASTIC y Pesticide DRASTIC LU) y compararon con la concentración de NO₃ en las aguas subterráneas; los valores de índices y NO₃ revelaron una mejor correlación (0,409) con el modelo Pesticide DRASTIC. Ribon et al. [RRF10], evaluaron la vulnerabilidad del acuífero Morroa en Colombia. Identificaron la vulnerabilidad intrínseca que indica la susceptibilidad del agua subterránea a ser contaminada frente a los contaminantes generados por actividades humanas en función de las características físicas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de un área y la vulnerabilidad específica es la susceptibilidad del agua subterránea frente a un contaminante particular o a un grupo de contaminantes, tomando en cuenta las propiedades de éstos y su relación con los diversos componentes de la vulnerabilidad intrínseca. Compararon los mapas de vulnerabilidad obtenidos; el mapa de vulnerabilidad específica indicó una alta vulnerabilidad a plaguicidas, superior a la vulnerabilidad intrínseca.

Otras modificaciones de DRASTIC fueron realizadas en la región; específicamente en Brasil, Nobre et al. [NRFM⁺07] adoptaron la metodología de lógica difusa para evaluar el índice potencial de la fuente contaminante. Realizaron una modelación numérica para la delimitación de zonas de captura, para evaluar los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas e identificar las áreas que deben ser priorizadas para el monitoreo y la restricción en el uso de aguas subterráneas. Adicionaron los parámetros como recarga artificial, uso de la tierra y cobertura vegetal. Se suprimió el parámetro impacto de la zona vadosa, ya que era parte de los tipos de acuífero en el caso de dicho área de estudio. Se implementó un índice de calidad del agua subterránea (GWQI), basado en nitrato y cloruro según lo propuesto por Melloul y Colin [MC98]. El Índice de riesgos se evaluó con el Índice de calidad del agua subterránea y obtuvieron una correlación positiva con el índice de vulnerabilidad específica.

También otros estudios [JAFRAY08, KKB⁺94, KCP⁺15, MDSS01, NPPS14, PAL06, PSKB11, Rup99] han correlacionado y/o modificado el modelo DRASTIC mediante la variación de las calificaciones y ponderaciones respectivas mediante la carga contaminante o la incorporación de nuevos parámetros. Rupert, [Rup99], mejoró el modelo DRASTIC mediante la calibración del sistema de valoración por

puntos medidos de nitrito más nitrato como nitrógeno y adicionando el parámetro uso de la tierra. Vaezihir y Tabarmayeh [VT15], agregaron cinco parámetros como la densidad de la población, recarga de ríos, agricultura, industria, extracción del agua subterránea; Singh et al. [SSKC15], incluyeron el impacto de la actividad humana utilizando el modelo DRASTIC.

2.2 Metodología para Determinar el Riesgo de Contaminación: Método DRASTIC Modificado

En este trabajo se incluyeron algunas modificaciones para capturar el efecto antropogénico y reducir el efecto de información homogénea que existe sobre el acuífero Patiño. Una de las primeras modificaciones fue la eliminación del parámetro (I) impacto de la zona vadosa, debido a que el acuífero Patiño es un acuífero libre, de poca profundidad - en promedio de 13 metros - con relación a la superficie del suelo, y de muy poca heterogeneidad geológica [Fig07] entre estas zonas, siendo que la clasificación de la zona vadosa sería casi igual a la clasificación del acuífero mismo, se eliminó este parámetro. Otros autores como [NRFM⁺07, Rup99, EM90], también han propuesto suprimir dicho parámetro en sus modelos.

También se re-clasificaron las calificaciones asignadas a la conductividad hidráulica (ver calificación propuesta para el parámetro (C) en la Tabla 2.2), utilizando un nuevo rango. Se propone esta calificación ya que los valores de (C) se encuentran entre 0,03 a 3,8 m/d [WMS07], estos valores están incluidos dentro de un solo rango en el modelo DRASTIC; y la intención es agregar heterogeneidad a la clasificación de la conductividad hidráulica.

Se propuso la normalización del valor de Índices de riesgos, ajustándolo a una misma escala del 0 al 100 para poder compararlos. La escala de DRASTIC propuesta por Aller et al. [ALPB87] va de 23 a 230, lo que hace difícil comparar los mapas cuando se agregan o eliminan parámetros. Para la normalización de los mapas se utilizó la ecuación:

$$Indicenormalizado = \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

donde I es el Índice calculado usando los valores de clasificación, I_{min} es el menor valor del Índice, I_{max} es el mayor valor del Índice.

La adición de nuevos parámetros antropogénicos: el uso de la tierra, representado por “L” (ver Figura 2.8.a), la recarga artificial, incluyendo al mapa de recarga de precipitaciones propuesto por Nobre et al. [NRFM⁺07]; y las inclusiones de nuevos parámetros como: densidad de viviendas con pozos ciegos, representado por “P” (ver Figura 2.9.b) y vías principales de transporte, representado por “VP” (ver Figura 2.10.c), como nuevos aportes de este estudio.

Con el objetivo de mejorar la predicción del Índice inicial (I_i) DRASTIC en zonas puntuales con mayor impacto ambiental, y obtener una correlación más elevada entre el Índice y los contaminantes, se aplicó una metodología de calibración, presentada por Panagopoulos et al.[PAL06], donde han modificado el modelo DRASTIC mediante la variación de las calificaciones y ponderaciones respectivas en base a la concentración de Nitratos, algunos parámetros fueron sustraídos de la ecuación DRASTIC y la incorporación del uso de la tierra como parámetro adicional.

La ecuación DRASTIC calibrada incluye además de los parámetros hidrogeológicos, la adición de los parámetros antropogénicos. El peso ponderado fue modificado teniendo en cuenta el coeficiente de correlación entre cada parámetro y la media de los contaminantes (N_T y C_T) y también se reasignó la mayor calificación (10) al rango con mayor valor de la media del contaminante encontrado y, así sucesivamente, se reasignaron las demás calificaciones. La ecuación a calibrar fue,

$$I_r = (D_r \cdot D_w) + (R_r \cdot R_w) + (A_r \cdot A_w) + (S_r \cdot S_w) + (T_r \cdot T_w) + (C_r \cdot C_w) \cdots \\ + (L_r \cdot L_w) + (P_r \cdot P_w) + (VP_r \cdot VP_w) \quad (2.3)$$

donde I_r es el Índice de riesgo, las letras mayúsculas representan a cada parámetro (D) profundidad del agua subterránea, (R) recarga, (A) litología del acuífero, (S) tipo de suelo, (T) topografía, (C) conductividad hidráulica del acuífero, (L) uso de la tierra, (P) densidad de viviendas con pozos ciegos y (VP) vías principales de transporte, y los subíndices r y w representan a la calificación y peso respectivamente.

La metodología fue aplicada a cada contaminante de manera independiente: a) la suma de Nitrógeno en forma de Nitritos y Nitratos, obteniendo así el Nitrógeno total, en 71 puntos de medición (expresado como N_T [mg/L]) y b) Coliformes totales, en 37 puntos de medición (expresado como C_T [UFC/100ml]). Ambos indicadores de contaminación se obtuvieron de [CLCR06]. Las modificaciones se

realizaron utilizando un coeficiente de correlación de Spearman¹ (ρ , rho) para adaptar el Índice DRASTIC a las condiciones del área de estudio, comparando el valor de cada punto de muestreo de los contaminantes N_T y C_T con el valor calculado de Índice.

Para la calibración se utilizó la ecuación 2.3 que incluye, además de los parámetros DRASTIC, los parámetros (L) (ver Figura 2.8.a), (P) (ver Figura 2.9.b) y (VP) (ver Figura 2.10.c) con el fin de expresar la posible carga de contaminantes debido a estas fuerzas antropogénicas. Los rangos y calificaciones para (P) y (VP) son una propuesta de este trabajo.

El último paso de la calibración fue la revisión de los pesos ponderados (w), de la ecuación 2.3, estudiando la correlación de cada parámetro con las concentraciones de N_T y C_T .

Posteriormente se realizó la comparación de los mapas de riesgos de contaminación obtenidos, calibrado con Nitrógeno total (N_T) y Coliformes totales (C_T). El conjunto de datos utilizado para el análisis geoestadístico corresponde a los valores del Índice (I) de los mapas.

Los valores de los parámetros utilizados para calcular el índice DRASTIC corresponden a datos existentes sobre la hidrogeología de la región realizada por estudios anteriores [ckc07, sen01, CLCR06]. A partir de los datos, fueron creados los mapas para cada parámetro, poseen un ancho de celda de 87,5 m. en una malla de 684x615 debido a que se utilizó la escala base del DEM (Modelo Digital de Elevación), de los cuales 152.626 celdas se encuentran en el área del acuífero Patiño. A continuación, se describen los diferentes datos utilizados para obtener el índice de riesgo de contaminación del acuífero Patiño.

Profundidad del agua subterránea (D)

El mapa de profundidad del agua subterránea (D)(Figura 2.2) se determinó utilizando los valores de niveles estáticos (NE) de 35 piezómetros realizados por el Consorcio CKC-JNS para el proyecto “Estudio de políticas y manejo ambiental de aguas subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción (acuífero Patiño)”, correspondientes al año 2007 [ckc07]. Específicamente, se interpolaron los valores del 2007 usando el método de Co-Kriging² con otras mediciones de profundidad de la napa freática realizadas en el año 2013 (36 valores de NE). Con esta

¹ ρ (rho) es una medida de la correlación entre dos variables, es el resultado del coeficiente de correlación de Spearman y oscila entre -1 y +1, donde $\rho=0$ (cero) significa no correlación y $\rho=1$ (uno) significa perfecta correlación entre las variables.

²La interpolación cokriging es utilizada para obtener estimaciones de la propiedad de interés cuando se dispone de observaciones de otras variables relacionadas con la variable en estudio.

técnica se obtuvieron nuevos valores partiendo del conocimiento de un conjunto de datos (de los años 2007 y 2013), y se estimaron las profundidades de la napa freática para todo el acuífero. Los valores interpolados se encuentran entre 0,8 y 31 metros.

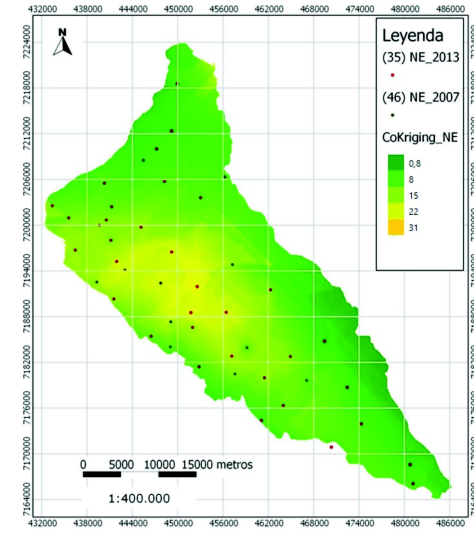


Figura 2.2: Mapa resultante de la interpolación Cokriging de 46 piezómetros utilizados con los valores de NE (2007 y 2013).

Recarga (R)

El mapa de recarga (R) (Figura 2.3) se realizó combinando la recarga de precipitaciones con la recarga artificial y el uso de la tierra. Los datos de la precipitación fueron descargados de la base de datos del *Climate Research Unit* (CRU) [oEA] que contiene una serie de datos globales sobre estaciones de pluviometría que se han ido compilando y actualizando mes a mes, obtenidos a partir de la interpolación entre las estaciones. Los valores utilizados para la precipitación natural fueron de las estaciones de pluviometría de Asunción y otras correspondientes al área del acuífero Patiño, recogidos durante un periodo de 39 años (1970-2009). Se calculó el promedio de precipitaciones para el área de estudio, Noroeste: 1344 mm, Noreste: 1383 mm, Sureste: 1439 mm y se estableció una recarga natural del 9% sobre las precipitaciones, basado en lo propuesto por [MDBB07].

Otra fuente de recarga en las zonas urbanas son las fugas de las tuberías de abastecimiento de agua y alcantarillado, denominado recarga artificial. Se consideró el mapa de recarga mediante la combinación del mapa de precipitación con el mapa uso de la tierra utilizando la siguiente ecuación, propuesta por

[NRFM⁺07]:

$$R = X\%P + R_A \quad (2.4)$$

donde R es la recarga (mm/año), X es el porcentaje de recarga de la precipitación ($X=9\%$ en este estudio), P es la precipitación (mm/año), y R_A es la recarga artificial. Este último dato se calculó como el excedente de la distribución y la facturación de agua potable en el año 2011 por ESSAP [dge12a]. Este cálculo distribuido por las zonas urbanas del área de estudio dio una recarga $R_A=66$ mm/año. Los valores de recarga final del mapa son presentados en la Figura 2.3 y se encuentran entre 121 y 197 mm.

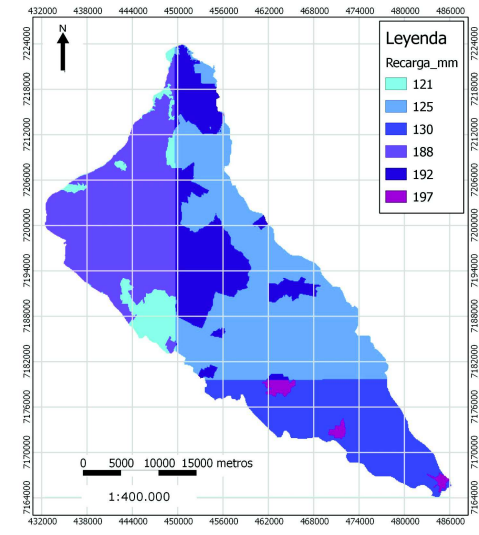


Figura 2.3: Mapa de recarga con valores en mm.

Litología del acuífero (A)

Para el mapa de la litología del acuífero (A), se obtuvieron informaciones de imágenes escaneadas de los perfiles de pozos con que cuenta el SENASA y de los perfiles de piezómetros construidos por el Consorcio CKC-JNS para el proyecto Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana (2007) [ckc07]. La metodología DRASTIC [ALPB87] clasifica diez tipos de acuíferos, mientras que los encontrados en los 192 perfiles de pozos correspondientes al acuífero Patiño no coincidían con el nombre exacto de la metodología, razón por la que se optó por comparar y generalizar principalmente en: arenisca y arena (ver Tabla 2.2). Las calificaciones para arenas y areniscas (8 y 9 respectivamente) fueron asignadas según las calificaciones máximas especificadas por el método DRASTIC [ALPB87]. El mapa de la litología del acuífero

se observa en la Figura 2.4, totalizando 192 perfiles de pozos y piezómetros georreferenciados, cada uno con sus respectivas características.

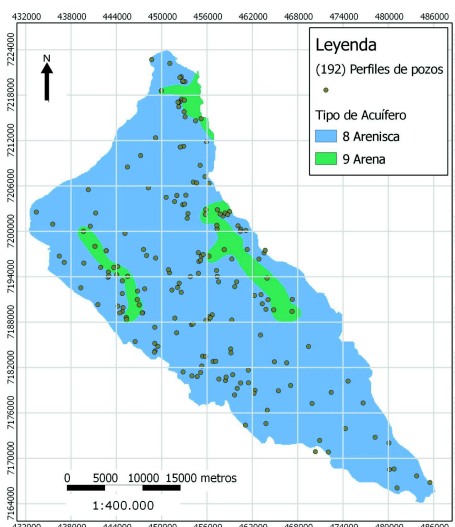


Figura 2.4: Mapa de litología del acuífero, 192 pozos y piezómetros georreferenciados.

Tipo de suelo (S)

El mapa de tipo de suelo (S) se calculó tomando como referencia el Mapa de reconocimiento de suelos de la Región Oriental del Paraguay, elaborado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Banco Mundial, en el año 1995 [LG95]. En la Figura 2.5 se observa el mapa de tipo de suelo, donde la litología predominante es la francosa fina y en menores zonas se encuentran la arcillosa fina y arena.

Topografía o pendiente (T)

La topografía o pendiente del terreno (T) (Figura 2.6) se obtuvo a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés), descargado en formato ráster ³ para el área de estudio, de la página web del Centro de Investigación Internacional (CGIAR-CSI, *Consortium for Spatial Information*) [oEA]. El CGIAR-CSI permite descargar un Modelo Digital de Elevación SRTM con resolución espacial de 90 metros aproximadamente, en formato GeoTiff y sistema de coordenadas geográficas WGS84. A partir del DEM se calculó el valor de la

³El formato ráster es un tipo de capa de información espacial que divide el espacio en un conjunto regular de celdas, cada una de estas celdas contiene un número que puede ser el identificador de un objeto (si se trata de una capa que contiene objetos) o del valor de una variable (si la capa contiene esta variable).

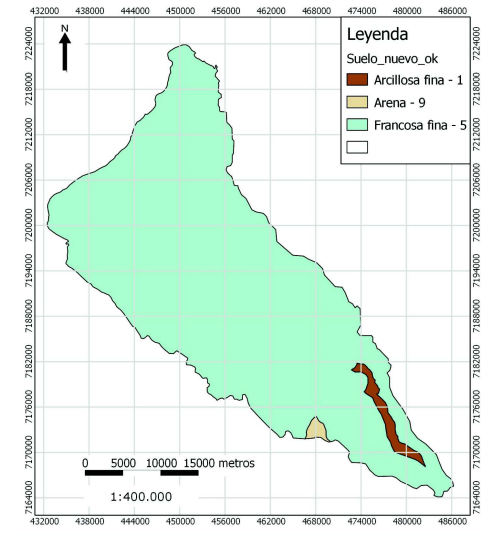


Figura 2.5: Mapa de tipo de suelo en el área del acuífero Patiño

pendiente con la herramienta análisis del terreno del software QGIS[QGi11]. La Figura 2.6 muestra la inclinación del terreno, calculando la elevación dividido por el avance, multiplicado por 100%. Se observa una topografía suave en general, salvo en la zona de la cordillera de los Altos, y en los cauces de los arroyos y humedales que tienen una depresión del terreno.

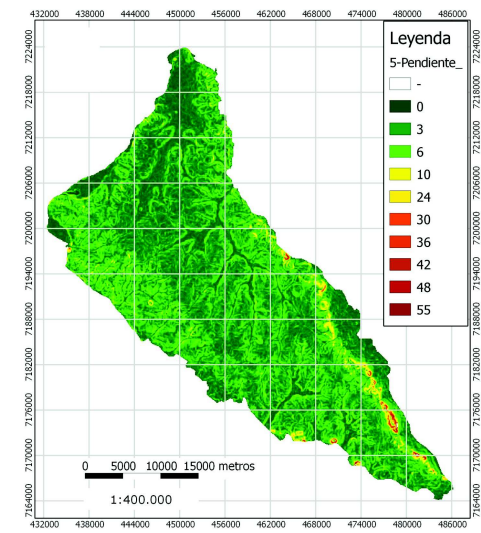


Figura 2.6: Mapa de topografía del terreno con valores en porcentaje.

Conductividad hidráulica (C)

Los datos de conductividad hidráulica (C) fueron obtenidos del proyecto Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana

(2007) [WMS07], donde se recopiló información de ensayos de bombeos con que contaba el SENASA, en una tabla con 51 resultados de los análisis y valores correspondientes a la conductividad hidráulica. Además, del mismo informe se obtuvieron otros 10 resultados de pruebas realizadas en el 2007 por el mismo proyecto. Totalizando 61 valores georreferenciados de conductividad hidráulica. Se aplicó el método de interpolación cokriging para realizar el mapa (Figura 2.7), obteniendo valores entre 0,1 y 3,2 m/d, donde los más altos se encuentran entre las zonas de Areguá e Itauguá.

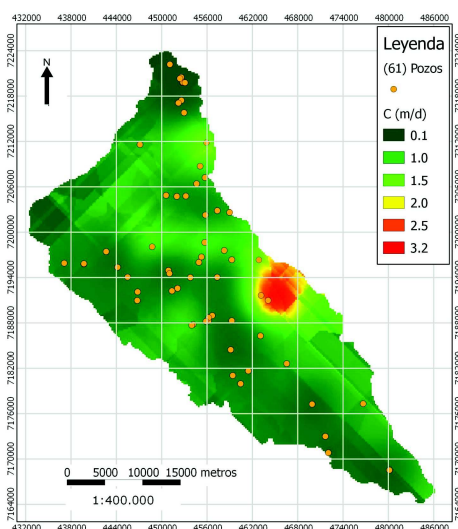


Figura 2.7: Mapa de conductividad hidráulica (m/d)

Uso de la tierra (L)

El mapa de uso de la tierra (Figura 2.8) indica las áreas urbanas, abarcando 71% del área de estudio, y 29% restante corresponde a los bosques, cuerpos de agua, área de reforestación, sabana inundable y la tierra cultivada. Los datos de uso de la tierra, fueron obtenidos del mapa de cobertura de la tierra Paraguay, elaborado por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA-UNA) y la *Forestry and Forest Products Research Institute* (FFPRI) en el año 2013 [fca13].

Densidad de viviendas con pozos ciegos (P)

Los datos de la densidad de viviendas con pozos ciegos (P) se obtuvieron de los mapas temáticos incluidos en la base de datos del proyecto Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana [WM07]. La densidad de pozos (Figura 2.9) hace referencia a la cantidad de residencias que no

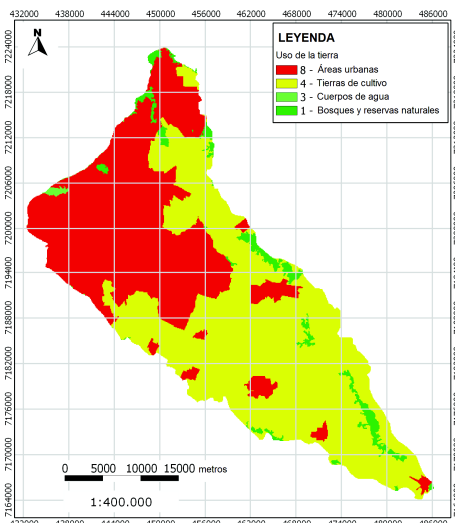


Figura 2.8: Mapa del uso de la tierra.
Extraído del Mapa de Cobertura de la Tierra Paraguay [fca13].

cuentan con una conexión de alcantarillado de aguas residuales. Estos valores son claros indicadores de posibles puntos de contaminación. Sobre el acuífero Patiño, se encuentran valores de 0 a 15 viviendas por hectáreas con pozo ciego. Las mayores densidades corresponden a: Ypané, Fernando de la Mora, Lambaré, San Lorenzo, Guarambaré, Villa Elisa, Ñemby, Limpio, Yaguarón, Pirayú y Luque.

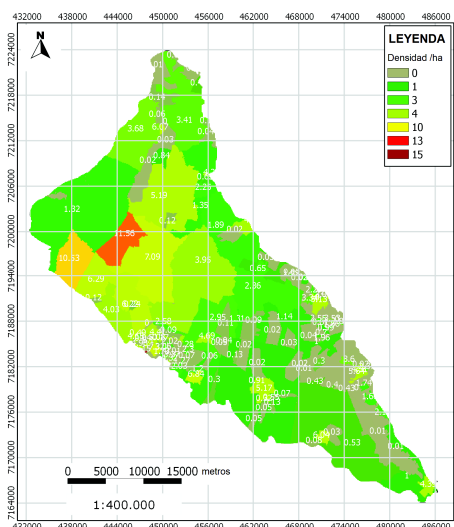


Figura 2.9: Mapa de la densidad de viviendas con pozos ciegos/ha.
Extraído del Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño[ckc07].

Vías principales de transporte (VP)

En el mapa de vías principales de transporte (Figura 2.10) se consideraron las vías terrestres (rutas pavimentadas principales) y fue utilizada como un indicador de puntos que puedan ser focos de contaminación, porque éstas influyen en la localización de fuentes contaminantes como viviendas, fábricas, estaciones de servicios, zonas comerciales, etc. situados en las cercanías de las rutas. Se consideró un área de influencia (*buffer*) de 1000 metros alrededor de las vías principales. La selección de esta área se debió a que se encontró una mayor correlación entre el *buffer* de 1000 metros con los puntos de las concentraciones de contaminantes (N_T y C_T). Para determinar el área de influencia se realizaron pruebas con *buffers* de 500, 750, 1250 y 1500 metros donde se constató que la mayor correlación con los puntos de las concentraciones de contaminantes ocurre con un valor de 1000 m.

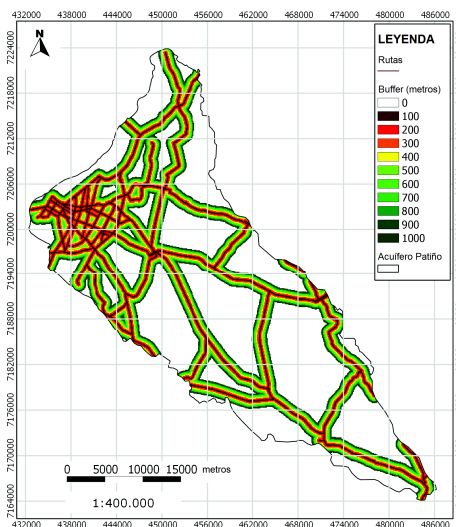


Figura 2.10: Mapa de las vías principales de transporte.
Extraído del Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas
en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño[ckc07].

Aplicando la metodología para determinar el riesgo de contaminación, utilizando una modificación del método DRASTIC, fueron creados dos mapas de riesgos del acuífero Patiño, uno calibrado con las concentraciones de N_T y el otro con C_T . Posteriormente se realizó la comparación de los mapas según la metodología que se detalla a continuación.

2.2.1 Análisis Comparativo

Para el análisis comparativo se utilizó el conjunto de datos de los mapas de riesgos de contaminación por N_T y C_T , que contienen 152.626 valores de Índices de

riesgo (I- N_T y I- C_T) normalizados de 0 a 100. Primeramente el análisis exploratorio consistió en la comparación de: histogramas, gráficos de probabilidad normal, resumen estadístico para identificar el promedio, la desviación estándar, el coeficiente de variación, la mediana, los valores mínimos, máximos y los cuartiles de las dos distribuciones, y diagramas de dispersión; cada uno de estos correspondiente a la distribución de datos del mapa de riesgo calibrado con las concentraciones de N_T y C_T .

Para complementar las estadísticas globales, se crearon variogramas para estudiar la variabilidad de cada parámetro (I- N_T o I- C_T) con distancia y dirección. El variograma se representa por la siguiente ecuación:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{|2N(h)|} \sum_{j=1, j \neq i}^{j=N(h)} (S_i - S_j)^2 \quad (2.5)$$

donde la suma se realiza sobre todos los pares a una distancia h , y N es el número de pares de valores a una distancia h . Los valores S_i y S_j referencian a los parámetros siendo comparados, en este caso solo se compararon los valores de I- N_T y I- C_T consigo mismos. El variograma se estudió en el sentido omnidireccional, donde el ángulo de búsqueda fue de 360 grados a una distancia entre 0 a 15 Km, esta distancia representa el área aproximada de la zonas urbana más grande del acuífero (el Gran Asunción).

La última comparación que se realizó en este estudio corresponde al cálculo del ratio que describe cuantas celdas parecidas existen dentro de todo el área del acuífero en diferentes radios de búsqueda. Para calcular el ratio, se realizó una diferencia absoluta entre cada mapa de riesgos (N_T y C_T). Para cada celda se calculó la diferencia entre I- N_T y I- C_T , con diferentes radios de búsqueda (a 0, 87, 1700, 4300, 5220, 6525 y 10005 m de distancia). Las celdas con diferencias que estaban por debajo de un valor de ± 5 fueron contadas y divididas por el total de celdas comparadas. Este cálculo sirvió para dar el ratio de celdas similares dentro de un radio de búsqueda particular. La siguiente ecuación explica el cálculo binario,

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n r_j \quad (2.6)$$

donde,

$$r_j = \begin{cases} 1 & \text{si } (|NT_i - CT_j|) \leq 5 \\ 0 & \text{si } (|NT_i - CT_j|) > 5 \end{cases} \text{ para } j = 1, 2, \dots, n \quad (2.7)$$

donde NT_i y CT_j , son los valores de riesgo de contaminación de los mapas en el punto i y los puntos j . El valor de r_j es “1” o “0” y cambia el valor de j ,

que representa la búsqueda dentro de un radio, y n son los números de valores comparados. Los radios de búsqueda fueron de 0, 87, 1700, 4300, 5220, 6525 y 10005 metros.

2.3 Resultados y Discusión

Aplicando la metodología indicada se presentan los resultados de la calibración del I_i DRASTIC con las mediciones de los contaminantes (N_T y C_T).

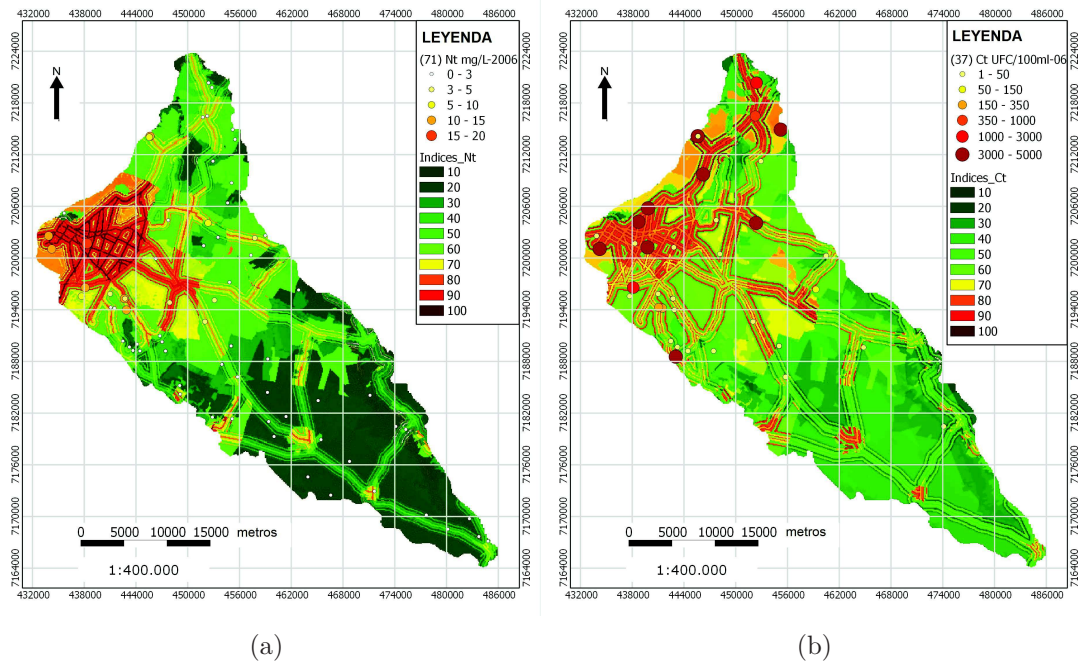


Figura 2.11: Mapas de riesgo de contaminación para el área de estudio.
(a) Mapa de riesgo de contaminación calibrado con N_T (b) Mapa de riesgo de contaminación calibrado con C_T .

El resultado de las calibraciones con la concentración de N_T se visualiza en el mapa normalizado de la Figura 2.11.a, donde el aumento del índice de riesgo es notable en las áreas urbanas. Los índices más altos (70-100) en el mapa normalizado, se encontraron en un 19% del área de estudio, correspondiente a 221 km^2 .

El resultado de las calibraciones con la concentración de C_T se visualiza en el mapa normalizado de la Figura 2.11.b, donde el aumento del Índice de riesgo es notable en toda el área urbana. Los índices más altos (70-100), se encontraron en un 27% del área de estudio, correspondiente a 309 km^2 .

Al comparar los Índices obtenidos con las mediciones de los contaminantes (N_T y C_T) mediante el coeficiente de correlación Spearman (rho o ρ) que responde

si una variable puede ser representada por una función monótona de la otra. Cuando $\rho=0$ (cero) significa que no hay correlación alguna y cuando el valor de correlación se aproxima más a 1 ($\rho=1$), significa perfecta correlación entre las variables, en el contexto de una función monótona. El coeficiente de Spearman es utilizado cuando los datos están agrupados en rangos y la distribución no tiende a la normalidad. La correlación del Índice inicial (antes de calibrar) presentó un coeficiente de correlación ρ casi nulo, del orden de 0,073 lo que indica que el Índice Inicial de DRASTIC hacen una mala aproximación de la realidad con la aplicación de N_T . De igual manera la correlación inicial entre el Índice sin calibración de C_T presentó un coeficiente de correlación ρ del orden de 0,357, que es una mejor correlación en comparación a N_T pero siguió siendo baja.

Tras la adición de los tres parámetros y las subsecuentes calibraciones siguiendo la metodología expuesta, se logró la correlación entre el Índice y la concentración de N_T aumentó resultando el coeficiente de correlación $\rho=0,522$ (Figura 2.12.a). La correlación entre el Índice de riesgo y las concentraciones de C_T también aumentó a un valor de $\rho=0,7$ (Figura 4.b).

Los resultados de la calibración de cada mapa son presentados en la Tablas 2.2 y 2.3 donde se muestran las calificaciones modificadas de los parámetros según las medias de las concentraciones de N_T y C_T respectivamente. Dichas medias no siguen necesariamente el mismo orden ascendente o descendente con la distribución natural de los parámetros. Las calificaciones modificadas máximas (10) se asignaron a la mayor media, sin importar el orden o ubicación dentro de la escala y de esta manera lograr una mayor correlación entre el índice y el contaminante. Se visualizan altas concentraciones de N_T a mayores profundidades, 22,86 - 30,48 metros, y también en bajas profundidades, 1,524 - 4,572 metros. Los valores de concentración de N_T en las arenas y franco fino tienen un rango alto. Las concentraciones altas de C_T fueron encontrados en menores profundidades, 1,524 - 15,24 metros. Los valores de concentración de C_T en las areniscas y franco fino tienen un rango alto.

Las áreas urbanas cuentan con mayor concentración de N_T y C_T ; en baja densidad de viviendas con pozos ciegos se encontraron mayor concentración de N_T , sin embargo, los C_T se encontraron en la mayor densidad de viviendas con pozos ciegos.

Los pesos ponderados finales se comparan en la Tabla 2.4, eliminando y adicionando parámetros a la ecuación 2.3; correlacionando siempre con las concentraciones de N_T y C_T .

Los parámetros profundidad del agua subterránea, litología del acuífero y tipo

de suelo no influyen en la concentración de N_T de las aguas subterráneas en el área de estudio, razón por la que fueron excluidos, además revela que los valores considerados naturales o intrínsecos del acuífero son los que menos aportan al índice. Esto puede tener dos causales: Una puede ser que la cantidad de datos disponibles, crea una homogeneidad espacial que no permite variabilidad espacial significativa. Debido a esta homogeneidad los datos que describen estas variables no aportan al índice substancialmente. Esta explicación puede satisfacer en el caso del tipo de suelo y litología del acuífero, pero no el caso de profundidad del agua subterránea, donde si hay una cantidad razonable de datos (35 puntos). Otra razón, aunque difícil de justificar con los datos disponibles, es que en realidad la capa superficial del suelo no influye en la concentración de N_T de las aguas subterráneas en el área de estudio. Esta misma conclusión fue reportada por otros investigadores [LAP04, MDSS01, PAL06] y se atribuye a la ausencia y reducción de reacciones en el suelo de la zona, debido al exceso de oxígeno; [KCP⁺15], indicaron que los parámetros como la litología del acuífero y el tipo de suelo han influido poco a la contaminación del acuífero.

La explicación estadística del porqué la profundidad del agua subterránea resultó en tener una correlación insignificante, es porque se encontraron valores altos y bajos de N_T en todo tipo de profundidades. Esto demuestra que, a pesar de la profundidad de los acuíferos, estos no se encuentran aislados en su totalidad, manifestando que siempre existe alguna manera de transmisión de contaminantes. Esto concuerda con los estudios de vulnerabilidad realizados [Hir05, MHCBBT⁺06], en los que se plantea la posibilidad de que sustancias nocivas para el agua subterránea lleguen hacia éstas en alguna forma, especialmente si la carga de contaminantes es constante y a largo plazo, como se puede presumir que lo es sobre el acuífero Patiño. En [SA14], mencionaron que cuanto más profundo es el nivel del agua, son mayores las posibilidades de disminución de los contaminantes.

La adición de los nuevos parámetros: densidad de viviendas con pozos ciegos, vías principales y uso de la tierra, presentaron las correlaciones más altas con la concentración de N_T . Estos parámetros determinan la vulnerabilidad específica y están muy ligados a las zonas urbanas, además en estas zonas se encontraron los valores más altos de N_T medidos. La oportunidad de infiltración del agua, y con ella los contaminantes, es alta, debido a la pendiente suave, salvo en la cordillera de los Altos, lo que presentó una correlación significativa con la concentración de N_T . Además, las fluctuaciones de la conductividad hidráulica, con los nuevos rangos y clasificaciones utilizados, influyeron en la concentración de N_T en las

aguas subterráneas.

El análisis de la correlación entre la concentración de C_T y los parámetros litología del acuífero, tipo de suelo y topografía hace concluir que la capa superficial del suelo y la litología del acuífero no influyen en la concentración de C_T de las aguas subterráneas en el área de estudio, tal como en la calibración con N_T ; por lo que, fueron eliminados de la ecuación final de calibración con C_T (ver Tabla 2.4).

En este caso, la profundidad del agua subterránea sí resultó tener una correlación significativa con la concentración de C_T , ya que en varios puntos se presentaron valores altos de C_T a menores profundidades y valores bajos de C_T a mayores profundidades. Esto físicamente puede deberse a que la mayoría de los puntos de contaminación son pozos ciegos que están a diferentes distancias de la napa freática. Los estudios [KCP⁺15] y [SA14] en su evaluación de sensibilidad, revelaron que la profundidad del agua subterránea fue más sensible a la contaminación del acuífero que estudiaron. En [KCP⁺15], mencionaron que esta condición contribuye a una buena probabilidad de transferir el contaminante a través del acuífero debido al alto grado de continuidad espacial entre el suelo y el acuífero.

La adición de los parámetros vías principales y densidad de viviendas con pozos ciegos presentaron las correlaciones más altas con la concentración de C_T . Dichos parámetros están muy relacionados con el contaminante, ya que a mayor densidad de zonas pobladas y pozos ciegos, mayores valores de C_T fueron encontrados.

El uso de la tierra también muestra una correlación significativa, resultando los valores más altos de concentración de C_T en las zonas urbanas. Para este caso la recarga permite la infiltración tanto de agua como de otras sustancias, siendo las zonas con mayor recarga las que presentan índices altos. Estas zonas son las densamente pobladas por que en estas áreas se incluyó el excedente de las fugas de las tuberías de abastecimiento de agua y alcantarillado (la recarga artificial). También las fluctuaciones de la conductividad hidráulica, con los nuevos rangos y clasificaciones utilizados, influyeron en la concentración de C_T en las aguas subterráneas. La conductividad hidráulica influye en el tiempo de transporte de contaminantes.

Tabla 2.2: Calificaciones originales y modificadas de los parámetros DRASTIC según la media de N_T y C_T .

(D) Profundidad del agua subterránea				(R) Recarga			
Rango (m)	Calif. Original	Calif. Modificada NT	Calif. Modificada CT	Rango (pulgadas)	Calif. Original	Calif. Modificada NT	Calif. Modificada CT
0 - 1,524	10	-	-	0 - 2	1	-	-
1,524 - 4,572	9	9	9	2 - 4	3	-	-
4,572 - 9,144	7	3	9	4 - 7	6	7	7
9,144 - 15,24	5	7	10	7 - 10	8	10	10
15,24 - 22,86	3	8	5	10+	9	-	-
22,86 - 30,48	2	10	3				
30,48+	1	-	-				
(A) Litología del Acuífero				(S) Tipo de Suelo			
Tipo de Acuífero	Calif. Original	Calif. Modificada NT	Calif. Modificada CT	Tipo de Suelo	Calif. Original	Calif. Modificada NT	Calif. Modificada CT
Arenisca	8	9	10	Arcilla fina	1	2	-
Arena	9	10	9	Franco fino	5	10	10
				Arena	9	1	-
(T) Topografía				(C) Conductividad hidráulica			
Rango (%)	Calif. Original	Calif. Modificada NT	Calif. Modificada CT	Rango (m/d)	Calif. Propuesta	Calif. Modificada NT	Calif. Modificada CT
0 - 2	10	9	9	0,04 - 0,45	1	9	10
2 - 6	9	10	10	0,45 - 0,9	2	10	9
6 - 12	5	4	5	0,9 - 1,35	3	7	-
12 - 18	3	3	-	1,35 - 3,6	4	6	-
18+	1	5	-	0,9 - 2,25	3	-	9
				2,25 - 3,6	6	-	6

Tabla 2.3: Calificaciones originales, propuestas y modificadas de los parámetros L , P y VP adicionados a DRASTIC según la media de N_T y C_T .

(L) Uso de la tierra				(P) Densidad de viviendas con pozos ciegos			
Uso de la tierra	Calif. Original[1]	Calif. Modificada NT	Calif. Modificada CT	Densidad por ha.	Calif. Propuesta	Calif. Modificada NT	Calif. Modificada CT
Área urbana	8	10	10	0 - 0,001	0	0	0
Bosque	1	2	3	0,001 - 1	2-4	1	2
Cuerpos de agua	3	1	0	1 - 2	5-6	10	9
Reforestación	1	0	0	2 - 3	6	-	5
Sabana inundable	1	0	0	2 - 4	7	4	-
Tierra cultivada	4	3	9	3 - 4	7	-	10
				4 - 5	8-9	2	6
				5 - 7	9	5	-
				5+	10	-	8
				7+	10	8	-
(VP) Vías principales							
Rango (m)	Calif. Propuesta	Calif. Modificada NT	Calif. Modificada CT				
1000+	0	3	4				
901 - 1000	1	2	3				
801 - 900	2	4	1				
701 - 800	3	1	10				
601 - 700	4	9	8				
501 - 600	5	5	2				
401 - 500	6	0	0				
301 - 400	7	7	7				
201 - 300	8	8	6				
101 - 200	9	6	9				
1 -100	10	10	5				

[1] Propuesta por Secunda et al. [SCM98].

Tabla 2.4: Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, incluidos los parámetros L , P y VP para las calibraciones con N_T y C_T .

	Parámetros								
	D_w	R_w	A_w	S_w	T_w	C_w	L_w	P_w	VP_w
Peso ponderado inicial	5	4	3	2	1	3	-	-	-
Peso ponderado final calibración con N_T	0	2	0	0	1	1	3	5	4
Peso ponderado final calibración con C_T	2	3	0	0	0	1	3	4	5

2.3.1 Validación de los Resultados

Los resultados fueron validados mediante comparaciones entre los mapas calibrados por contaminantes y valores de los últimos años correspondientes al monitoreo de piezómetros, realizados en el año 2010 por la Dirección General de Saneamiento Ambiental (DIGESA). Se calculó el coeficiente de correlación de Spearman con un nivel de significancia (α) de 0,01 (1% de probabilidad de observar las diferencias en los datos al azar y utilizado para obtener una mayor confianza en los datos). La correlación entre el mapa de riesgo y la concentraciones de N_T del año 2010 tiene una correlación aún mayor a la que se obtuvo con los datos del 2006, el coeficiente de correlación es de $\rho=0,634$ y $p\text{-value}= 0,001 (< \alpha)$ declarando que existe una significancia estadística, por lo tanto, valida la calibración hecha y justifica la adición de ciertos valores (ver Figura 2.12.a). En comparación, la correlación entre el mapa de riesgo, calibrado con la concentración de C_T del 2006, y la concentraciones de C_T del año 2010, tiene un coeficiente $\rho=0,467$ y $p\text{-value}=0,03 (> \alpha)$ por lo que no se puede declarar significancia estadística, es decir, no se tiene suficiente evidencia para afirmar que existe una relación entre C_T del 2010 y el mapa de riesgo calibrado con C_T del 2006. En la validación, la cantidad de concentraciones de C_T es menor (21) que la concentración N_T (24), y los puntos (piezómetros) están localizados en diferentes lugares.

2.3.2 Comparación de Mapas de Riesgos

En el análisis de la diferencia estadística entre los diferentes mapas de riesgo de contaminación, primeramente, se estudió el centro de la distribución de acuerdo a la mediana y media de los datos. Para el I- N_T los valores se encuentran en 45 y 46 respectivamente; mientras que para el I- C_T se encuentra en 56 para ambos casos por lo que se verifica que una distribución es simétrica y en el caso de I- N_T la distribución es asimétrica positiva.

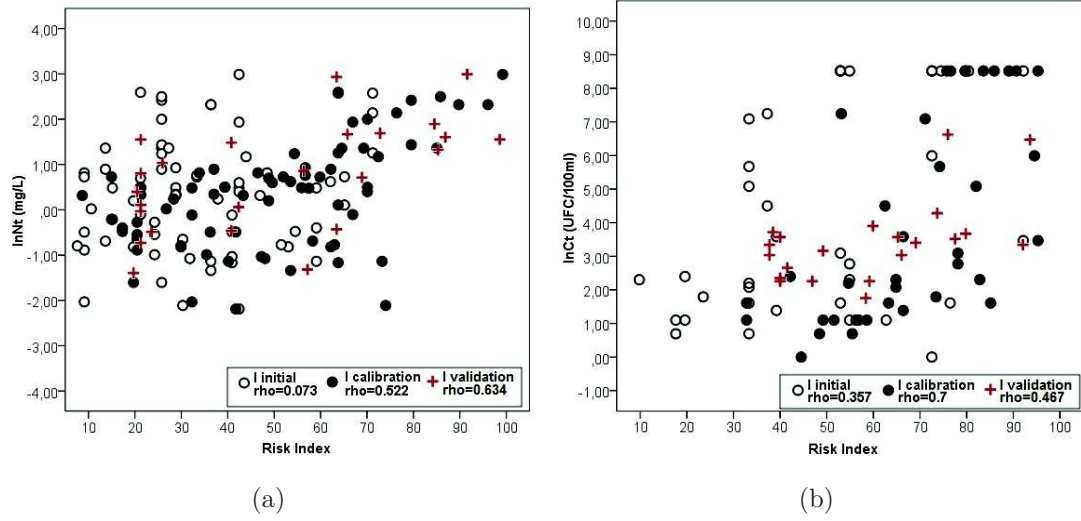


Figura 2.12: Relaciones entre los Índices de riesgo y las concentraciones de N_T y C_T (con transformación logarítmica).

La dispersión de los datos se evaluó mediante la desviación estándar. Como las medias de $I-N_T$ e $I-C_T$ son distintas, es preferible observar la dispersión de acuerdo al coeficiente de variación. Así se observa que la dispersión de $I-N_T$ es relativamente mayor ($CV=0,52$), siendo su desviación estándar equivalente al 52% de la media; mientras que para $I-C_T$, su desviación estándar es el 33% de su media.

El grado de concentración de los valores en el centro de la distribución se obtiene mediante el coeficiente de curtosis. Las curtosis medidas fueron -0,949 y -0,854 (< 0) en las distribuciones de datos de $I-N_T$ e $I-C_T$ respectivamente; indican una distribución dispersa en relación a la media y por lo tanto, presentan una forma acampanada más achatada que lo normal (ver histogramas de la Figura 2.13).

En la frecuencia acumulada de $I-N_T$ e $I-C_T$ se compararon que los índices medianos a altos (> 60) son 28% de todos los datos de $I-N_T$ y para $I-C_T$ son el 42%. Esta diferencia se verificó mediante la prueba de hipótesis para proporciones.

La comparación y además verificación de la relación existente entre dos variables se presenta en la Figura 2.12 con el diagrama de dispersión. Los 152.626 pares de valores de $I-N_T$ e $I-C_T$ presentan una correlación positiva, aunque existe cierta dispersión en la nube de puntos, los mayores valores de $I-N_T$ tienden a estar asociados con los mayores valores de $I-C_T$ y los valores más pequeños de $I-N_T$ tienden a estar asociados con los valores más pequeños de $I-C_T$. Aun así, existe una clara diferencia entre ambas distribuciones, en donde algunos puntos altos de $I-C_T$ están asociados con valores bajos de $I-N_T$.

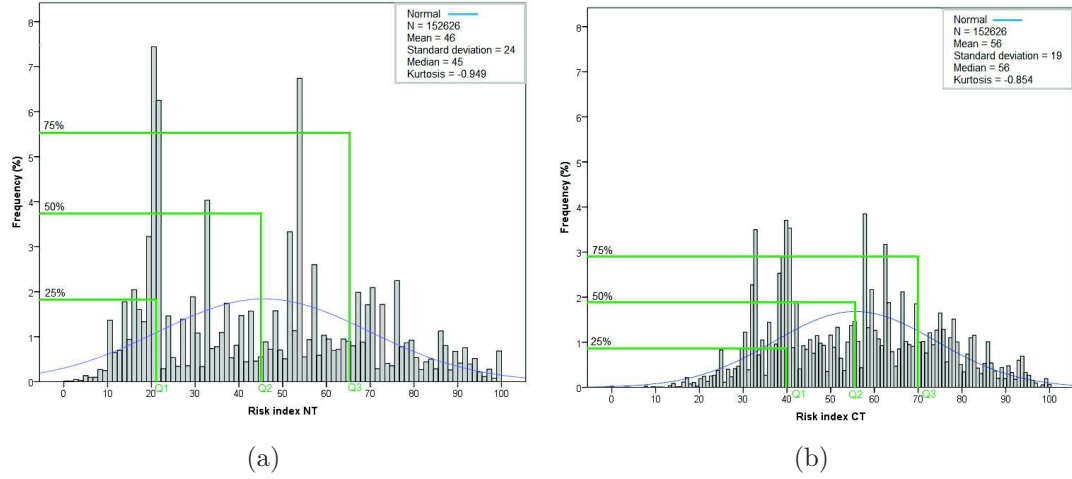


Figura 2.13: Histogramas y resumen estadístico.
(a) $I-N_T$ (b) $I-C_T$

El coeficiente de determinación (R^2) representa el grado de fiabilidad o bondad de ajuste que se puede obtener al predecir una variable basado en el conocimiento que se tiene de otras variables. El R^2 de la comparación entre las dos variables calibradas es de 0,665, lo que indica que el 66,5% de la variabilidad de $I-C_T$ se explica por el valor $I-N_T$. La correlación de Spearman ρ (rho), por su parte, indica un valor de $\rho=0,834$. El estadístico ρ viene dado por la siguiente ecuación:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (2.8)$$

donde D es la diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden de $(x-y)$. N es el número de parejas.

Teniendo en cuenta esta alta correlación y el alto coeficiente de determinación (R^2), se pueden sacar conclusiones rápidas de que los valores de $I-N_T$ e $I-C_T$ son semejantes pero, hay que tener en cuenta que esta relación es de manera global teniendo en cuenta los 152.626 valores de Índices de riesgo ($I-N_T$ e $I-C_T$) analizados de forma global y sin considerar las diferencias espaciales.

El análisis de los variogramas experimentales se presenta en la Figura 2.14; la misma muestra los variogramas omnidireccionales (búsqueda en los 360°). A primera vista se puede apreciar que la variabilidad en $I-C_T$ es menor que la variabilidad de $I-N_T$. También se puede ver que, a la escala de 15 km, la variabilidad de $I-C_T$ llega a una variabilidad máxima mientras que la variabilidad de $I-N_T$ incrementa con la distancia, indicando un modelo de variograma potencial. La baja variabilidad de $I-C_T$ es explicada por los valores presentados en la Figura 2.13, que indican una población con valores de índice de riesgo menos dispersos.

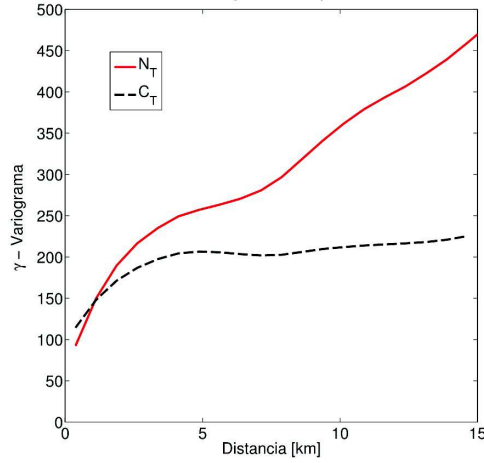


Figura 2.14: Variograma Isotrópico (omnidireccional) de los índices de N_T y C_T hasta una distancia de 15 km.

Los variogramas anisotrópicos (búsqueda con ángulos de 30° de tolerancia) para cada índice de contaminación, son representados en la Figura 2.15. En la Figura 8.a se observa el alto grado de anisotropía en el índice de $I-N_T$, abarcando valores desde 0 a 700, mientras que en la Figura 2.15.b se observa que la variabilidad de índice $I-C_T$ es más homogénea y limitada. La dirección horizontal (-30° a $+30^\circ$) del mapa de $I-N_T$ muestra ser la dirección de mayor variabilidad, mientras que en el variograma de $I-C_T$ pareciera que no hay una preferencia, por lo menos en la distancia calculada de 15 km. Esta anisotropía horizontal puede ser explicada porque los centros urbanos tienen una extensión máxima de 15 km, mientras que, por lo general, en el eje vertical hay más áreas homogéneas con poca incidencia de carreteras o centros urbanos.

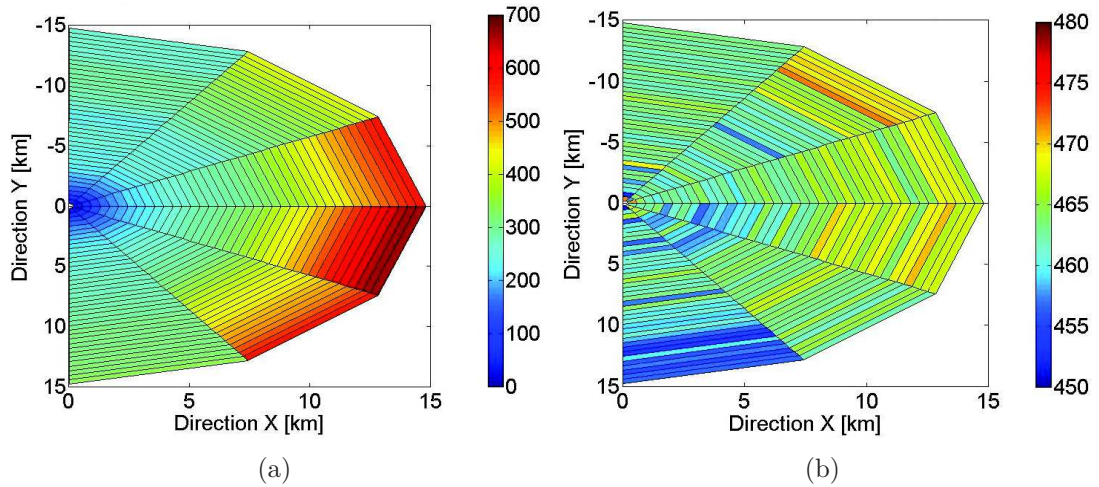


Figura 2.15: Variogramas Anisotrópicos en 2D de los índices.
(a) N_T , y (b) C_T .

Por último, se hizo el cálculo de diferencia absoluta entre los dos mapas de riesgo, usando la ecuación 2.6, para determinar el porcentaje de celdas parecidas dentro de un mismo radio de búsqueda. La Figura 2.16 muestra el porcentaje de áreas (representado en un rango normalizado de 0-1, equivalente a 0-100%) que tienen un mismo valor de índice de riesgo (con una tolerancia de ± 5) dentro de un determinado radio de búsqueda. Por ejemplo, dentro de un radio de búsqueda de 0 m (comparación directa entre los dos mapas), de toda el área del acuífero Patiño (1173 km^2), solo 229 km^2 , es decir, 29938 celdas tienen el mismo valor (20%). Esto implica que menos del 20% del área coincide con el mismo valor de riesgo entre los mapas. Se continuó con un radio de búsqueda de 87 m, donde el 35% de las celdas presentan valores similares. Este cálculo se repitió con valores de búsqueda de 1700, 4300, 5220, 6525 y 10005 m.

Los mapas de la Figura 2.16 muestran que la diferencia absoluta entre los mapas de riesgos no son iguales, incluso a medida que se extiende el área de búsqueda no se logra una igualdad exacta al 100% entre los mapas de riesgos. En la Figura 2.16.a se visualiza la comparación directa entre los mapas e indica un alto porcentaje (80%) de celdas diferentes. En un radio de búsqueda de 87 m predomina la diferencia nula en más de la mitad del área (65%). Aumentando 20 veces más el radio de búsqueda, es decir, 1700 m se encuentra una menor diferencia nula (Figura 2.16.b), en donde el 14% del área es diferente en los mapas y las restantes áreas (86%) presentan mayores similitudes (con valores distintos a 0); a medida que se aumenta el radio de búsqueda a 5520, 6525 y 10005 metros (Figuras 2.16.c y 2.16.d) se visualiza 96% de celdas similares en los mapas comparados, sin embargo, por más que se siga aumentando el radio de búsqueda no se llega a 100% de valores iguales.

La probabilidad de encontrar celdas similares en los diferentes radios de búsquedas se visualizan en la Figura 2.17. En un radio de búsqueda de 0 m existe 20% de probabilidad de encontrar valores de índices similares entre los dos mapas, sin embargo, la probabilidad disminuye a 15% (de encontrar valores de índices similares entre los dos mapas) a medida que aumenta el radio de búsqueda (ver Figura 2.17) y tienen una desviación mucho menor que los radios de búsquedas 0 y 87 m porque sus valores se encuentran más cerca del promedio.

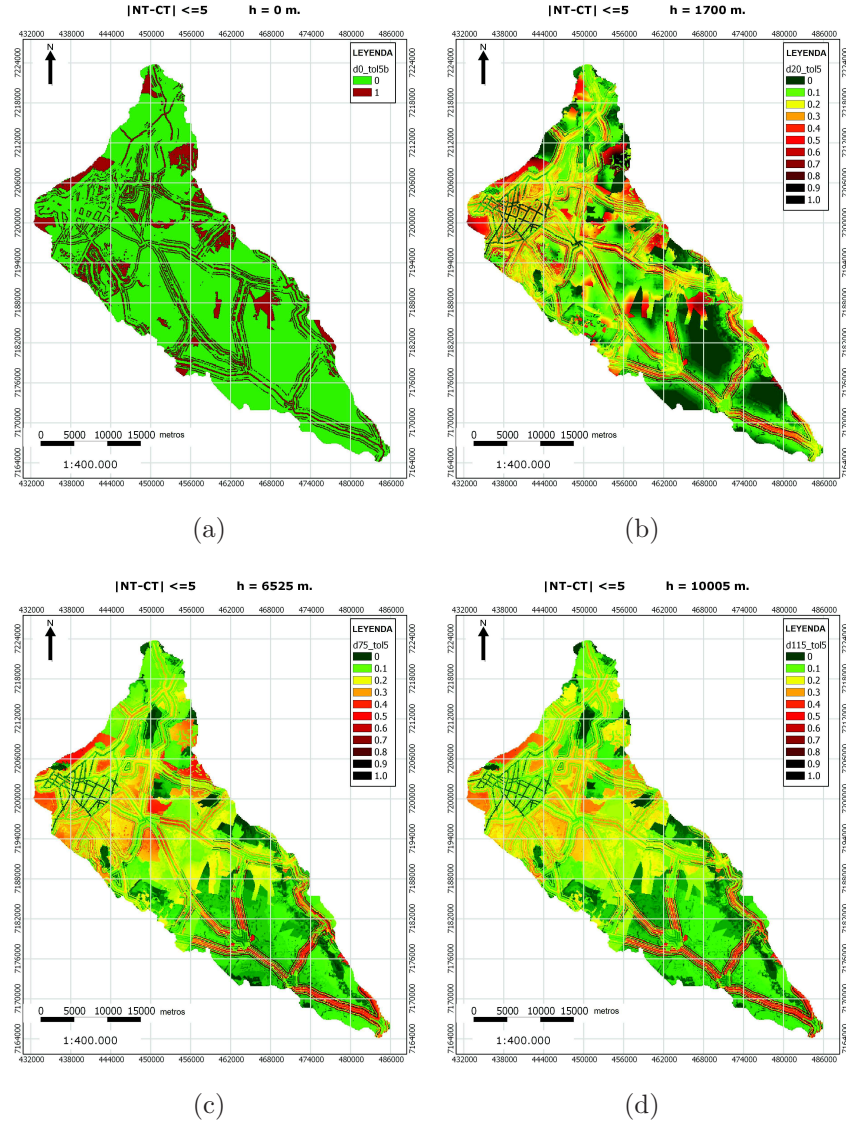


Figura 2.16: Porcentaje de áreas que tienen el mismo valor, en un radio de búsqueda determinado.

2.4 Resumen

El capítulo presentó una modificación del modelo DRASTIC propuesto por Aller et al. [ALPB87]. Las modificaciones realizadas fueron: a) La eliminación del parámetro impacto de la zona vadosa (I) de la ecuación inicial, debido a que el Patiño es un acuífero libre, de poca profundidad con relación a la superficie del suelo, y de muy poca heterogeneidad geológica [Fig07]. b) La re-clasificación de las calificaciones asignadas a la conductividad hidráulica (C) utilizando un nuevo rango de calificaciones para agregar heterogeneidad a la clasificación (Tabla 2.4). c) La adición de los valores de recarga artificial a los valores de recarga natural

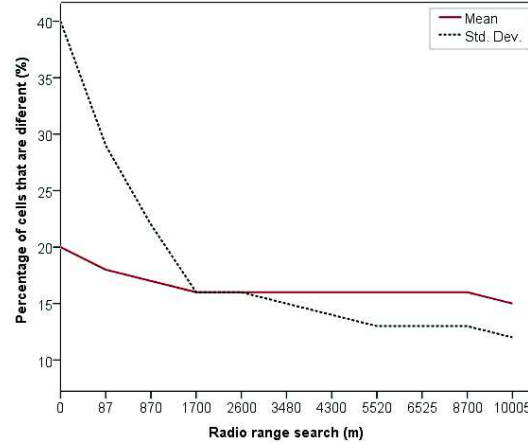


Figura 2.17: Probabilidad de encontrar celdas similares en diferentes radios de búsquedas al comparar los mapas de riesgos.

basado en lo propuesto por Nobre et al. [NRFM⁺07]. d) Modificación de la propuesta de calibración de Panagopoulos et al. [PAL06] a través de la inclusión de dos parámetros de contaminación Nitrógeno total (N_T) y Coliformes totales (C_T). e) La inclusión de tres parámetros antropogénicos como el uso de la tierra, densidad de viviendas con pozos ciegos y las vías principales de transporte.

Se ha demostrado que el mapa inicial DRASTIC sin calibraciones tiene una baja correlación con los contaminantes medidos en el área de estudio. Los coeficientes de correlación antes y después de la calibración fueron 0,073 y 0,522 respectivamente para el mapa de riesgo de N_T , mientras que los coeficientes de correlación pre y post calibración para los mapas de C_T fueron 0,357 y 0,7 respectivamente.

Los principales parámetros para la determinación del riesgo de contaminación son los antropogénicos, es decir, el uso de la tierra, la densidad de pozos ciegos y las vías principales de tran. A dichos parámetros fueron asignados los mayores pesos ponderados (3-5) como se visualiza en la Tabla 2.4, debido a la estrecha relación entre éstos parámetros y las altas concentraciones de N_T y C_T . Estos parámetros indican los efectos de las características de la zona y están ligados a las áreas urbanas, a la actividad con impacto humano derivado del uso del suelo, la cantidad de pozos ciegos existentes y las vías principales de transportes donde se sitúan principalmente la zona comercial e industrial. Otros estudios de evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas también indicaron que las zonas de suelo urbano son cada vez más propensos a la contaminación de las aguas subterráneas [AUAD14, C⁺93, SSKC15]. Los efluentes urbanos son una de las principales causas de contaminación física y química del agua subterránea, aumentando volumétricamente con el crecimiento de la población y la urbanización

[SA14].

Los resultados obtenidos demuestran que una gran parte del acuífero Patiño presenta un grado de riesgo moderado a alto de contaminación. El análisis de las áreas demuestra que el 42% del área del acuífero presenta mediano a alto riesgo de contaminación (60 a 100).

Se compararon los mapas de riesgo por contaminación con N_T y C_T , aplicando diferentes análisis estadísticos para evaluar las distribuciones de los índices de riesgo ($I-N_T$ e $I-C_T$) y poder determinar si existe una diferencia significativa entre un mapa y otro. En el análisis descriptivo de los datos, se encontró que el 72% de $I-N_T$ está por debajo de un índice de 60 y que para el $I-C_T$ el 58% del índice fue menor a 60, con un porcentaje bastante alto del 42% de índices elevados de C_T (60-100). Una comparación de las distribuciones indica que el promedio para $I-N_T=45,7$ y $I-C_T=55,6$; desviación estándar $I-N_T=24$ y $I-C_T=18,5$; coeficiente de variación $I-N_T=0,52$ y $I-C_T=0,33$; mediana $I-N_T=44,9$ y $I-C_T=56,3$; aunque no se puede concluir que las diferencias son significativas, debido que no hay independencia en la creación de los índices, pero si hay una diferencia cualitativa y notable. Teniendo en cuenta solamente las áreas urbanas existe un porcentaje de riesgo de contaminación bastante elevado, 53% de $I-N_T$ y 71% de $I-C_T$ con índices entre 60 y 100.

Con el análisis de variogramas, a una escala de 15 km, se constató que los modelos teóricos que representan el índice de riesgo a nivel espacial son diferentes. Mientras que $I-C_T$ llega a un límite de variabilidad, y puede ser representado por un modelo esférico, el mapa de $I-N_T$ aumenta linealmente y debería ser representado con un modelo potencial. Esto indica que la representación espacial es desigual.

Los resultados indican que, cualitativa y cuantitativamente, los mapas son suficientemente diferentes y que un mapa de riesgo no puede reemplazar a otro. Las implicancias prácticas son que, un sistema global de monitoreo sin focalizar en un contaminante en específico, quizás no sea la forma adecuada de afrontar el problema de monitoreo ya que en tratar de encontrar los dos contaminantes se podría dar el caso de no encontrar ninguno.

Los mapas de riesgos presentados son utilizados para realizar una campaña de análisis de calidad de agua y proponer un sistema de monitoreo remoto, en las áreas con mayor índice de riesgo de contaminación. Estos temas son abarcados en los próximos capítulos.

Capítulo 3

SELECCIÓN DE POZOS PARA CAMPAÑA DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

En este capítulo se presenta una propuesta para la selección de pozos con el objetivo de realizar una campaña de muestreo de calidad de agua subterránea. La selección de pozos surge con el fin de garantizar la representatividad de las muestras a realizar y para ello, son utilizados los mapas de riesgos realizados en el Capítulo 2.

Los mapas riesgos del acuífero Patiño fueron calibrados con las concentraciones de contaminantes como Nitrógeno total (N_T) y Coliformes totales (C_T), éstos presentan un índice de riesgo con valores entre 0 y 100, por cada contaminante. Los índices más altos (70-100) se encontraron en las áreas urbanas, en Asunción y el Gran Asunción (Luque, Fernando de la Mora, San Lorenzo, Villa Elisa, Lambaré, Mariano Roque Alonso, Ñemby, Capiatá, Limpio y San Antonio).

En este contexto, la campaña de muestreo de calidad de agua subterránea se realizará en la ciudad de Asunción y las ciudades del Gran Asunción. El área de estudio abarca 567 km^2 aproximadamente sobre el acuífero Patiño (Figura 3.1) y en dicha zona se conocen 2.830 pozos, correspondientes a pozos profundos de la Empresa de Servicios Sanitarios del Paraguay (ESSAP), aguaterías privadas, juntas de saneamientos y piezómetros (ver Figura 3.1).

La necesidad de una selección de pozos radica en que, se cuenta con fondos limitados para realizar una campaña de análisis de calidad de agua en 70 pozos. Por ende, se requiere que los pozos seleccionados abarquen la mayor cantidad de área posible (de los 567 km^2) y a su vez estén ubicados en lugares con altos índices de riesgos de contaminación, conociendo los mapas calibrados con las concentraciones de N_T y C_T (ver Figura 2.11). Dado los requisitos mencionados, además

De acuerdo a [citetang2005effective], existe una amplia literatura sobre recursos hídricos, demostrando la importancia de los MOEAs como herramientas de solución. Según [VL03], el MOEA más utilizado es el NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*, versión II) propuesto por [DAPM00]. Los resultados de simulaciones en problemas complejos muestran que NSGA-II puede, para la mayoría de los problemas, encontrar una mejor dispersión de soluciones y una mejor convergencia cerca del verdadero frente de pareto óptimo [DPAM02].

Este trabajo utiliza como herramienta el algoritmo NSGA-II para la selección óptima de pozos para una campaña de análisis de calidad de agua subterránea.

A continuación se presentan los conceptos básicos y la terminología utilizada que servirán de guía para la resolución del problema planteado.

3.1.1 Algoritmos Evolutivos

Los Algoritmos Evolutivos (Evolutionary Algorithms - EA) resuelven problemas de búsqueda y optimización guiados por el principio de la supervivencia del más apto, basado en la teoría de la evolución de las especies de Darwin [CVVL02]. Intentan reproducir las características de robustez y simplicidad existentes en la naturaleza para evolucionar hacia mejores soluciones en problemas computacionales [Gol89].

Permiten tratar problemas de optimización donde el objetivo es encontrar un conjunto de parámetros que minimizan o maximizan una función de adaptación (fitness). Estos algoritmos operan con una “población de individuos” $P(t) = x_1^t, \dots, x_n^t$ para la iteración t donde cada “individuo” x_i representa un punto de búsqueda en el espacio de las soluciones potenciales a un problema dado. El desempeño de un individuo x_i se evalúa según una “función de adaptación” $f(x_i)$. Esta función permite ordenar a los individuos de la población del mejor al peor [Val97].

La población inicial evoluciona sucesivamente hacia mejores regiones del espacio de búsqueda mediante procesos probabilísticos de a) selección de los individuos más adaptados en la población (a mayor grado de adaptación mayor probabilidad de dejar descendencia) y b) modificación por cruzamiento y mutación de los individuos seleccionados [Val97].

3.1.2 Algoritmos Genéticos

Los Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms - GAs) son paradigmas de los Algoritmos Evolutivos [CVVL02]. Son técnicas de búsqueda basadas en poblaciones

estocásticas biológicamente originadas, sobre los principios de la selección natural y la recombinación genética [Far08].

Las características de los GAs son su sencillez y robustez, así como su capacidad de obtener buenas soluciones para problemas complejos, difíciles de manejar con técnicas más convencionales [FM93]. Los GAs tienen la capacidad de obtener soluciones óptimas al combinar los principios de supervivencia del más apto con el intercambio de información aleatoria [Bal94]. Una de las características principales de los GAs, que los diferencian de otras técnicas de búsqueda, es su capacidad para obtener una población de posibles soluciones, en lugar de obtener un solo punto [Far08].

La implementación de un algoritmo genético como se indica en [Far08], inicia con la generación de una población de posibles soluciones. Las soluciones propuestas se parametrizan y las variables que identifican a cada una de ellas se combinan para crear un “cromosoma”, que representa esa solución en el proceso de evolución en el GA. El siguiente paso es evaluar la “aptitud” de cada cromosoma y asignar probabilidades de selección de manera que los cromosomas que representan mejores soluciones tengan mayor posibilidad de ser seleccionados, como “padres”, para la reproducción. Luego, los cromosomas seleccionados se emparejan para el cruzamiento. El operador de “cruzamiento” combina la información de cada par de padres seleccionados y genera nuevas cromosomas “descendientes”, que crean la próxima generación. Los cromosomas evolucionan a lo largo de varias generaciones, guiando la búsqueda GA hacia un conjunto de soluciones óptimas.

3.1.3 Algoritmo NSGA-II

NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*, version II) [DAPM00] es un MOEA, basado en el ordenamiento no-dominado para asignar el valor de adaptabilidad a los elementos de la población genética [VL03].

El algoritmo considera tres características distintivas para resolver aspectos criticados de la implementación original de NSGA [SD94] como: el ordenamiento no-dominado elitista que utiliza una población auxiliar y disminuye el orden de complejidad de los chequeos de dominancia, la preservación de diversidad mediante una técnica de crowding que no necesita especificar parámetros adicionales, y la asignación de fitness en base a rangos de no-dominancia que considera los valores de distancia de crowding que evalúan la diversidad de las soluciones [RN09].

A continuación se describe el NSGA-II:

Población inicial

Se genera una población inicial aleatoria de tamaño N individuos y se ordena en frentes basados en la no-dominación.

Ordenamiento No-dominado

Luego de evaluar las funciones objetivo por cada individuo, se aplica el concepto de dominancia para clasificar las soluciones.

El primer frente es completamente no-dominado (en la población actual) y el segundo frente está dominado por los individuos del primer frente, y así sucesivamente. A cada individuo se le asigna un valor de adaptación (fitness), basado en el frente al que pertenece. Los individuos en el primer frente tienen adaptación = 1, los individuos en el segundo poseen adaptación = 2 y así sucesivamente.

La optimización multi-objetivo conlleva la asignación de adaptaciones o fitness multi-objetivo para la maximización simultánea de los N objetivos [SHS08].

La superioridad o dominancia de un individuo sobre otro se puede decidir comparando (dos individuos), teniendo en cuenta las funciones objetivos y siguiendo el esquema de la siguiente ecuación para realizar el ordenamiento no-dominado [SHS08]:

$$\forall i \in \{1, \dots, NObj\}, f_i^{Ldx1} \geq f_i^{Ld21} \text{ and } \exists i \in \{1, \dots, NObj\}, f_i^{Ldx1} > f_i^{Ld21} \quad (3.1)$$

$$\Rightarrow \text{individuo1}p > \text{individuo2}$$

($p <$: *parcialmente menor que plt*)

Si el *individuo1* es $p >$ (parcialmente mayor que) el *individuo2*, se deduce que el *individuo1* domina al *individuo2*.

Terminado el proceso de ordenamiento, se asigna a cada individuo un valor de adaptación (fitness) igual a su nivel de no-dominancia.

Distancia de Crowding

Una vez completado el ordenamiento no-dominado, se asigna la distancia de crowding. Dado que los individuos son seleccionados en base al valor de adaptación y la distancia de crowding de cada individuo. La distancia de crowding se calcula de la siguiente manera [Ses07]:

- Para cada frente F_i , n es el número de individuos.
 - Inicializar la distancia a ser cero para todos los individuos, es decir, $Fi(dj) = 0$, donde j corresponde al j -ésimo individuo en frente F_i .

- Para cada función objetivo m
 - * Ordenar a los individuos en el frente F_i basándose en el objetivo m , es decir, $I = \text{sort}(F_i, m)$.
 - * Asignar una distancia infinita a los valores extremos para cada individuo en F_i , es decir, $I(d_1) = \infty$ e $I(d_n) = \infty$
 - * Para $k = 2$ a $(n - 1)$
 - $I(d_k) = I(d_k) + \frac{I(k+1).m - I(k-1).m}{f_m^{max} - f_m^{min}}$
 - $I(k).m$ es el valor de la m -ésima función objetivo de los k -ésimos individuos en I .

Selección

Luego de realizar el ordenamiento no-dominado y la distancia de crowding, se deben seleccionar los individuos más aptos (padres) entre los mejores para generar nuevas posibles soluciones.

Se realiza una selección por torneo que consiste en seleccionar aleatoriamente parejas de individuos y seleccionar el individuo con mejor valor de adaptación y distancia de crowding. Se realizan tantos torneos como número de individuos haya. Los mejores individuos conforman la población de padres, y pasan a la siguiente etapa de cruzamiento y mutación.

Cruzamiento y Mutación

Se prosigue con los operadores de cruzamiento y mutación para generar, a partir de la población padre, una nueva población hijo también de tamaño N .

El cruzamiento es la parte del algoritmo en el que los padres intercambian su material genético para generar nuevos individuos (hijos).

La mutación consiste en alterar alguno de los hijos, lo que permite incorporar diversificación en la población y eventualmente, escapar de óptimos locales.

El cruzamiento y la mutación se dan con una probabilidad dada. El cruzamiento se realiza seleccionando aleatoriamente dos padres de los ganadores del torneo y cruzando sus cromosomas, esto genera individuos que comparten parte del material genético de los padres (hijos). En la mutación se selecciona aleatoriamente uno de los padres ganadores del torneo para posteriormente mutar, con cierta probabilidad, algunos de sus cromosomas.

Obtenidas las poblaciones padres e hijos iniciales, se realizan las sucesivas generaciones mientras la condición de parada no se cumpla.

3.2 Selección de Pozos Utilizando NSGA-II

La incertidumbre del sistema radica en seleccionar 70 pozos, de los 2.830 existentes, para realizar el muestreo de calidad de agua subterránea en el área de estudio. Por ende, se requiere que los pozos seleccionados abarquen la mayor área posible (de los 567 km^2) y a su vez estén ubicados en lugares con altos índices de riesgos de contaminación, conociendo los mapas calibrados con las concentración de N_T y C_T .

Para que los 70 pozos puedan estar distribuidos y abarcar al máximo posible los 567 km^2 , se calculó el área de cobertura por pozo. En este trabajo se denomina área de cobertura, al área geográfica “ideal” en la que se dispone de un pozo, de manera a distanciarlos unos de otros y cubrir al máximo el área de estudio.

Por lo anterior, el modelo toma la siguiente forma:

$$\max INT_{acu} = \sum_{i=1}^{i=70} INT_i \quad (3.2)$$

donde INT_{acu} es el total acumulado de los índices de riesgo de contaminación por la concentración de Nitrógeno total, INT es el índice de riesgo de contaminación por la concentración de Nitrógeno total.

$$\max ICT_{acu} = \sum_{i=1}^{i=70} ICT_i \quad (3.3)$$

donde ICT_{acu} es el total acumulado de los índices de riesgo de contaminación por la concentración de Coliformes totales, ICT es el índice de riesgo de contaminación por la concentración de Coliformes totales.

$$\max A_{cob} = \sum_{i=1}^{i=70} A_i \quad (3.4)$$

donde A_{cob} es el área de cobertura ocupada por los pozos seleccionados y A el área de cada pozo.

Para determinar el A_{cob} , primero se calculó el radio de cada pozo, de manera a distanciarlos unos de otros y cubrir al máximo el área de estudio, utilizando la siguiente ecuación:

$$r = \sqrt{\frac{A_{pozos}}{\pi}} \quad (3.5)$$

donde se calculó el radio r utilizando el área de cada pozo (A_{pozo}). El área de pozos depende del área total de estudio $A_{estudio}$ sobre el número de pozos

necesarios N_{pozos} para la campaña de muestreo:

$$A_{pozo} = \frac{A_{estudio}}{N_{pozos}} \quad (3.6)$$

donde A_{pozo} es el área de cada pozo que depende del área total de estudio $A_{estudio}$ (567 km^2) sobre el número de pozos necesarios N_{pozos} (70) para la campaña de muestreo.

A partir del radio obtenido ($r = 1.606m$), se utilizó junto con la herramienta *buffer*¹ de QGIS[T⁺14]. En una aplicación de Sistemas de Información Geográficos (GIS por sus siglas en inglés), las zonas *buffers* siempre están representadas como polígonos vectoriales que rodean a otro polígono, línea o punto [Sut] (ver Figura 3.2). Los *buffers* fueron creados alrededor de cada pozo, con los bordes disueltos de modo a que no existan áreas superpuestas cuando se presenten puntos de pozos cercanos.

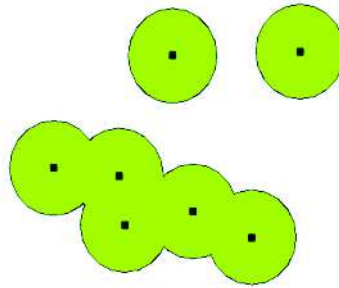


Figura 3.2: Ejemplo de una zona *buffer* con bordes disueltos alrededor de los pozos, correspondientes a puntos vectoriales.

Luego de realizar el *buffer* para la combinación de los 70 pozos de cada individuo, fue calculado el área de cobertura, utilizando la herramienta para calcular geometría en QGIS.

Población inicial

Se creó una población inicial aleatoria con 100 individuos. Cada individuo contiene 70 identificadores de pozos (*IP*) (cromosomas) que fueron asignados aleatoriamente. Los *IP* son valores entre 0 y 2.830, correspondientes al número total de pozos identificados en el área de estudio. Un individuo no puede contener valores repetidos de *IP*.

El esquema de la población inicial se muestra a continuación.

¹Una zona *buffer* es algún área que sirve al propósito de mantener las entidades del mundo real distantes entre ellas[Sut].

$$\begin{bmatrix} IP_1^1 & \cdots & IP_{70}^1 \\ IP_1^2 & \cdots & IP_{70}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ IP_1^N & \cdots & IP_{70}^N \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Cálculo de las funciones objetivos

La función objetivo determina la calidad de una combinación de 70 pozos seleccionados. Cada IP está asociado a un valor de: índice de riesgo por concentración de Nitrógeno total (INT), índice de riesgo por concentración de Coliformes totales (ICT) y área de cobertura. El individuo con mayores valores de INT_{acu} , ICT_{acu} y A_{cob} , posee más probabilidades de tener descendientes en la próxima generación.

Como se mencionó anteriormente, los valores de INT e ICT fueron calculados en el Capítulo 2, cuyos rangos varían entre 0 y 100. Por cada individuo se calcula el total de índice de riesgo acumulado de los 70 pozos, utilizando las siguientes ecuaciones.

$$INT_{acu} = \sum_{i=1}^{i=70} INT_i \quad (3.8)$$

donde INT_{acu} es el total acumulado de los índices de riesgo de contaminación por la concentración de Nitrógeno total, INT es el índice de riesgo de contaminación por la concentración de Nitrógeno total (NT).

$$ICT_{acu} = \sum_{i=1}^{i=70} ICT_i \quad (3.9)$$

donde ICT_{acu} es el total acumulado de los índices de riesgo de contaminación por la concentración de coliformes totales, ICT es el índice de riesgo de contaminación por la concentración de Coliformes totales (CT).

El área de cobertura corresponde al área geográfica que abarca la combinación de los 70 pozos.

$$A_{cob} = \sum_{i=1}^{i=70} A_i \quad (3.10)$$

donde A_{cob} es el área de cobertura ocupada por los pozos seleccionados y A el área de cada pozo.

Ordenamiento No-dominado

Para el ordenamiento no-dominado se tuvo en cuenta lo siguiente, si el INT_{acu} , ICT_{acu} y A_{cob} son mayores para el *individuo*₁ que para el *individuo*₂, se deduce que el *individuo*₁ es superior al *individuo*₂. Incluso sería suficiente si dos de los valores (ICT y A_{cob}) son mayores en una solución y el otro valor (INT) igual para ambas soluciones.

Distancia de Crowding

Se calculó la distancia de crowding basado en [Ses07], indicado en la sección anterior.

Selección

Los individuos más aptos fueron seleccionados en base al valor de adaptación y la distancia de crowding, mediante una selección por torneos. El tamaño de torneo realizado fue de 4 individuos seleccionados al azar.

Cruzamiento y Mutación

Para el cruzamiento, dos individuos padres se cortaron en un punto escogido aleatoriamente. Se copió la información genética de uno de los padres desde el inicio hasta el punto de cruce y el resto se copió del otro progenitor.

Ademas se tuvo en cuenta que, la información copiada no incluyera valores IP repetidos, ya que no se desea duplicar la información de los pozos para cada combinación (individuo).

Tras el cruce, tuvo lugar la mutación aplicando una probabilidad de mutación del 7% sobre toda la población.

3.3 Resultados Experimentales

En esta sección se presentan los resultados de la implementación del algoritmo NSGA-II para la selección óptima de 70 pozos para realizar una campaña de monitoreo de calidad de agua subterránea del acuífero Patiño en el área de Asunción y Gran Asunción, considerando las 3 funciones objetivos indicadas en la sección anterior.

La Tabla 3.1 reporta los promedios de los valores máximos calculados en $maxINT_{acu}$, $maxICT_{acu}$ y $maxA_{cob}$, de los mejores frentes, realizando 6 corridas del algoritmo con 100, 200, 300 y 400 generaciones cada una. La evaluación con 400 generaciones alcanzó mejores resultados para los tres objetivos, por lo tanto, al aumentar el número de generaciones los valores máximos aumentaron proporcionalmente (ver Tabla 3.2).

Considerando las comparaciones realizadas, se graficó el conjunto de las soluciones con 400 generaciones. Los gráficos de la Figura 3.3 muestran los mejores frentes de la población inicial y final, normalizados con valores entre 0 y 1, para combinarlos y visualizarlos como planos frontales del gráfico 3D por cada par de funciones objetivos (ver Figura 3.3.b, 3.3.c y 3.3.d).

Se obtuvo un total de 88 posibles soluciones no dominadas, de las cuales fueron seleccionadas las mejores soluciones de los gráficos de la Figura 3.3.

La Tabla 3.2 muestra los individuos seleccionados en la Prueba 1, considerando los individuos con mayor valor en cada par de objetivos de la Figura 3.3. En la tabla se indica el punto seleccionado (x,y) de la Figura 3.3, los resultados de los cálculos de las 3 funciones objetivos y el mapa (Figura 3.5) en el que se visualizan la selección de los 70 pozos.

Tabla 3.1: Resumen de resultados de la Prueba 1 considerando el área de cobertura.

Nro. de Generaciones	Promedio		
	I-CT máximo	I-NT máximo	Área máxima (km^2)
100	5483,5	5438,3	372,9
200	5571,4	5544,2	375,6
300	5622,2	5543,8	379,7
400	5657	5557,4	381,2

Tabla 3.2: Individuos seleccionados en la Prueba 1 con sus respectivos valores de funciones objetivos.

Gráfico (Fig.)	Punto seleccionado (x,y)	$maxICT_{acu}$	$maxINT_{acu}$	$maxA_{cob}$	Mapa (Fig.)
3.3.b	0,92; 0,77	5446,87	5467,71	365,11	3.5.a
3.3.c	0,92; 0,88	5564,06	5422,04	348,74	3.5.b
3.3.d	0,9; 0,9	5542,18	5249,60	381,78	3.5.c

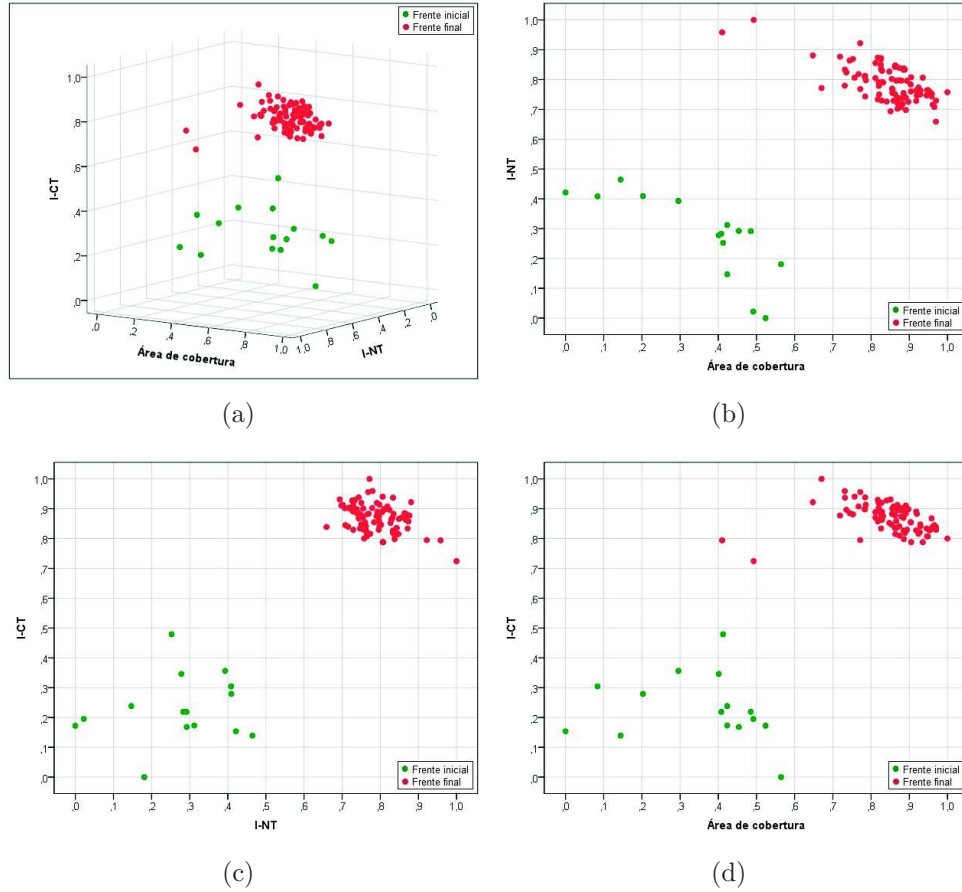


Figura 3.3: Comparación de los frentes iniciales y finales, del problema de maximización, implementando el algoritmo NSGA-II con 400 generaciones en la Prueba 1.

(a) El gráfico 3D muestra los frentes con los 3 objetivos, seguido de sus planos frontales para cada par de objetivos (b) I-NT con Área de cobertura (c) I-CT con I-NT y (d) I-CT con Área de cobertura.

Se realizó una segunda prueba experimental, modificando el valor de radio constante o fijo ($r=1606$ calculado con la ecuación 3.5 para distanciar los pozos), por el radio variable del cono de influencia de cada pozo, para incorporar datos hidrológicos al modelo y evaluar la variación de la napa freática durante el bombeo o la distancia desde el pozo hasta dónde la extracción es insignificante (cono de influencia).

Se calculó el radio de influencia cuando el descenso de la napa es igual 30 cm indicado por [Fil15] y aplicando la solución analítica propuesta por Neuman [Neu72]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \beta) \quad (3.11)$$

donde s es el descenso a una distancia r transcurrido un tiempo t , Q es el caudal de bombeo y T la transmisividad del acuífero.

En la segunda prueba se consideraron las 3 funciones objetivos indicadas en la sección anterior, con la diferencia del valor r variable, según el radio de influencia de pozo.

En la tabla 3.3 se visualiza el promedio de los resultados realizando 6 corridas del algoritmo. También al aumentar el número de generaciones, los valores máximos aumentaron proporcionalmente.

La Tabla 3.4 muestra los individuos seleccionados en la Prueba 2, considerando cada par de objetivos (Figura 3.4) para presentarlos en el mapa con los pozos seleccionados. Resultaron seleccionados los individuos con mayor valor en cada par de objetivos.

Tabla 3.3: Resumen de resultados de la Prueba 2 con el cálculo de área de influencia.

Nro. de Generaciones	Promedio		
	I-CT máximo	I-NT máximo	Área máxima (km^2)
100	5491,7	5549,1	16,1
200	5595,9	5593,7	16,3
300	5672,9	5699,4	16,2
400	5686,7	5746,1	16,4

Tabla 3.4: Individuos seleccionados en la Prueba 2 con sus respectivos valores de funciones objetivos.

Gráfico (Fig.)	Punto seleccionado (x,y)	$maxICT_{acu}$	$maxINT_{acu}$	$maxA_{cob}$	Mapa (Fig.)
3.4.b	0,96; 0,87	5560,93	5705,51	16,65	3.6.a
3.4.c	0,89; 0,95	5614,84	5702,36	15,73	3.6.b
3.4.d	1,00; 0,91	5726,56	5519,68	17,02	3.6.c

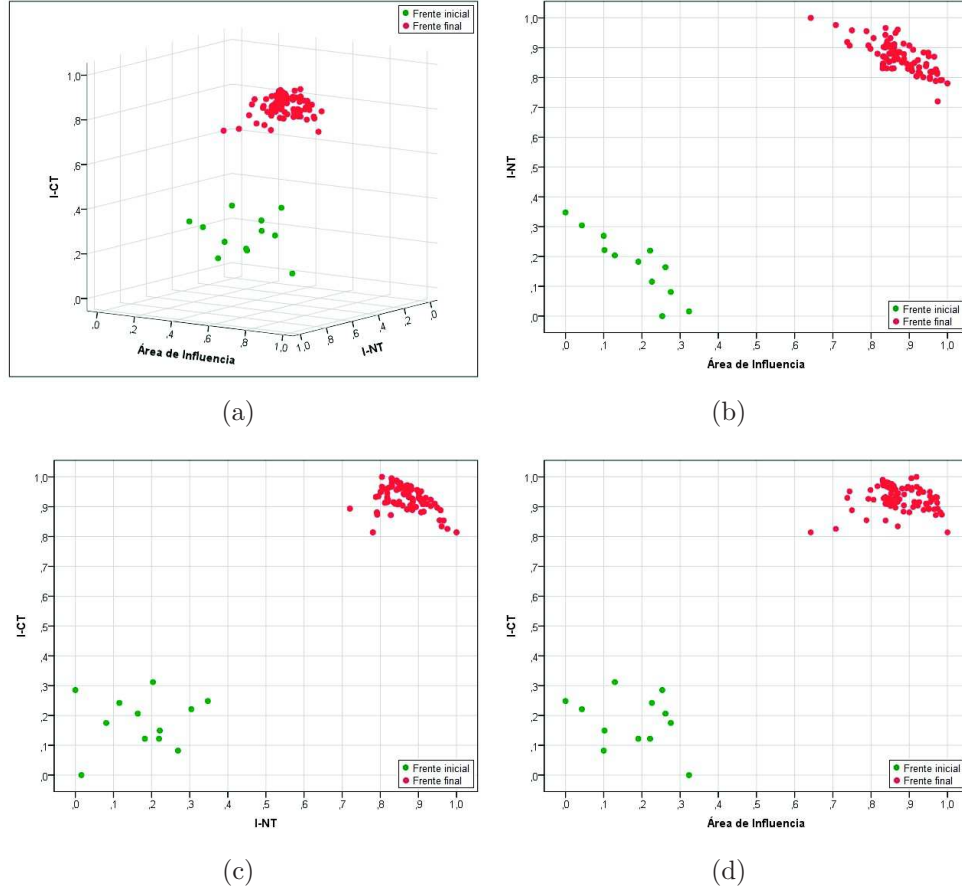


Figura 3.4: Comparación de los frentes iniciales y finales, del problema de maximización, implementando el algoritmo NSGA-II con 400 generaciones en la Prueba 2.

(a) El gráfico 3D muestra los frentes con los 3 objetivos, seguido de sus planos frontales para cada par de objetivos (b) I-NT con el Área de influencia (c) I-CT con I-NT y (d) I-CT con el Área de influencia.

3.3.1 Mapas de Pozos Seleccionados

Se muestran a continuación los mapas con las soluciones presentadas en la selección de pozos, para realizar el muestreo de calidad de agua subterránea en el área de Asunción y Gran Asunción.

Los resultados para cubrir un área promedio de 365 km^2 en zonas con alto riesgo de contaminación con N_T y C_T , se muestran en los mapas de la Figura 3.5. Cada mapa presenta 70 combinaciones de pozos. Además en las tres soluciones fueron identificados 47 pozos duplicados, a los que se les podría dar una mayor prioridad en la campaña de análisis de calidad de agua. La distribución de los pozos duplicados se muestra en el mapa de la Figura 3.5.d.

Los resultados calculando el área de influencia (Prueba 2), se muestran en

los mapas de la Figura 3.6. También fueron identificados 47 pozos duplicados (Figura 3.6.d.)

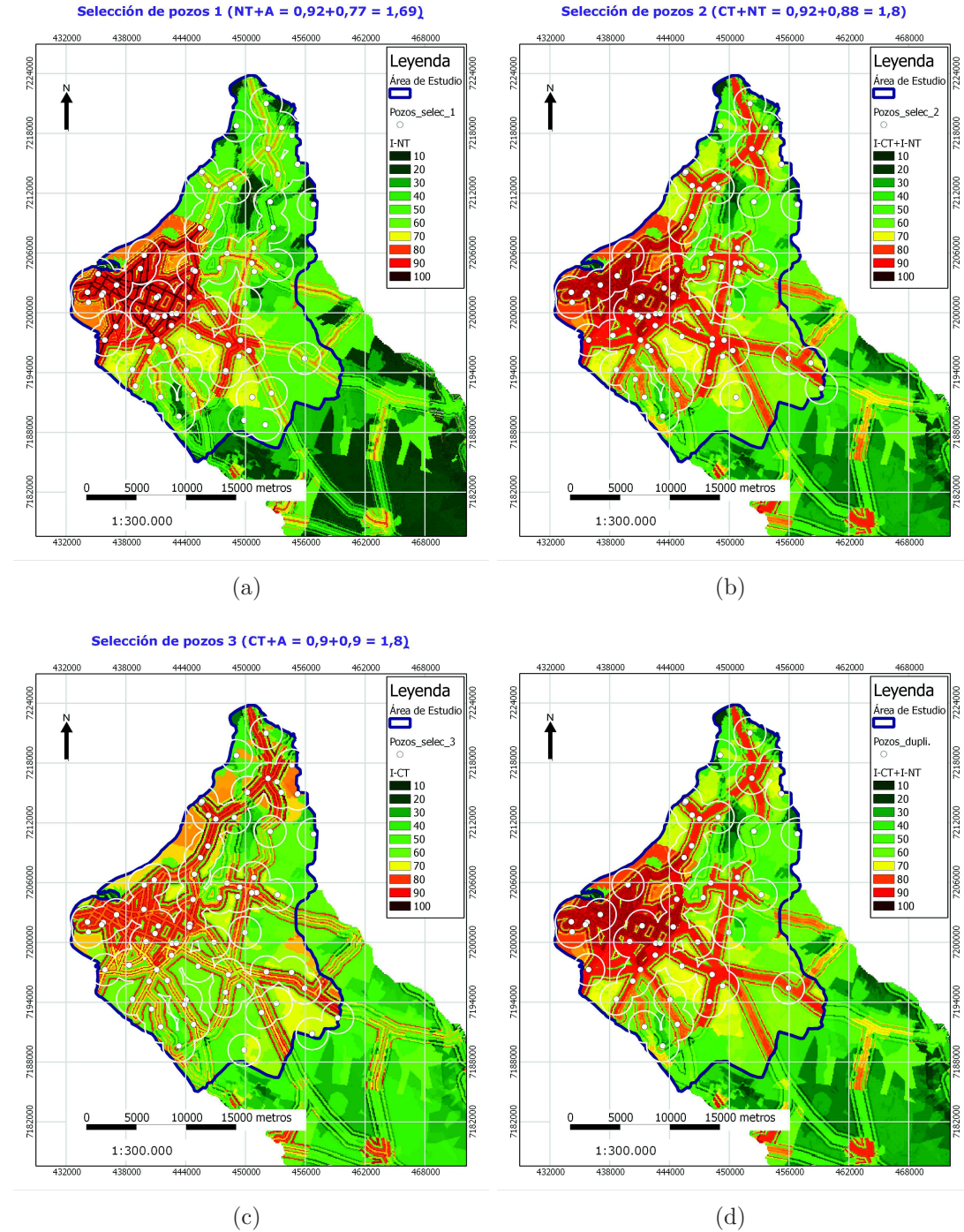


Figura 3.5: Selección de pozos multi-objetivo.

(a) Selección I-NT + Área de cobertura (b) Selección I-CT + I-NT (c) Selección I-CT + Área de cobertura (d) Distribución de 47 pozos duplicados en las selecciones realizadas.

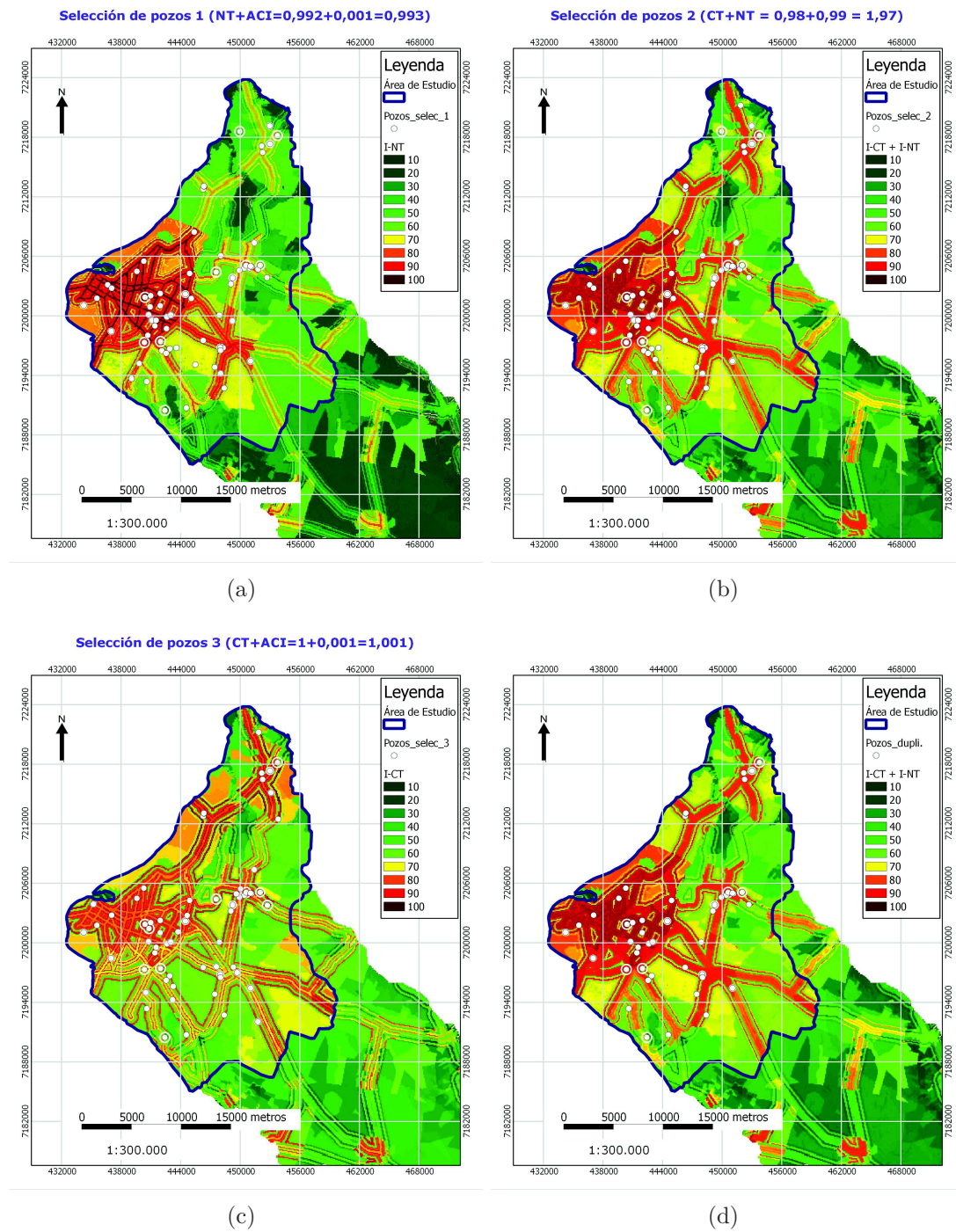


Figura 3.6: Selección de pozos multi-objetivo.

- (a) Selección I-NT + Área de cobertura (b) Selección I-CT + I-NT (c) Selección I-CT + Área de cobertura (d) Distribución de 47 pozos duplicados en las selecciones realizadas.

3.4 Resumen

Se presentó una propuesta para realizar una selección óptima de pozos utilizando un modelo genético multi-objetivo, de manera a optimizar simultáneamente el área de cobertura del muestreo y los índices de riesgos de contaminación por concentraciones de N_T y C_T .

El modelo genético multi-objetivo se basó en el algoritmo *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, version II* (NSGA-II), el cual es exitoso en la solución de problemas con múltiples funciones objetivos, por lo tanto, en este trabajo se utilizó como herramienta para la selección óptima de pozos para una campaña de análisis de calidad de agua subterránea.

El NSGA-II permitió generar el conjunto de soluciones No-dominadas que corresponden al frente pareto del problema de una selección limitada de 70 pozos, de los 2.830 pozos conocidos en el área de Asunción y el Gran Asunción, el cual ha sido corrido múltiples veces para 100 individuos, con 100, 200, 300 y 400 generaciones cada una. Al aumentar el número de generaciones se obtuvieron mejores resultados para los tres objetivos, los cuales fueron aumentando proporcionalmente.

También se realizó una segunda prueba para incorporar datos hidrológicos al modelo, calculando el radio del cono de influencia de cada pozo.

Por cada par de funciones objetivos se seleccionó una solución, visualizados en las Figuras 3.5 y 3.6 con 70 combinaciones de pozos cada una. Las soluciones de la Prueba 1 cubrieron un área promedio de 365 km^2 de los 567 km^2 que abarca el área de estudio. La Prueba 2 consideró la selección de pozos con mayores radios de influencia, el área promedio de influencia fue de 16 km^2 .

La propuesta de selección presentada proporciona un recurso importante para la toma de decisiones, permitiendo obtener un conjunto de soluciones óptimas para presentar a los especialistas, instituciones o agencias nacionales que tienen como mandato la salvaguarda ambiental y el desarrollo sustentable de los recursos naturales, de forma que estos puedan establecer una campaña de muestreo acorde a sus necesidades.

Capítulo 4

DISEÑO DE SISTEMA DE MONITOREO REMOTO

El agua subterránea del acuífero Patiño¹ se utiliza en gran escala para el consumo humano, abasteciendo a la población urbana² más grande y densamente poblada del Paraguay. La Empresa de Servicios Sanitarios del Paraguay (ESSAP), abastece de agua potable, centrándose básicamente en la Capital. Las demás ciudades del departamento Central dependen del agua suministrada por Juntas de Saneamiento o por aguaterías privadas o comunales. Estos entes secundarios son responsables del abastecimiento de agua del 72,4% de las viviendas del departamento central [mop10], y extraen caudales de agua en su mayor parte del subsuelo, que luego son distribuidos, con muy poco tratamiento sanitario, a las residencias del área. Otra cifra alarmante, y que indica la importancia del acuífero, es la del desagüe sanitario, que indica que el 93,1% de las viviendas en el área del acuífero dependen de cámaras sépticas o pozos ciegos [dge12b] para desechar los residuos cloacales.

En el Capítulo 2 se elaboraron mapas de riesgo de contaminación del acuífero Patiño basado en el análisis de datos existentes sobre la hidrogeología de la región. Para ello se recopilaron datos espaciales y mapas georreferenciados con informaciones hidrogeológicas y antropogénicas, a los cuales fue difícil acceder debido a que se encuentran diseminados en diferentes instituciones y no se encuentran disponibles públicamente. La evaluación de los mapas arrojó un índice de riesgo de contaminación, de esta manera fueron identificadas las zonas puntuales con mayores índices de riesgo según las concentraciones de Nitrógeno total (N_T) y Coliformes totales (C_T), dando como resultado dos mapas diferentes de riesgo

¹1173 km^2 de extensión.

²Asunción y las demás ciudades de los departamentos Central y algunas del departamento de Paraguari, con más de 2.976.400 habitantes [dge12a].

según el tipo de contaminante. Los mapas (ver Figura 2.11 del Capítulo 2) indicaron que las zonas con mayor índice (70-100) de riesgo de contaminación se encuentran principalmente en la ciudad de Asunción y ciudades aledañas.

Existe la necesidad de un monitoreo permanente de las aguas del acuífero Patiño y mantener un registro periódico, con la posibilidad de compartir y facilitar los resultados obtenidos. El monitoreo del agua se define como el proceso programado de muestrear, evaluar y registrar las distintas características o parámetros del agua [BB96]. En este trabajo se considera como monitoreo remoto a la capacidad de obtener y leer los parámetros en cada punto seleccionado, sin llevar al laboratorio, y transmitirlos en forma telemétrica.

En este contexto, este capítulo tiene la finalidad de presentar una propuesta de un sistema de monitoreo remoto y permanente de calidad de agua para el acuífero Patiño, en el área de Asunción y Gran Asunción, a fin de conocer la calidad del agua subterránea, mejorar las bases de datos sobre la calidad de agua y tomar las decisiones adecuadas respecto a la gestión de dicho recurso.

Partiendo de la premisa de realizar un monitoreo remoto, en este capítulo se realizó una revisión de la literatura para identificar los métodos existentes para el monitoreo remoto de calidad de agua subterránea en tiempo real y considerarlas en la presentación de la propuesta de monitoreo remoto. Una vez seleccionados los métodos más convenientes, como lo son las Redes de Sensores Inalámbricas (WSN) y el Monitoreo Ciudadano (MC), se presenta el estado del arte con una recopilación de los antecedentes y trabajos relacionados a las tecnologías y herramientas utilizadas para el monitoreo remoto.

En este capítulo, primeramente se definen los requisitos del sistema, seguido de una recopilación de los antecedentes y trabajos relacionados a las tecnologías y herramientas utilizadas para el monitoreo remoto de calidad de agua subterránea, se analiza el estado del arte de las WSN y el MC; también se revisan cuáles son los parámetros de calidad de agua que generan preocupación y son de interés para su evaluación permanente, y su posibilidad de monitorearlos remotamente. Seguidamente, se presenta una propuesta de solución para el monitoreo remoto de calidad de agua subterránea en un área del acuífero Patiño; y por último, se elabora una guía de trabajo con los próximos pasos, más relevantes, a seguir para implementar la propuesta presentada.

4.1 Requisitos del Sistema

Se identificaron los siguientes requisitos para el monitoreo de calidad de agua subterránea son:

- Crear una red de pozos de monitoreo en las zonas identificadas con mayores riesgos de contaminación (ver Figura 2.11 del Capítulo 2), dentro del área de Asunción y Gran Asunción, que abarca 567 km^2 sobre el acuífero Patiño.
- Monitorear la mayor cantidad de parámetros de calidad de agua posibles.
- Obtener y leer los parámetros en cada punto seleccionado “in-situ” y sin llevar al laboratorio.
- Monitorear los parámetros de manera periódica.
- Enviar los resultados del análisis de las muestras de agua subterránea automáticamente a un servidor.
- Almacenar en una base de datos la información recolectada, para poder mostrarla a los usuarios a través de la Web.
- Proponer un monitoreo de bajo costo.

4.2 Revisión de Métodos de Monitoreo Remoto

Se realizó una revisión de la literatura para identificar los métodos existentes para el monitoreo remoto de aguas subterráneas en tiempo real y considerarlas en la presentación de la propuesta de monitoreo. El mapeo sistemático de la literatura se utilizó como método para identificar las soluciones existentes, mediante el siguiente procedimiento [PFMM08]: A) Definir pregunta de investigación, B) Realizar la búsqueda de la literatura, C) Seleccionar trabajos, D) Clasificar trabajos y E) Extraer y realizar la agregación de datos.

La pregunta de investigación (RQ) a responder fue:

- RQ.1 ¿Qué solución/es se han planteado para el monitoreo remoto de calidad de aguas subterráneas en tiempo real?

Como fuente de datos se utilizó el motor de búsqueda del Google Scholar. Especializado en literatura científica-académica, con amplia cobertura de publicaciones del área de ciencias de la computación e indexa varios catálogos de publicaciones como IEEE, ACM, Springer, Elsevier y otros [ZHM⁺13]. La estrategia

de búsqueda consistió en definir varias cadenas para refinar el vocabulario e identificar mejores resultados con el tema de investigación. Fueron utilizadas las siguientes cadenas de búsquedas:

- C1: *groundwater “monitoring system”*
- C2: *groundwater automated monitoring system*
- C3: *remotely monitor groundwater*
- C4: *groundwater quality remote sensig*

Debido a la gran cantidad de trabajos arrojados por las búsquedas, en la revisión se tuvieron en cuenta los primeros 25 trabajos de los resultados obtenidos con cada cadena, ordenados por el criterio de relevancia. Inicialmente se realizó una búsqueda acotada al periodo 2010-2016 por los constantes cambios de la tecnología, seleccionando 1 trabajo relevante. Por este motivo se decidió realizar una segunda búsqueda sin restringir los años, obteniendo mejores resultados. Cabe mencionar que el trabajo seleccionado en la primera búsqueda, no se encuentra entre los trabajos seleccionados de la segunda búsqueda.

Para la selección de trabajos se definieron los siguientes criterios de selección: Criterios de Inclusión (CI):

- CI1: trabajos que tratan el monitoreo remoto de aguas subterráneas de manera exclusiva o en al menos una sección.
- CI2: trabajos que mencionan el diseño técnico utilizado para el monitoreo.
- CI3: trabajos que presentan un método para el monitoreo remoto de calidad de agua subterránea.
- CI4: trabajos que tratan el monitoreo remoto de aguas subterráneas con transferencia de resultados en tiempo real.

Criterios de Exclusión (CE):

- CE1: el trabajo no está disponible en inglés.
- CE2: el trabajo no es patente o artículo publicado en una revista científica o conferencia.

Luego de aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se obtuvo un total de 9 trabajos que cumplían con los criterios de selección. Los trabajos seleccionados para su lectura completa correspondieron a 5 artículos publicados [TBA13, LDHS⁺07, RBE⁺06, LYY⁺07, ARGB05] y 4 patentes [Rui07, SMBS02, SM02, GS00]. En cuanto a la publicación de trabajos, la mayoría de los trabajos seleccionados (89 %) corresponde al periodo 2000-2010, solo 11% corresponde al periodo 2011-2016. El 55% de los trabajos seleccionados son artículos presentados en conferencias (44%) y revistas (11%), los demás trabajos (45%) son patentes de los años 2000, 2002 y 2007. No se identificaron trabajos de revisión bibliográfica sobre el tema del monitoreo remoto de calidad de “aguas subterráneas”.

Luego de leer los trabajos de investigación identificados, se respondió a la pregunta de investigación planteada:

Pregunta RQ.1, sobre las solución/es que se han planteado para el monitoreo automático de calidad de aguas subterráneas en tiempo real, se identificó el uso de sensores combinados con tecnologías inalámbricas para la construcción de Redes de Sensores Inalámbricos (WSN). En la literatura revisada fueron evidenciadas algunas limitaciones resaltantes sobre WSN: se utiliza en pequeñas escalas, sensores costosos y limitada cantidad de sensores para los parámetros de calidad de agua. A pesar de estas limitaciones, sigue siendo muy eficaz debido a las evaluaciones fiables y la recopilación de datos en tiempo real.

Como otro método de monitoreo remoto, se identificó la utilización de kits de reactivos colorimétricos, razonablemente baratos, en comparación a las WSN, y pueden ser utilizados como instrumentos para realizar evaluaciones en el mismo sitio de muestreo; vinculando a un grupo de ciudadanos para proteger su cuenca, trabajando a favor de un modo de vida saludable y sustentable. A este tipo de monitoreo se lo conoce como Monitoreo Ciudadano [DRCD10].

A continuación se detallan los métodos, identificando las principales características, fortalezas y debilidades, junto con algunas experiencias de implementación.

Red de Sensores Inalámbricos (WSN)

La Red de Sensores Inalámbricos (WSN) consiste en una red inalámbrica que consta de sensores para recolectar datos en una variedad de entornos [Cha10, Zen]. Para el monitoreo de calidad de agua, los sensores son colocados en el agua, ya sea estática o en movimiento [Cha10]. Está compuesta por el nodo sensor, la estación base y el centro de datos [Zen] (Figura 4.4).

Los nodos, también llamados motes, son componentes de la red equipados

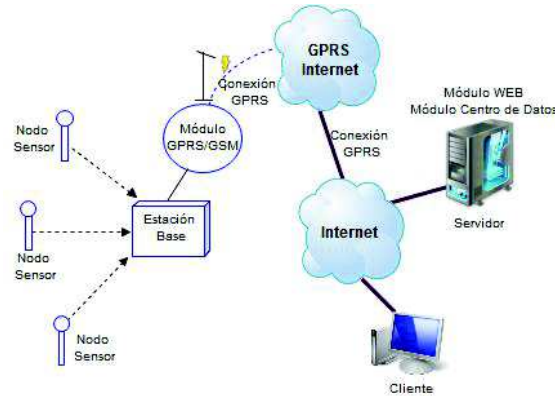


Figura 4.1: Arquitectura del sistema de las WSN para el monitoreo automático.

con sensores y actuadores, utilizados para evaluar e influir sobre el ambiente, procesar la información y comunicarla inalámbricamente [Zen]. El nodo recoge la información como una señal analógica, la convierte en una señal digital y envía a la Unidad Microcontrolador (MCU, *Micro Control Unit*).

Los datos recopilados por cada nodo se comunican inalámbricamente a través de la red (Wi-fi, bluetooth o ZigBee³) con un centro de procesamiento denominado estación base.

La estación base (también conocido como sumidero o sink) es el núcleo de la WSN, compuesta por el hardware y software. Tiene la capacidad de comunicación con otras redes (LAN, WLAN, WPAN, GPRS/GSM e Internet) [Cha10, GT01, CPGMGL⁺14, RA]. Controla al nodo sensor y transfiere los datos al módulo de centro de datos.

El módulo de centro de datos recibe y almacena los datos, para su posterior publicación (desde un servidor web). Se comunica con la red inalámbrica GPRS a través de Internet, bajo el protocolo TCP/IP [Cha10].

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” [RA, VV⁺16, ASSC02, ZHM⁺13].

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

- Realizan el monitoreo y control remoto inalámbrico en tiempo real [ZHM⁺13].
- Son escalables, pudiendo llegar a tener una alta cantidad de nodos [RA, VV⁺16].

³Conjunto 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)

- Presentan independencia de fuentes externas de alimentación, casi siempre son alimentadas por medio de baterías [RA].
- 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 [RA, VV⁺16].
- El sistema puede alcanzar las estructuras organizacionales necesarias sin intervención humana [VV⁺16].

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 [RA, VV⁺16].
- Los nodos son propensos a fallas o daños físicos, por usarse generalmente en ambientes hostiles [RA].
- 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 [RA].
- Usualmente no es posible obtener un esquema de direccionamiento global en una red de sensores, debido al gran número que la conforman [ASSC02].
- 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 [ZHM⁺13].
- El costo limita la implementación. La cantidad de nodos estará directamente relacionada con la implementación de la red [VV⁺16]. Existencia de sensores costosos por ejemplo para el monitoreo de nitrato [ZHM⁺13].
- Ausencia de sensores para todos los parámetros necesarios de calidad de agua [ZHM⁺13].
- Existe la necesidad de sensores con bajo consumo de energía [ZHM⁺13].

Las contribuciones de WSN para el monitoreo de calidad de aguas subterráneas 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 [TBA13]. Por otro lado, sí existen trabajos que presentan implementaciones en otros escenarios como aguas superficiales, agricultura y salud [TBA13, CPGMGL⁺14].

En [LDHS⁺07], implementaron una WSN con 8 nodos sensores, separados en distancias de hasta 1500 m, en un área de 6 km^2 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. El objetivo fue recoger las mediciones de 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 de agua.

Los trabajos [TBA13, ARGB05], 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 [TBA13] 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 [ARGB05] 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 [INV17] construyeron el prototipo completo propuesto en [IVR⁺17], 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). El costo requerido de inversión no fue mencionado.

Monitoreo Ciudadano (MC)

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 [MRPB12, CH11].

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 [AC06]. Es importante determinar qué monitorear y quién participará, continuando con un plan de monitoreo para convertir los datos en información [FDRERC⁺13, PAHZSESR16, dAeCOC].

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 [FDRERC⁺13].
- Permite el intercambio de información entre científicos y no científicos [CH11].
- Amplía la capacidad de los ciudadanos y comunidades en el conocimiento de su región [FDRERC⁺13, CH11].
- 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 [FDRERC⁺13].
- 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.) [FDRERC⁺13].
- El trabajo de campo puede realizarse en áreas más amplias y durante horas no laborales [CH11].

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 [CH11].
- Se deberán comparar los datos obtenidos por voluntarios con los datos de investigadores profesionales a modo de validar la información [CH11].
- Pueden requerirse recursos financieros y técnicos a largo plazo para crear capital social [CH11].

- La comunidad académica en general considera poco fiables los datos comunitarios [Fre08]. 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 [RDRC08].
- 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 [dAeCOC]. 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 [SCB⁺09].

El tipo de monitoreo ciudadano más común es el monitoreo del agua [FDRERC⁺13]. 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 [DRCD10].

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 [DRCD10, dAeCOC], siguiendo sus directrices para la planificación y capacitación (en aula y campo), a los ciudadanos como un público monitor.

Entre los trabajos que tratan sobre el MC, fueron identificados: revisiones [AC06, MRPB12, RDRC08, CH11], guías para la implementación [DRCD10, dAeCOC], y también proyectos y/o programas realizados [FDRERC⁺13, SCB⁺09, Vit, PAHZSESR16].

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 calidad de agua” [PAHZSESR16] 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” [Vit] 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-Mexico* (GWW-Mx)[FDRERC⁺13] 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 [SCB⁺09], realizaron el monitoreo ciudadano sobre la calidad de 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 geoestadístico 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.

4.3 Parámetros de Monitoreo

Esta sección resume la revisión de parámetros de calidad de agua subterránea, así como los mecanismos e instrumentos utilizados para el monitoreo remoto.

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) [Age] y los parámetros de monitoreo operativo utilizados para la vigilancia de las medidas de control propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [oms06].

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 remoto y Amazon.com.

La Tabla 4.1 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 [oms06].
- **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).

Tabla 4.1: Parámetros de calidad de agua, importancias y mecanismos existentes para monitorearlos

MC-Cuanti. (MC1) = Monitoreo Ciudadano Cuantitativo
 MC-Cuali. (MC2) = Monitoreo Ciudadano Cualitativo
 EM = Estudio de Mercado

N/A = No Aplica
 (1) Existen indicios de la capacidad cancerígena por inhalación y no por vía oral

Parámetro	Causa/Origen	Efecto en la salud por ingesta	Monitoreo remoto				
			WSN	MC1	MC2	Observaciones	Ref.
Parámetros Físico-químico (I)							
Alcalinidad (mg/L)	Disolución de rocas carbonatadas y la meteorización de alúmino-silicatos [Dre88]	El agua se vuelve turbia y puede causar irritación [Dre88]	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 test (EM)	[PAH ZSE SR 16], EM
Aluminio (mg/L)	Origen natural y las sales de aluminio utilizadas como coagulantes en el tratamiento del agua [oms06]	Posible neurotoxicidad. Hipótesis: la exposición al aluminio es un factor de riesgo para desarrollar Alzheimer [oms06]	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 [oms06]	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud [oms06]	Si	No	No	WSN: necesita calibración	[RBE +06], [Hyd]
Antimonio (mg/L)	Descargas de la industria petrolera, cerámica, electrónica [oms06]	No hay datos que indiquen capacidad cancerígena por vía oral (1) [oms06]	No	No	No	N/A	N/A
Arsénico (mg/L)	Disolución de minerales y menas de origen natural. Relacionada con la profundidad del pozo [oms06]	Produce cáncer [oms06]	Si	Si	No	WSN: necesita calibración MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM), posibles errores de med.	EM
Bario (mg/L)	Origen natural [oms06]	Causa hipertensión [oms06]	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) [KRGR93]	No hay datos que indiquen capacidad cancerígena por vía oral (1) [KRGR93]	No	No	No	N/A	N/A
Boro (mg/L)	Minerales de la corteza terrestre [GA12]	Náuseas, diarrea y vómitos [GA12]	No	No	No	N/A	N/A
Cadmio (mg/L)	Corrosión de los tubos galvanizados, erosión de depósitos naturales, efluentes de refinerías de metales o líquidos de escorrentía de baterías usadas o pinturas [oms06]	Potencialmente tóxico y su ingestión tiene efectos acumulativos en el tejido del hígado y los riñones [oms06]	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 [Wri04]	Agua dura. Piedras en los riñones, esclerosis y problemas en los vasos sanguíneos [Wri04]	Si	Si	No	WSN: necesita calibración MC1: test colorimét. p/ 1 test	[RBE +06], EM
Carbono orgánico total (mg/L)	Carbón [Wri04]	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud [42]	No	No	No	N/A	N/A

Parámetro	Causa/Origen	Efecto en la salud por ingesta	Monitoreo remoto				
			WSN	MC1	MC2	Observaciones	Ref.
Parámetros Físico-químico (II)							
Cloruro (mg/L)	Intrusión del agua del mar, aguas residuales, vertederos industriales [Wri04]	Hipertensión arterial [Wri04]	Si	No	No	WSN: necesita calibración	[RBE +06], [Hyd]
Cobalto (mg/L)	Elemento natural. Presente en minerales de hierro, níquel, cobre, plata, manganeso y zinc [Wri04]	Vómitos, náuseas, problemas de visión, problemas de corazón y daño de tiroides [Wri04]	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 [oms06]	Molestias gastrointestinales y lesiones hepáticas o renales [oms06]	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests (EM), posibles errores de medición	EM
Conductividad (mS/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)	[TBA 13], [Sol], EM
Cromo (mg/L)	Origen natural. El cromo metálico y los derivados del cromo (VI) [oms06]	El cromo (VI) es cancerígeno [oms06]	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 [Wri04]	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud [Wri04]	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 [oms06]	Los niveles en el agua de consumo no son peligrosos para la salud [oms06]	No	Si	Si	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests (EM), posibles errores de medición MC2: se realiza mediante evaluación visual y comparativa	[PAH ZSE SR 16], EM
Estroncio (mg/L)	Presente en la corteza de la Tierra [Wri04]	Los niveles en el agua de consumo no son peligrosos para la salud [Wri04]	No	No	No	N/A	N/A
Fluoruro (mg/L)	Origen natural [oms06]	Puede generar manchas en los dientes y fluorosis ósea incapacitante [oms06]	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 [Wri04]	Riñones y osteoporosis [Wri04]	No	No	No	N/A	N/A
Hierro (mg/L)	Presencia debido a la utilización de coagulantes de hierro o a la corrosión de tuberías de acero o hierro colado [oms06]	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud [oms06]	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) [Wri04]	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud [Wri04]	No	No	No	N/A	N/A

Parámetro	Causa/Origen	Efecto en la salud por ingesta	Monitoreo remoto				
			WSN	MC1	MC2	Observaciones	Ref.
Parámetros Físico-químico (III)							
Manganeso (mg/L)	Origen natural. Asociado al hierro [oms06]	Efectos neurológicos [oms06]	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test	EM
Molibdeno (mg/L)	Proviene de minas y del cobre [Wri04]	Dolores de articulación [Wri04]	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 [oms06]	No hay datos que indiquen capacidad cancerígena por vía oral (1) [oms06]	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)	EM
Nitrato (mg/L)	Asociado a las prácticas agropecuarias, fertilizantes y aguas residuales [oms06]	Enfermedad meta-hemoglobinemia o síndrome del recién nacido cianótico [oms06]	Si	Si	No	WSN: necesita calibración, sensor costoso MC1: test colorimétrico p/ 150 t.	[ZHM+13], [Hyd], EM
Nitrito (mg/L)	Relacionado con el Nitrato [oms06]	Relacionado con el Nitrato [oms06]	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 [oms06]	Irritación de la garganta [oms06]	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)	[TBA13], [Vit], [Is], [Hyd]
Plata(mg/L)	Origen natural [oms06]	No tiene repercusiones inmediatas sobre la salud [oms06]	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)	EM
Plomo (mg/L)	Materiales de plomo en contacto con el agua [oms06]	Tóxico para el sistema nervioso y efectos neurológicos [oms06]	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests (EM)	EM
Potasio (mg/L)	Metales alcalinos, fertilizantes, jabones líquidos [Wri04]	Perturbación en el ritmo cardíaco [Wri04]	No	No	No	N/A	N/A
Sodio (mg/L)	Misma fuente que el cloruro. En algunas rocas sedimentarias, por el intercambio de calcio y magnesio por sodio [oms06]	Problemas cardíacos e hipertensión [Wri04]	No	No	No	N/A	N/A
Sulfato (mg/L)	Origen natural. Yeso, azufre [oms06]	Efectos gastrointestinales [oms06]	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 2 tests (EM)	EM
Uranio (mg/L)	Origen natural. Formaciones rocosas ricas en uranio y centrales nucleares [oms06]	Nefritis. No hay datos suficientes sobre si es cancerígeno [oms06]	No	No	No	N/A	N/A
Parámetros Bacteriológicos (I)							
Coliformes fecales (UFC/100mL)	Pozos contaminados o abandonados, fosas sépticas, letrinas, materia fecal derivada de la ganadería intensiva [oms06]	Enfermedades infecciosas y parasitarias del aparato digestivo. Diarrea, cólera, disentería [oms06]	No	Si	Si	MC2: test colorimétrico p/ 1 test, resultado positivo/negativo MC1: Coliscan EasyGel p/ 1 test de E.coli, errores de medición	[PAH ZSE SR 16], EM

Parámetro	Causa/Origen	Efecto en la salud por ingesta	Monitoreo remoto				
			WSN	MC1	MC2	Observaciones	Ref.
Parámetros Bacteriológicos (II)							
Coliformes totales (UFC/100mL)	Pozos contaminados o abandonados, fosas sépticas, letrinas, materia fecal derivada de la ganadería intensiva [oms06]	Enfermedades infecciosas y parasitarias del aparato digestivo. Diarrea, cólera, disentería [oms06]	No	No	Si	MC2: test col-orimétrico p/ 1 test, resultado positivo/negativo (EM)	EM
Parámetros Estéticos (I)							
Color	Composición química y acciones naturales externas [oms06]	Enfermedades infecciosas [oms06]	No	No	Si	MC2: se realiza mediante evaluación visual y comparativa	[Vit]
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 [oms06]	Enfermedades infecciosas [oms06]	Si	Si	No	WSN: necesita calibración MC1: medidores digitales p/ ilimitados tests depende de la duración de la batería (EM)	[RBE +06], [Sol] EM
Turbidez (UNT)	Composición química y acciones naturales externas [oms06]	Enfermedades infecciosas [oms06]	Si	No	Si	WSN: necesita calibración MC2: se realiza mediante evaluación visual y comparativa	[PAH ZSE SR 16], [Vit], [Is]

Existen contaminantes químicos que ocasionan efectos adversos para la salud, por lo tanto, generan preocupación y aumentan el interés de su evaluación permanente. Entre los contaminantes que ocasionan efectos en la salud y 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.

Cabe resaltar que, la mayoría de las sustancias químicas presentes en el agua, solo después de una exposición prolongada (durante años, más que meses) son potencialmente peligrosas para la salud [oms06].

El arsénico y cromo, son parámetros importantes a evaluar, ya que se ha demostrado que su ingesta produce cáncer en el ser humano [oms06].

El nitrato, cuya ingesta de agua con altas concentraciones se reduce a nitrito en el estómago de los lactantes, puede oxidar la hemoglobina a metahemoglobina, impidiendo el transporte de oxígeno en el organismo. La enfermedad, denominada metahemoglobinemia, produce cianosis y en concentraciones más altas, asfixia [oms06].

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

El hierro y el manganeso también generan preocupación debido a sus efectos sobre la potabilidad del agua [oms06]. 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 [oms06].

Con los métodos de monitoreo remoto (WSN y MC) 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).

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 [PAHZSESR16, Vit]. 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 [PAHZSESR16].

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 de reactivos colorimétricos, para algunos parámetros es posible realizar hasta 150 pruebas y 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.

4.4 Propuesta de Monitoreo Remoto

Las WSN resultan una herramienta útil para la recolección automática de datos en el monitoreo de aguas subterráneas, sin embargo, teniendo en cuenta los requisitos del sistema se presentan algunas limitaciones:

- Serán necesarias una cantidad bastante considerada de nodos para monitorear en varias zonas dentro del área de estudio (567 km^2). En la literatura se presentan pequeñas áreas monitoreadas de 1 km^2 y 6 km^2 con distancias entre los nodos de 120 metros [LHP⁺09] hasta 1.500 metros [LDHS⁺07], por lo tanto, se necesitarán bastantes nodos (80 nodos considerando distancias de 1.500m entre ellos) para abarcar el área mencionada e implicará una inversión elevada.
- Alta inversión por nodo. El costo de las soluciones comerciales de sensores varía entre USD 254 a 500 por nodo de acuerdo a las propuestas presentadas por [TBA13], [LCGY11].
- Los parámetros de calidad de agua que permiten medir los sensores son limitados (10 parámetros identificados en la Tabla 4.1): amonio, arsénico, calcio, cloruro, conductividad hidráulica, fluoruro, nitrato, pH, temperatura y turbidez. De los cuales generan mayor interés de monitorear: arsénico, fluoruro y nitrato porque ocasionan efectos en la salud, y el pH porque es considerado como uno de los parámetros operativos más importantes de calidad de agua [oms06].

El MC involucra la participación de un grupo de voluntarios para el monitoreo y la recolección de datos. Por lo tanto, con este método de monitoreo remoto se amplía la capacidad de parámetros a monitorear y el alcance de observación, en lugares donde no serán posibles instalar nodos de sensores. Posibilita una mayor cantidad de puntos de monitoreo y cubrir al máximo posible las zonas de riesgos.

El costo promedio de cada kit es de USD 20, teniendo como referencia un estudio de mercado en sitios web de compañías que ofrecen soluciones comerciales integrales de monitoreo remoto y Amazon.com.

Los parámetros de calidad de agua posibles de medir con el MC son (23 parámetros identificados en la Tabla 4.1): alcalinidad, aluminio, arsénico, cadmio, calcio, cobalto, cobre, conductividad, cromo, dureza total, fluoruro, hierro, manganeso, molibdeno, níquel, nitrato, nitrito, pH, plata, plomo, sulfato, coliformes fecales y temperatura. De los cuales generan mayor interés de monitorear: aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, fluoruro, hierro, manganeso, nitrato, nitrito, pH, plomo, sulfato, coliformes fecales.

El registro periódico de los parámetros demanda una considerable inversión en equipamiento especializado. Difícilmente un único equipo mida la totalidad de los parámetros de interés, por lo que suele ser necesario contar con más de un dispositivo para realizar esta tarea [LVC⁺17].

Para la selección de pozos que se cubrirían con WSN y MC, se podría utilizar la metodología propuesta en el Capítulo 3.

Considerando los requisitos del sistema, se presenta una propuesta de monitoreo híbrido (ver Figura 4.2), combinando las WSN, ya que permite monitorear automáticamente, mediante evaluaciones fiables, recolección y envío de datos en tiempo real; y el MC, de manera a disminuir los costos, ampliar la cantidad de parámetros a evaluar y abarcar una mayor área de monitoreo. Para el diseño del sistema se propone un desarrollo escalar e integral respecto de las funcionalidades de cada método.

A continuación se detallan los componentes de esta propuesta: la selección de parámetros a monitorear, la arquitectura propuesta para el centro de datos del monitoreo híbrido, la arquitectura para cada nodo de las WSN, basado en el trabajo realizado por López et al. [LVC⁺17] y la estrategia de implementación del MC. Por último se presenta una guía de trabajo para la implementación de esta propuesta.

4.4.1 Selección de Parámetros

Basado en la revisión de parámetros de monitoreo, presentados en la sección anterior (Tabla 4.1), fueron seleccionados aquellos que cuentan con la posibilidad de monitorearlos remotamente, además de que generan preocupación debido a sus efectos para la salud y considerados como parámetros operativos más importantes de calidad de agua, indicados en [oms06]. Los parámetros seleccionados se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Selección de parámetros de calidad de agua posibles de evaluar con WSN, MC cuantitativo (MC1) y MC cualitativo (MC2).

Parámetros	Monitoreo remoto			
	WSN	MC1	MC2	Observaciones
Aluminio (mg/L)	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)
Arsénico (mg/L)	Si	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)
Cadmio (mg/L)	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)
Cobre (mg/L)	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests (EM)
Conductividad (mS/cm)	Si	Si	No	MC1: medidores digitales p/ ilimitados tests depende de la duración de la batería (EM)
Cromo (mg/L)	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test (EM)
Fluoruro (mg/L)	Si	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 5 test aprox., luego recargar la solución
Hierro (mg/L)	No	Si	No	MC1: medidores digitales p/ ilimitados tests depende de la duración de la batería (EM)
Manganeso (mg/L)	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 1 test
Nitrato (mg/L)	Si	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests
Nitrito (mg/L)	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests
pH	Si	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 100 tests (EM), medidores digitales p/ ilimitados tests depende de la duración de la batería (EM)
Plomo (mg/L)	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 150 tests (EM)
Sulfato (mg/L)	No	Si	No	MC1: test colorimétrico p/ 2 tests (EM)
Coliformes fecales (UFC/100mL)	No	Si	Si	MC2: test colorimétrico p/ 1 test, resultado positivo/negativo MC1: Coliscan EasyGel p/ 1 test de E.coli, errores de medición
Coliformes totales (UFC/100mL)	No	No	Si	MC2: test colorimétrico p/ 1 test, resultado positivo/negativo (EM)
Color	No	No	Si	MC2: se realiza mediante evaluación visual y comparativa
Temperatura (°C)	Si	Si	No	MC1: medidores digitales p/ ilimitados tests depende de la duración de la batería (EM)
Turbidez (UNT)	Si	No	Si	MC2: se realiza mediante evaluación visual y comparativa

4.4.2 Arquitectura del Sistema

El sistema propuesto para el monitoreo remoto (Figura 4.2), consta de los siguientes componentes: Red de Sensores Inalámbricos (WSN), Monitoreo ciudadano (MC) y el centro de procesamiento de datos, encargado de gestionar la información recibida desde las WSN y el MC.

En esta arquitectura la capacidad de proceso está repartida entre los clientes

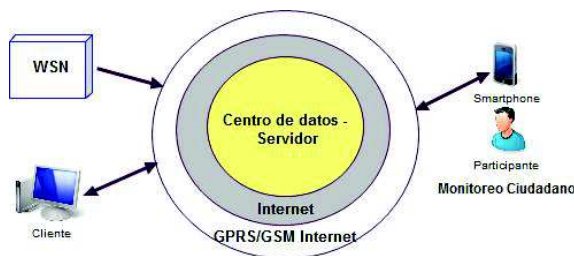


Figura 4.2: Propuesta de solución para el monitoreo remoto, combinando las tecnologías de las WSN y el Monitoreo Ciudadano.

y el servidor, permitiendo la centralización de la gestión de la información en el servidor y la separación de responsabilidades entre sensores o *smartphone*, para que un usuario final pueda acceder a todos los datos obtenidos en el monitoreo.

Centro de datos

El centro de datos recibirá y almacenará los datos, y luego los transferirá al módulo web donde serán publicados. Se comunicará con las WSN y MC a través de Internet y GSM, bajo el protocolo TCP/IP.

Para el centro de datos se propone una arquitectura de programación multi-nivel (Figura 4.3) compuesto por las capas de negocios y datos. La capa de negocios alojará el programa utilizado para visualizar y descargar los datos en formato estándar (CSV, *Comma Separated Value*). La capa de datos estará formada por un servidor de base de datos MySQL y recibirá solicitudes de almacenamiento o recuperación de información desde la capa de negocio.



Figura 4.3: Arquitectura del Centro de datos.

Se utilizará un servidor HTTP como servidor Web, permitirá a los clientes conectarse para observar los resultados de calidad de agua en una página Web (capa de presentación) y buscar la información necesaria en forma de tabla o gráfico.

Otro dispositivo de tipo *smartphone* también puede enviar información al servidor. Mediante una aplicación (formulario) en el que se pueden cargar los datos del MC y transmitirlos al servidor.

WSN

El sistema será diseñado de manera modular. En la Figura 4.4 se muestra la estructura general del sistema teniendo en cuenta dos escenarios:

- Sitios sin ninguna posibilidad de conexión a Internet: el nodo enviará los resultados utilizando tecnología de comunicación celular hacia el centro de datos.
- Sitios donde es posible utilizar una conexión a la red en las cercanías: los resultados se enviarán a un nodo intermedio que se encuentra conectado a Internet y desde allí enviarlos hacia el centro de datos. De esta manera se evitará afrontar el costo de la transmisión vía tecnología celular.

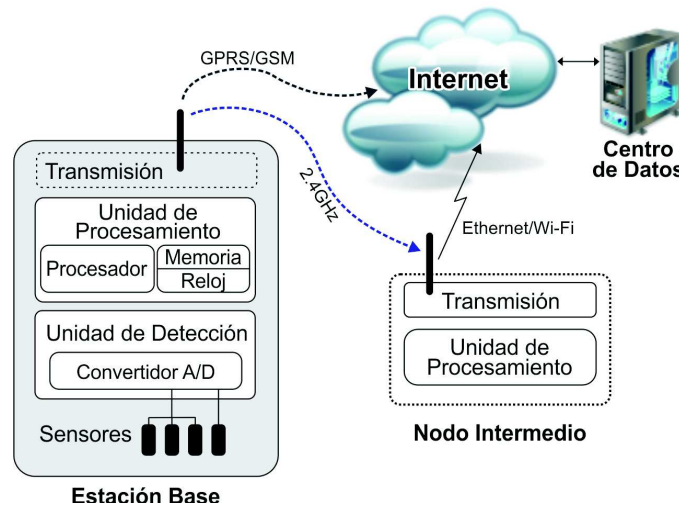


Figura 4.4: Arquitectura de las WSN.

Para la estación base se propone el uso de una placa Arduino Pro Mini [Ard] que cuenta con el microcontrolador ATmega328P, compatible con cualquier componente que funcione con Arduino UNO [Ard]. Para el almacenamiento se podrá implementar un *shield data logger* propio de consumo reducido, junto con un módulo independiente de reloj como el RTC DS3231 (capaz de brindar la fecha y hora de una medición) y una tarjeta microSD como el Catalex.

Se propone la utilización de sensores de calidad de agua de la marca Vernier [Verb], posee microcontroladores económicos y fáciles de programar, como el Ar-

duino [Ard]. Posee una interfaz Vernier Arduino [Vera] que permite realizar conexiones desde los microcontroladores Arduino a los sensores.

Considerando los parámetros seleccionados en la sección anterior, será posible medir con los sensores mencionados: pH, nitrato, conductividad, temperatura, y turbidez (5 de 7 parámetros posibles de monitorear con WSN listados en la Tabla 4.2).

Será necesario una calibración cuidadosa de los sensores para obtener resultados precisos. La calibración se realizará con el instrumento LabQuest 2, compatible con todos los sensores Vernier.

El sensor recogerá la información de calidad de agua como una señal analógica, la convertirá en una señal digital con un conversor Analógico/Digital de 12 bits de alta precisión y luego la enviará a la Unidad Microcontrolador.

La estación base permite incorporar alternativas de transmisión hacia Internet contemplando diferentes escenarios: i) para aquellos lugares donde la única posibilidad de acceso sea a través de la red de telefonía celular o, ii) para aquellos sitios con una conexión cercana a Internet (1km aproximadamente).

Para la transmisión celular se puede programar los shields SM5100b [spr] y SIM900 [Pla]. En ambos casos, el envío de datos es a través de solicitudes HTTP.

El otro escenario planteado podrá enviar los datos hacia Internet usando un nodo intermedio. Esta alternativa podrá utilizarse cuando la instalación de la estación base se encuentre cercana a algún sitio con conexión a Internet, evitando afrontar los costos mensuales de la transmisión celular y protegiendo la estación del vandalismo. El nodo intermedio (Figura 4.4) funciona como una estación de retransmisión, por un lado recibe los datos a través de un enlace inalámbrico y por otro lado se conecta a Internet utilizando Ethernet o Wi-Fi 802.11, dependiendo de la conexión del lugar.

El enlace de radiofrecuencia entre la estación base y el nodo intermedio podrá utilizar el módulo NRF24L01 [Nor] cuyas características destacables son la corrección de errores y protocolo de reenvío, comunicación duplex, banda de libre uso a nivel mundial (2.4GHz), velocidad configurable de 250 kbps, 1 o 2 Mbps, bajo consumo y alcance hasta 1.1km. Si el nodo intermedio cuenta con una conexión cableada al alcance es posible incorporar el shield Ethernet y programarlo usando la biblioteca que permite establecer solicitudes HTTP para el envío de los datos hacia Internet. Por otra parte, si se dispone de una conexión inalámbrica 802.11 se utiliza la placa ESP8266 [Esp] que permite una comunicación serial por software para generar una solicitud HTTP. Al igual que el módulo de transmisión celular, las solicitudes se realizan mediante comando AT.

Los datos del muestreo serán enviados a un sistema web alojado en el centro de datos.

Estrategia de implementación del MC

Para la implementación del MC se propone tener en cuenta los siguientes componentes:

- Problema: riesgo de contaminación del acuífero Patiño (ver Figura 2.11 del Capítulo 2) y alta inversión para el monitoreo automático del agua subterránea con WSN.
- Objetivo: realizar un monitoreo remoto de calidad de agua subterránea cubriendo el área del Gran Asunción.
- Participantes: serán seleccionados pozos pertenecientes a aguaterías y juntas de saneamientos, cada una con una persona (participante) responsable de realizar el monitoreo, previa aceptación de colaboración.
- Parámetros a monitorear: pH, nitrato, conductividad, temperatura, y turbidez (también posibles de monitorear con WSN), además de arsénico, cromo, nitrito, coliformes fecales y hierro. Estos fueron seleccionados porque son utilizados para la vigilancia de las medidas de control propuesto por la OMS y generan riesgos sobre la salud [oms06].
- Forma de participación y recolección de datos: cada participante realizará el monitoreo remoto del pozo principal de la aguatería o junta de saneamiento. Utilizará el kit para realizar los tests/análisis y enviará los resultados de cada análisis vía web o aplicación móvil. Los kits son paquetes de pruebas de campo con contenedores pre-empacados de químicos para analizar el agua en relación a un químico en particular. Para la correcta utilización del kit y envío de resultados, se distribuirán manuales de uso y videos instructivos que estarán disponibles en línea.
- Envío de los resultados: el participante completará un formulario con los resultados obtenidos en los tests. Cada participante deberá autenticarse para acceder al formulario y completar con los datos requeridos. El formulario estará disponible en la web y/o aplicación móvil.
- Análisis de los datos: la información de cada formulario será almacenado en la base de datos del servidor web, también utilizado en el monitoreo

automático. La información podrá ser descargada por el usuario encargado del análisis de los resultados, para analizar y validar los datos utilizando métodos estadísticos.

- Socialización de los resultados: los resultados de cada pozo de monitoreo serán expuestos en una página Web. Los participantes podrán visualizar la información en forma de tabla o gráfico.

Además de los componentes mencionados, se establecerá una frecuencia de muestreo considerando las Guías de Calidad de Agua de la Organización Mundial de la Salud - OMS [oms06], donde se menciona que es necesaria una muestra al mes por cada 10.000 habitantes. Por lo tanto, se tendrá en cuenta a la cantidad de habitantes por aguatería o junta de saneamiento.

4.5 Guía de Trabajo

A continuación se listan los próximos pasos más relevantes para realizar la implementación de la propuesta presentada en este capítulo.

- Realizar un análisis de la viabilidad de la propuesta presentada.
- Estimar los costos de hardware y software necesarios para las WSN y MC.
- Seleccionar pozos para una red de monitoreo con WSN, utilizando la metodología del Capítulo 3.
- Seleccionar pozos, utilizando la metodología del Capítulo 3, y los participantes para el MC.
- Desarrollar un prototipo para la estación base y realizar pruebas de campo y laboratorio.

4.6 Resumen

En este capítulo se presentó el planteamiento del problema y se definieron los requisitos del sistema para el diseño de sistema de monitoreo remoto para un área del acuífero Patiño. Se revisó la existencia de soluciones para monitorear remotamente la calidad de aguas subterráneas, utilizando un método de mapeo sistemático de la literatura, que permite analizar un conjunto de trabajos de investigación y responder a la pregunta de investigación: ¿Qué solución/es se

han planteado para el monitoreo remoto de calidad de aguas subterráneas en tiempo real?

En la revisión se identificaron a las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) como la solución para monitorear automáticamente las aguas subterráneas. Como otro método de monitoreo remoto, se identificó la utilización de kits de reactivos colorimétricos, razonablemente baratos, en comparación a las WSN, y pueden ser utilizados como instrumentos para realizar evaluaciones en el mismo sitio de muestreo; vinculando a un grupo de ciudadanos, denominado como Monitoreo Ciudadano (MC).

Las WSN poseen ciertas limitaciones porque son utilizadas en zonas pequeñas (entre 1 y 6 km^2), los sensores son costosos y no están disponibles para todos los parámetros necesarios de calidad de agua. Pese a dichas limitaciones, se identificó que siguen siendo muy eficaces debido a las evaluaciones fiables que se pueden realizar y la recolección de datos en tiempo real [ZHM⁺13].

Las revisiones y evaluaciones realizadas fueron utilizadas como punto de partida para presentar un diseño de sistema de monitoreo remoto para el acuífero Patiño, combinando las WSN y el MC para mitigar las debilidades de uno con las fortalezas del otro, abarcar un mayor área de monitoreo y disminuir los costos de implementación.

Para el diseño de sistema de las WSN, se propone la utilización de plataformas de hardware libre para la unidad de procesamiento, basado en Arduino, con la posibilidad de transmitir datos hacia Internet para su visualización en un sitio web. La estación base propuesta tiene la flexibilidad necesaria para modificar sus funciones, incorporar sensores y módulos con diferentes tecnologías de transmisión, reduciendo los costos en comparación a alternativas comerciales. Se propone la utilización de sensores comerciales de la marca Vernier [Verb] porque posee una interfaz Vernier Arduino que permite realizar conexiones desde los microcontroladores Arduino a los sensores.

Considerando los parámetros seleccionados en la Tabla 4.2, será posible medir con los sensores mencionados: pH, nitrato, conductividad, temperatura, y turbidez.

Para la implementación del Monitoreo ciudadano se propone tener en cuenta: el problema, los objetivos, los participantes, la forma de participación y recolección de datos, el envío de los resultados, el análisis de los datos y la socialización de los resultados. Los parámetros a monitorear son: pH, nitrato, conductividad, temperatura, y turbidez (también posibles de monitorear con WSN), además de arsénico, cromo, nitrito, coliformes fecales y hierro. Los parámetros fueron Se-

leccionados porque son utilizados para la vigilancia de las medidas de control propuesto por la OMS y generan riesgos sobre la salud [oms06].

También fueron definidos los próximos pasos relevantes para realizar la implementación de la propuesta presentada en este capítulo.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se presentó una modificación del modelo de vulnerabilidad DRASTIC [ALPB87], para obtener un índice de riesgo de contaminación del acuífero Patiño (1173 km^2), basado en un análisis de datos existentes sobre el área de estudio. La metodología utilizada incluyó la adición de parámetros antropogénicos como el uso de la tierra, la densidad de viviendas con pozos ciegos por hectárea y las vías principales de transporte, y luego calibrados utilizando las concentraciones de contaminantes como Nitrógeno total (N_T) y Coliformes totales (C_T), obteniendo un mapa de riesgo de contaminación por contaminante.

Se propuso la normalización del valor de Índices de riesgos, ajustándolo a una misma escala del 0 al 100 para poder compararlos. Los coeficientes de correlación antes y después de la calibración fueron 0,073 y 0,522 respectivamente para el mapa de riesgo de N_T , mientras que los coeficientes de correlación pre y post calibración para los mapas de C_T fueron 0,357 y 0,7 respectivamente. Los mapas indicaron que, el 42% del acuífero tiene un riesgo de contaminación de medio a alto.

Los mapas fueron comparados, mediante análisis exploratorios y geoestadísticos, para verificar si es necesario un mapa de riesgo por tipo de contaminante o si un mapa podría reemplazar al otro. Los resultados indicaron que, cualitativa y cuantitativamente, los mapas son suficientemente diferentes y que un mapa de riesgo no puede reemplazar a otro. Las implicancias prácticas son que, un sistema global de monitoreo sin focalizar en un contaminante en específico, quizás no sea la forma adecuada de afrontar el problema de monitoreo ya que en tratar de encontrar los dos contaminantes se podría dar el caso de no encontrar ninguno.

Los índices de riesgos más altos (70-100) se encontraron en las áreas urbanas, en Asunción y el Gran Asunción (Luque, Fernando de la Mora, San Lorenzo,

Villa Elisa, Lambaré, Mariano Roque Alonso, Ñemby, Capiatá, Limpio y San Antonio).

A partir de los mapas de riesgos de contaminación realizados sobre todo el área del acuífero Patiño, se estableció un nuevo área de estudio, la ciudad de Asunción y la demás ciudades del Gran Asunción (567 km^2 sobre el acuífero Patiño), como zona para realizar una campaña de análisis de calidad de agua.

Para la campaña se necesitó seleccionar 70 pozos, de los 2.830 conocidos en el área de estudio. El modelo propuesto se solucionó por medio de un algoritmo genético multi-objetivo NSGA-II, para el cual se consideró como funciones objetivos: la maximización de los índices de NT, la maximización de los índices de CT y la maximización del área de cobertura.

Además se propuso un diseño de monitoreo remoto para el área de Asunción y Gran Asunción. Se definieron los requisitos del sistema y se revisó la literatura existente sobre las soluciones para monitorear remotamente la calidad de aguas subterráneas. Fueron identificadas las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) como la solución para monitorear automáticamente las aguas subterráneas. Como otro método de monitoreo remoto, se identificó la utilización de kits de reactivos colorimétricos, utilizados como instrumentos para realizar evaluaciones en el mismo sitio de muestreo; vinculando a un grupo de ciudadanos, denominado como Monitoreo Ciudadano (MC).

Considerando los requisitos definidos, se presentó una propuesta de monitoreo híbrido (ver Figura 4.2), combinando las WSN, ya que permite monitorear automáticamente, mediante evaluaciones fiables, recolección y envío de datos en tiempo real; y el MC, de manera a disminuir los costos, ampliar la cantidad de parámetros a evaluar y abarcar una mayor área de monitoreo.

Para el diseño de sistema de las WSN, se propuso la utilización de plataformas de hardware libre para la unidad de procesamiento, basado en Arduino, con la posibilidad de transmitir datos hacia Internet para su visualización en un sitio Web. La estación base propuesta tiene la flexibilidad necesaria para modificar sus funciones, incorporar sensores y módulos con diferentes tecnologías de transmisión, reduciendo los costos en comparación a alternativas comerciales. Se propuso la utilización de sensores comerciales de la marca Vernier [Verb] porque posee una interfaz Vernier Arduino que permite realizar conexiones desde los microcontroladores Arduino a los sensores.

En la propuesta también se consideró una selección de parámetros de calidad de agua, basado el estándar de vigilancia de calidad de agua indicado por la EPA [Age] y los parámetros de monitoreo operativo utilizados para la vigilancia de las

medidas de control propuestos por la OMS [oms06]. Los parámetros a medir con WSN son: pH, nitrato, conductividad, temperatura, y turbidez. Mientras que, con el MC serán posibles medir los mismos parámetros que en WSN, además del arsénico, cromo, nitrito, coliformes fecales y hierro.

Se espera que los resultados y las propuestas presentadas en este trabajo proporcionen un recurso para los especialistas, instituciones o agencias nacionales, que tienen como mandato la salvaguarda ambiental y el desarrollo sustentable de los recursos naturales, de forma que estos puedan establecer una red de monitoreo acorde a sus necesidades.

5.1 Trabajos futuros

Con base en los resultados obtenidos, se presentan a continuación algunos trabajos futuros que han sido identificados.

- Realizar la campaña de análisis de calidad de agua en los 70 pozos seleccionados y utilizar los resultados obtenidos para validar los mapas de riesgos presentados en el Capítulo 2 y calibrar los mapas de riesgos de contaminación con los nuevos resultados.
- Seleccionar los parámetros a monitorear, a partir de los resultados obtenidos en la campaña de análisis de calidad de agua. Priorizar los parámetros fuera del valor admisible para el agua de consumo humano.
- Realizar un análisis de la viabilidad de la propuesta presentada para el monitoreo remoto.
- Estimar los costos de hardware y software necesarios para las WSN y MC.
- Seleccionar pozos para una red de monitoreo con WSN y MC, utilizando la metodología del Capítulo 3.
- Desarrollar un prototipo para la estación base y realizar pruebas de campo y laboratorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [AC06] Paul E Allen and Caren B Cooper. La ciencia ciudadana como herramienta para el monitoreo de la biodiversidad. *Especies, espacios y riesgos: monitoreo para la conservación de la biodiversidad*, page 17, 2006.
- [Age] EPA Environmental Protection Agency. Groundwater quality monitoring. [Web; accedido el 04-04-2017].
- [ALPB87] Linda Aller, Jay H Lehr, Rebecca Petty, and Truman Bennett. Drastic: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. *National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America*, 1987.
- [Ard] Arduino. Open-source electronics platform. [Web; accedido el 29-11-2017].
- [ARGB05] Srikanth Anumalla, Byrav Ramamurthy, David C Gosselin, and Mark Burbach. Ground water monitoring using smart sensors. In *Electro Information Technology, 2005 IEEE International Conference on*, pages 6–pp. IEEE, 2005.
- [ASSC02] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4):393–422, 2002.
- [AUAD14] Fakhre Alam, Rashid Umar, Shakeel Ahmed, and Farooq Ahmad Dar. A new model (drastic-lu) for evaluating groundwater vulnerability in parts of central ganga plain, india. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(3):927–937, 2014.
- [Aug08] Miguel Auge. Agua subterránea, deterioro de calidad y reserva. 2008.
- [AZ02] T Al-Zabet. Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the drastic method. *Environmental Geology*, 43(1-2):203–208, 2002.
- [Bal94] Shumeet Baluja. Population-based incremental learning. a method for integrating genetic search based function optimization and competitive

- learning. Technical report, Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh Pa Dept Of Computer Science, 1994.
- [BB96] Jamie Bartram and Richard Ballance. *Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*. CRC Press, 1996.
- [C⁺93] National Research Council et al. Ground water vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty. committee on techniques for assessing ground water vulnerability. *Water Science and technology Board, Commission on Geosciences, Environment, and Resources. National Academy Press, Washington DC*, page 179, 1993.
- [CH11] Cathy C Conrad and Krista G Hilchey. A review of citizen science and community-based environmental monitoring: issues and opportunities. *Environmental monitoring and assessment*, 176(1):273–291, 2011.
- [Cha10] Nchimunya Chaamwe. Wireless sensor networks for water quality monitoring: A case of zambia. In *Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [ckc07] Informe tecnico 1.1: Resumen ejecutivo. estudio de politicas y manejo ambiental de aguas subterraneas en el area metropolitana de asuncion - acuífero patino. Technical report, Cooperacion Tecnica ATN JC-8228-PR-SENASA-BID, 2007.
- [CLCR06] Sergio Cardozo L. and Claudia Crosa R. Estudio de la contaminacion del acuífero patino, 2006.
- [CPGMGL⁺14] Alejandro Cama-Pinto, Francisco Gil-Montoya, Julio Gómez-López, Amos García-Cruz, and Francisco Manzano-Agugliaro. Wireless surveillance sytem for greenhouse crops. *Dyna*, 81(184):164–170, 2014.
- [CV11] FA Carvallo Vargas. Estudio de la vulnerabilidad ambiental de los acuíferos en las areas urbanas de san juan bautista e itaugua, in programa de saneamiento y agua potable para el chaco y ciudades intermedias de la region oriental del paraguay (pr-l1060 y pr-g1011). Technical report, Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2011.
- [CVVL02] Carlos A Coello Coello, David A Van Veldhuizen, and Gary B Lamont. *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. 2002.

- [dAeCOC] Oficina del Asesor en Cumplimiento Ombudsman (CAO). Monitoreo participativo del agua. guía para prevenir y manejar el conflicto. [Web; accedido el 19-03-2017].
- [DAPM00] Kalyanmoy Deb, Samir Agrawal, Amrit Pratap, and Tanaka Me-yarivan. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: Nsga-ii. In *International Conference on Parallel Problem Solving From Nature*, pages 849–858. Springer, 2000.
- [dAS] Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Curso planes de emergencia. unidad 2: Analisis de vulnerabilidad. [Web; accedido el 28-11-2017].
- [dge12a] Compendio estadístico ambiental del paraguay - año 2011. Technical report, Direccion General de Estadística Encuestas y Censos (DGEEC), 2012.
- [dge12b] Encuesta permanente de hogares. Technical report, Direccion General de Estadística Encuestas y Censos (DGEEC), 2012.
- [Dix05] B Dixon. Groundwater vulnerability mapping: a gis and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, 25(4):327–347, 2005.
- [DPAM02] Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and TAMT Me-yarivan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2):182–197, 2002.
- [DRCD10] WG Deutsch, SS Ruiz Córdova, and BL Duncan. Community based water monitoring. a practical model for global watershed stewardship. Auburn, USA. *Global Water Watch Program, Auburn University*, 2010.
- [Dre88] James I Drever. *The geochemistry of natural waters*, volume 437. prentice Hall Englewood Cliffs, 1988.
- [EM90] Barry M Evans and Wayne L Myers. A gis-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with drastic. *Journal of Soil and Water Conservation*, 45(2):242–245, 1990.
- [Esp] Espressif. Esp8266ex datasheet version 4.3. [Web; accedido el 29-11-2017].
- [Far08] Mohammad Moravvej Farshi. Improving genetic algorithms for optimum well placement. In *Department of Energy Resources Engineering*, page 81. Stanford University, 2008.

- [fca13] Cobertura de la tierra paraguay 2011. Technical report, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asuncion (FCA-UNA), Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 2013.
- [FDRERC⁺13] Adriana C FLORES-DÍAZ, Miriam G RAMOS-ESCOBEDO, Sergio S RUIZ-CÓRDOVA, Robert MANSON, Eduardo ARANDA, and William G DEUTSCH. Monitoreo comunitario del agua: Retos y aprendizaje desde la perspectiva de global water watch-méxico. *México, DF: GWW. Recuperado de <http://www.researchgate.net/publication/268803861>*, 2013.
- [FH88] SSD Foster and R Hirata. Groundwater pollution risk assessment. *A methodology using available data. Pan Ame. Cent. for Sanit. Engin. and Envir. Scien.(cepis). Lima*, 1988.
- [FHG⁺03] Stephen Foster, Ricardo Hirata, Daniel Gomes, Mónica D Elia, and Marta Paris. *Protección de la calidad del agua subterránea*. Banco Mundial, 2003.
- [Fig07] C Figueredo. Informe tecnico 2.2: Geologia del area del acuífero patino. estudio de politicas y manejo ambiental de aguas subterraneeas en el area metropolitana de asuncion - acuífero patino. Technical report, Cooperacion Tecnica ATN JC-8228-PR-SENASA-BID, 2007.
- [Fil15] Alessio Fileccia. Some simple procedures for the calculation of the influence radius and well head protection areas (theoretical approach and a field case for a water table aquifer in an alluvial plain) alcune semplici procedure per il calcolo del raggio di influenza e delle aree di protezione attorno ai pozzi (sintesi teorica ed illustrazione di un caso pratico per un acquifero freatico alluvionale). *Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater*, 4:007–023, 2015.
- [FM93] Stephanie Forrest and Melanie Mitchell. What makes a problem hard for a genetic algorithm? some anomalous results and their explanation. *Machine Learning*, 13(2-3):285–319, 1993.
- [Fos87] SSD Foster. *Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied Scientific*

- Research*. Netherlands Organization for Applied Scientific Research, 1987.
- [Fre08] Amy Freitag. Comparing best management practices of community based monitoring between habitats in the literature and in reality. 2008.
- [GA12] Yury G Gogotsi and Rostislav Aleksandrovich Andrievski. *Materials science of carbides, nitrides and borides*, volume 68. Springer Science Business Media, 2012.
- [Gol89] DE Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, 1989.
- [GS00] Gregory E Granato and Kirk P Smith. Automated groundwater monitoring system and method, February 8 2000. US Patent 6,021,664.
- [GT01] Matthias Grossglauser and David Tse. Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks. In *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1360–1369. IEEE, 2001.
- [Hir05] Mariza Hiriart. Impactos ambientales: acuíferos. Technical report, Instituto Nacional de Ecología, México, 2005.
- [HWT12] Huan Huan, Jinsheng Wang, and Yanguo Teng. Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified drastic model: a case study in jilin city of northeast china. *Science of the Total Environment*, 440:14–23, 2012.
- [ice] Plan de accion: Area metropolitana de asuncion sostenible, institution=Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES), BID, year=2014. Technical report.
- [INV17] Ana MC Ilie, D Nieto, and Carmela Vaccaro. Innovative groundwater monitoring technology. In *Conference: Le Giornate Dell Idrologia*, 2017.
- [IVR⁺17] Ana MC Ilie, Carmela Vaccaro, João Rogeiro, Teresa E Leitão, and Tiago Martins. 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.

- [JAFRAY08] Ahmad Jamrah, Ahmed Al-Futaisi, Natarajan Rajmohan, and Saif Al-Yaroubi. Assessment of groundwater vulnerability in the coastal region of oman using drastic index method in gis environment. *Environmental monitoring and assessment*, 147(1):125–138, 2008.
- [KCP⁺15] S Kaliraj, N Chandrasekar, T Simon Peter, S Selvakumar, and NS Magesh. Mapping of coastal aquifer vulnerable zone in the south west coast of kanyakumari, south india, using gis-based drastic model. *Environmental monitoring and assessment*, 187(1):4073, 2015.
- [KKB⁺94] Robert J Kalinski, William E Kelly, Istvan Bogardi, Richard L Ehrman, and Paul D Yaniamoto. Correlation between drastic vulnerabilities and incidents of voc contamination of municipal wells in nebraska. *Groundwater*, 32(1):31–34, 1994.
- [KRGR93] Robert M Kotloff, Paul S Richman, J Kathleen Greenacre, and Milton D Rossman. Chronic beryllium disease in a dental laboratory technician. *American Review of Respiratory Disease*, 147(1):205–207, 1993.
- [LAP04] Nicolaos Lambrakis, Andreas Antonakos, and George Panagopoulos. The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research. *Water Research*, 38(7):1862–1872, 2004.
- [LCGY11] Xiuhong Li, Xiao Cheng, Peng Gong, and Ke Yan. Design and implementation of a wireless sensor network-based remote water level monitoring system. *Sensors*, 11(2):1706–1720, 2011.
- [LDHS⁺07] Tuan Le Dinh, Wen Hu, Pavan Sikka, Peter Corke, Leslie Overs, and Stephen Brosnan. Design and deployment of a remote robust sensor network: Experiences from an outdoor water quality monitoring network. In *Local Computer Networks, 2007. LCN 2007. 32nd IEEE Conference on*, pages 799–806. IEEE, 2007.
- [LG95] et al. Lopez Gorostiaga, O. Proyecto de racionalizacion del uso de la tierra. estudio de reconocimiento de suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la region oriental del paraguay. Technical report, Ministerio de Agricultura y Ganaderia (MAG), Subsecretaria de Estado de Recursos Naturales y Medio Ambiente and BID, 1995.

- [LHP⁺09] Philip Loden, Qi Han, Lisa Porta, Tissa Illangasekare, and Anura P Jayasumana. A wireless sensor system for validation of real-time automatic calibration of groundwater transport models. *Journal of Systems and Software*, 82(11):1859–1868, 2009.
- [Lin05] Riitta Lindström. *Groundwater vulnerability assessment using process-based models*. PhD thesis, KTH, 2005.
- [LVC⁺17] Emiliano López, Carlos Vionnet, Guillermo Contini, Mariana Pérez Elena, and Renato Manzo. Desarrollo de una estación de medición agroclimática con hardware libre. In *IX Congreso Argentino de AgroInformática (CAI 2017)-JAIIO 46 (Córdoba, 2017)*, 2017.
- [LYY⁺07] Jin-Yong Lee, Myeong-Jae Yi, Young-Kwon Yoo, Kyung-Hwan Ahn, Gyoo-Bum Kim, and Jong-Ho Won. A review of the national groundwater monitoring network in korea. *Hydrological processes*, 21(7):907–919, 2007.
- [MC98] Abraham J Melloul and Martin Collin. A proposed index for aquifer water-quality assessment: the case of israel’s sharon region. *Journal of Environmental Management*, 54(2):131–142, 1998.
- [MDBB07] R Monte Domecq and J BÃ¡ez BenÃ¡tez. Informe tecnico 2.11: Balance hidrico del acuifero patino. estudio de politicas y manejo ambiental de aguas subterraneas en el area metropolitana de asuncion - acuifero patino. Technical report, Cooperacion Tecnica ATN JC-8228-PR-SENASA-BID, 2007.
- [MDSS01] CDA McLay, R Dragten, G Sparling, and N Selvarajah. Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. *Environmental Pollution*, 115(2):191–204, 2001.
- [MF98] M Martínez and V Fabregat. Aplicación del método drastic para la evaluación del riesgo de afectación a las aguas subterráneas por una obra lineal. *Barcelona, España*, pages 413–420, 1998.
- [MHCBBT⁺06] Marisa Mazari-Hiriart, Gustavo Cruz-Bello, Luis A Bojórquez-Tapia, Lourdes Juárez-Marusich, Georgina Alcantar-López, Luis E Marín, and Ernesto Soto-Galera. Groundwater vulnerability assessment for organic compounds: fuzzy multicriteria approach for mexico city. *Environmental Management*, 37(3):410–421, 2006.

- [mop10] Actualizacion del analisis sectorial de agua potable y saneamiento de paraguay. Technical report, Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones (MOPC), 2010.
- [MRPB12] Abraham Miller-Rushing, Richard Primack, and Rick Bonney. The history of public participation in ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(6):285–290, 2012.
- [MZDE15] Akhtar Malik Muhammad, Tang Zhonghua, Ammar Salman Dawood, and Bailey Earl. Evaluation of local groundwater vulnerability based on drastic index method in lahore, pakistan. *Geofísica internacional*, 54(1):67–81, 2015.
- [Neu72] Shlomo P Neuman. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, 8(4):1031–1045, 1972.
- [Nor] Nordic. nrf24l01 ultra low power 2.4ghz rf transceiver ic. [Web; accedido el 29-11-2017].
- [NPPS14] Aminreza Neshat, Biswajeet Pradhan, Saied Pirasteh, and Helmi Zuhaidi Mohd Shafri. Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified drastic model in the kerman agricultural area, iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(7):3119–3131, 2014.
- [NRFM⁺07] RCM Nobre, OC Rotunno Filho, WJ Mansur, MMM Nobre, and CAN Cosenza. Groundwater vulnerability and risk mapping using gis, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94(3):277–292, 2007.
- [oEA] University of East Anglia. Climatic research unit. [Web; accedido el 12-03-2016].
- [oms06] Guías para la calidad del agua potable. 3ra ed. ginebra. Technical report, Organizacion Mundial de la Salud (OMS), 2006.
- [PAHZSESR16] Maria Perevochtchikova, Nidya Aponte Hernandez, Verhonica Zamudio-Santos, and Gabriel Eduardo Sandoval-Romero. Community participatory monitoring of water quality: Case ajusco, mexico. *TECNOLOGIA Y CIENCIAS DEL AGUA*, 7(6):5–23, 2016.

- [PAL06] GP Panagopoulos, AK Antonakos, and NJ Lambrakis. Optimization of the drastic method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and gis. *Hydrogeology Journal*, 14(6):894–911, 2006.
- [PFMM08] Kai Petersen, Robert Feldt, Shahid Mujtaba, and Michael Mattsson. Systematic mapping studies in software engineering. In *EASE*, volume 8, pages 68–77, 2008.
- [Pla] LinkSprite Playground. Linksprite sim900 gprs-gsm shield. [Web; accessed el 29-11-2017].
- [PSKB11] Ranjeet Kumar Prasad, VS Singh, SKG Krishnamacharyulu, and Pallavi Banerjee. Application of drastic model and gis: for assessing vulnerability in hard rock granitic aquifer. *Environmental monitoring and assessment*, 176(1-4):143–155, 2011.
- [QGi11] DT QGis. Quantum gis geographic information system. *Open source geospatial Foundation project*, 45, 2011.
- [RA] C. S. Regoli Almada. Technical report.
- [Rah08] Atiqur Rahman. A gis based drastic model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in aligarh, india. *Applied geography*, 28(1):32–53, 2008.
- [RBE⁺06] Nithya Ramanathan, Laura Balzano, Deborah Estrin, Mark Hansen, Thomas Harmon, Jenny Jay, William Kaiser, and Gaurav Sukhatme. Designing wireless sensor networks as a shared resource for sustainable development. In *Information and Communication Technologies and Development, 2006. ICTD’06. International Conference on*, pages 256–265. IEEE, 2006.
- [RDRC08] E Reutebuch, W Deutsch, and S Ruiz Córdova. Community based water quality monitoring data credibility and applications. *Auburn University Alabama (ed) Alabama Water Watch. Alabama*, 24, 2008.
- [RN09] Alexis Rodríguez and Sergio Nesmachnow. Moe: un entorno de trabajo para optimización multiobjetivo con algoritmos evolutivos. *Reportes Técnicos 09-21*, 2009.

- [RRF10] Guillermo Gutiérrez Ribón, Humberto Flórez Ramos, and Vicente Vergara Flórez. Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero morroa a contaminación por plaguicidas aplicando la metodología drastic. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo; No 26 (2009): Julio-Diciembre*, 2010.
- [Rui07] Ronald Ruizenaar. Groundwater monitoring system, September 12 2007. US Patent App. 11/853,960.
- [Rup99] Michael G Rupert. Improvements to the drastic ground-water vulnerability mapping method. Technical report, US Geological Survey, 1999.
- [SA14] Dipankar Saha and Fakhre Alam. Groundwater vulnerability assessment using drastic and pesticide drastic models in intense agriculture area of the gangetic plains, india. *Environmental monitoring and assessment*, 186(12):8741–8763, 2014.
- [San] S Sanz. Els nitrats. la gran problematica en les aigues de pou. [Web; accedido el 29-11-2017].
- [SCB⁺09] Stephen Silliman, Pamela Crane, Moussa Boukari, Nicaise Yalo, Felix Azonsi, Flavien Glidja, et al. 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*, pages 27–35. IAHS Press, 2009.
- [SCM98] S Secunda, ML Collin, and Abraham J Melloul. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining drastic with extensive agricultural land use in israel’s sharon region. *Journal of environmental management*, 54(1):39–57, 1998.
- [SD94] Nidamarthi Srinivas and Kalyanmoy Deb. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3):221–248, 1994.
- [sen01] Estudio del acuífero patino. fortalecimiento de los estudios hidrogeológicos del senasa (fehs). Technical report, Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental (SENASA), Instituto Holandes de Geociencias Aplicadas, 2001.
- [Ses07] A Seshadri. A fast elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii, mathlab central, file exchange, mathworks. 2007.

- [SHS08] Sai Sumathi, T Hamsapriya, and P Surekha. *Evolutionary intelligence: an introduction to theory and applications with Matlab*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [SM02] Joseph James Salvo and Patricia Denise Mackenzie. Monitoring, diagnostic, and reporting system and process, March 12 2002. US Patent 6,356,205.
- [SMBS02] Timothy Mark Sivavec, Patricia Denise Mackenzie, Sunita Singh Baghel, and Joseph James Salvo. Method and system to remotely monitor groundwater treatment, December 10 2002. US Patent 6,491,828.
- [SNE16] Mahmood Sadat-Noori and Kumars Ebrahimi. Groundwater vulnerability assessment in agricultural areas using a modified drastic model. *Environmental monitoring and assessment*, 188(1):19, 2016.
- [spr] Spreadtrum: Sm5100b-d gsm/gprs module specification.
- [SSKC15] Anjali Singh, SK Srivastav, Sudhir Kumar, and Govind J Chakrapani. A modified-drastic model (drastica) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in lucknow, india. *Environmental Earth Sciences*, 74(7):5475–5490, 2015.
- [Sut] Tim Sutton. Analisis espacial vectorial (buffers). documentacion qgis 2.8. [Web; accedido el 20-09-2017].
- [T⁺14] QUANTUMGIS DEVELOPMENT TEAM et al. Quantum gis geographic information system. open source geospatial foundation project, 2014.
- [TBA13] Hanane Taffahi, Najlae Bensouda, and Yassine Salih Alj. Automated groundwater monitoring using telemetry. In *Intelligent Systems Modelling & Simulation (ISMS), 2013 4th International Conference on*, pages 596–600. IEEE, 2013.
- [TRW05] Y Tang, P Reed, and T Wagener. How effective and efficient are multi-objective evolutionary algorithms at hydrologic model calibration? *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(6):2465–2520, 2005.
- [Val97] E Valencia. Optimización mediante algoritmos genéticos. In *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, volume 109, pages 83–92, 1997.
- [Vera] Vernier. Arduino and vernier sensors. [Web; accedido el 29-11-2017].

- [Verb] Vernier. Vernier software and technology. [Web; accedido el 29-11-2017].
- [Vit] Vitalis. Kit ciudadano para el monitoreo de calidad del agua en venezuela (2013).
- [VL03] Christian Von Lücken. Algoritmos evolutivos para optimización multi-objetivo: un estudio comparativo en un ambiente paralelo asíncrono, 2003.
- [VT10] M Vargas and O Tosse. Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, 2010.
- [VT15] Abdorreza Vaezihir and Mehri Tabarmayeh. Total vulnerability estimation for the tabriz aquifer (iran) by combining a new model with drastic. *Environmental Earth Sciences*, 74(4):2949–2965, 2015.
- [VV⁺16] Andrés Mauricio Vela Velasco et al. 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.
- [WM07] A Wehrle Martinez. Informe tecnico 2.9: Inventario de fuentes potenciales de contaminacion. estudio de politicas y manejo ambiental de aguas subterranas en el area metropolitana de asuncion - acuífero patino. Technical report, Cooperacion Tecnica ATN JC-8228-PR-SENASA-BID, 2007.
- [WMS07] A Wehrle Martinez and K Sekita. Informe tecnico 2.8: Ensayos de bombeo. estudio de politicas y manejo ambiental de aguas subterranas en el area metropolitana de asuncion - acuífero patino. Technical report, Cooperacion Tecnica ATN JC-8228-PR-SENASA-BID, 2007.
- [Wri04] John Wright. *Environmental chemistry*. Routledge, 2004.
- [Zen] M Zennaro. Introduction to wireless sensor networks. [Web; accedido el 02-02-2017].
- [ZHM⁺13] Huma Zia, Nick R Harris, Geoff V Merrett, Mark Rivers, and Neil Coles. 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*, 96:126–138, 2013.