



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
Y MEDIO AMBIENTE

**Análisis, caracterización y modelación 3D de fugas de agua
en sistemas de abastecimiento de agua mediante imágenes de
GPR**

TESIS DOCTORAL

Autora:
Ing. Silvia Janeth Ocaña Levario

Dirigida por:
Dr. David Ayala Cabrera
Prof. Dr. Joaquín Izquierdo Sebastián

Valencia, diciembre de 2020

A Dios por que es quien me sostiene.

A mis padres porque siempre han creído en mí.

A mis hermanos por sus palabras de aliento.

A mi esposo porque me motiva a no rendirme.

A mis hijos porque son mi motor...

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a Dios porque me ha sostenido y me ha permitido llegar hasta aquí, solo él sabe lo difícil que ha sido. Gracias porque puso a personas extraordinarias en mi vida para que me impulsaran a llegar al fin de esta meta.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua y a la Fundación Carolina quienes me dieron esta gran oportunidad, a la Universidad Politécnica de Valencia por recibirme y formarme como profesional, brindándome las mejores herramientas, bajo la tutela de excelentes profesionales, gracias por la oportunidad y el apoyo brindado.

Sobre todo, a mis directores Dr. David Ayala Cabrera y Prof. Joaquín Izquierdo Sebastián, maravillosas personas a las que admiro profundamente y a quienes les debo absolutamente todo, gracias por darme la confianza de acudir a ustedes cuando las dudas me abordaban, por compartir conmigo sus amplios conocimientos científicos y nunca negarme su ayuda; mi más grande y profunda admiración siempre, sepan que no hay palabras que puedan describir todo el agradecimiento hacia ustedes, muchas gracias por su apoyo. Al Prof. Rafael Pérez García (QEPD) quien me motivó a seguir el camino de la investigación y quien en mis días oscuros

siempre tenía una sonrisa y una palabra de aliento, porque creyó en mí aún y cuando ni yo lo hacía. Gracias Rafa; no imaginas cómo te he echado de menos.

A todo el grupo de Fluing, sobre todo a Joanna, Pauline, Bruno y Silvia porque hacían mis días más llevaderos, por las largas pláticas, por las risas, por las lágrimas, por ser a veces mis maestros y compartirme sus conocimientos, gracias por permitirme conocerlos más allá de la oficina.

A mi familia, a mis padres, por creer siempre en mí y darme ánimos cuando sentía que ya no podía, por ser mis admiradores número uno siempre. A mis hermanos, porque siempre tenían una buena palabra que decir para que mi ánimo no decayera. A mi marido quien ha sido mi mano derecha siempre y en todo, gracias por tu ayuda desinteresada y tus valiosos aportes a mi trabajo, por tu amor y apoyo siempre, gracias porque crees en mí. A mis hijos Natalia y Santiago, a quienes les privé de mi tiempo y compañía muchas veces, quienes a pesar de su corta edad son los que con su alegría me motivan a lograr lo que me propongo.

A todos ustedes gracias.

Resumen

Los esfuerzos que hacen los países, en conjunto con organizaciones mundiales, tales como IWA (por *International Water Association*), ONU-Agua y OMS (*Organización Mundial de la Salud*), para mitigar el impacto ambiental en el campo de la hidráulica urbana son considerados de vital importancia. Sin embargo, la escasez de los recursos hídricos en el mundo aumenta diariamente. Esto viene dado por el aumento constante de la demanda en los sectores industrial, agrícola y urbano, provocado por el aumento poblacional y el cambio climático. Los administradores de los sistemas de abastecimiento de agua (WSSs, por sus siglas en inglés, *water supply systems*) se han visto desafiados a suplir la creciente demanda de los diferentes sectores con la cantidad, calidad y eficiencia necesarios y, a su vez, reducir el desperdicio y el mal uso del recurso.

Desde esta perspectiva, las fugas de agua son el mayor problema que enfrentan los administradores de estas empresas de servicios públicos. Las fugas en una red provocan problemas de salud, de escasez, económicos y medioambientales. El uso de técnicas de inspección no destructivas debe favorecer una rápida identificación de

problemas, para realizar acciones posteriores de reparación en la red. Este trabajo hace uso del GPR (siglas en inglés de *ground penetrating radar*) como técnica de inspección no destructiva porque: favorece la exploración del subsuelo sin causar alteraciones al medio, es de fácil aplicación y, además, permite obtener pseudo imágenes del subsuelo.

Uno de los objetivos de este documento es identificar y extraer características de una fuga en un WSS mediante imágenes de GPR, con el fin último de recrear las fugas a través de modelos 3D. Se realizaron ensayos de laboratorio bajo condiciones controladas donde se emuló una parcela en la cual se había enterrado una tubería con una pequeño orificio que simula una fuga de agua; tras introducir agua al sistema, se realizaron prospecciones con el GPR. Una vez finalizada la exploración del subsuelo, dado que las imágenes de GPR en bruto obtenidas no son fácilmente interpretables por personal no experto, tales imágenes fueron sometidas a procesamiento de datos que favorezcan su fácil interpretación.

Este documento presenta dos metodologías de procesamiento de datos que permiten obtener imágenes a partir de las cuales es posible identificar tanto los componentes del sistema como la fuga y su alcance. Las metodologías de tratamiento de datos aplicadas en este documento son una metodología basada en sistemas multi-agente y el filtro de varianza, metodología basada en parámetros estadísticos de segundo orden. Posteriormente, tras aplicar estas metodologías de procesamiento a las imágenes, se sometieron los resultados a un análisis que facilitase la mejor elección evitando la subjetividad del experto. Bajo este concepto, este documento propone el uso conjunto de técnicas multicriterio. Se utilizó el Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (FAHP, por sus siglas en inglés, *Fuzzy Analytical Hierarchy Process*), que permite ponderar varios criterios de evaluación, con el propósito de mitigar la incertidumbre que caracterizan los juicios de los expertos, en conjunto con

el método ELECTRE III para obtener la clasificación final de alternativas, todo esto de la manera más objetiva posible.

Los resultados de este documento son satisfactorios, permitiendo obtener amplio conocimiento de las fugas y su interacción con el subsuelo, proporcionando pautas para desarrollar posteriormente metodologías de automatización que permitan localizar, seguir y predecir problemas en los WSSs.

Abstract

The efforts made by the countries in collaboration with world organizations, such as IWA (for International Water Association), UN-Water and WHO (*for World Health Organization*), to mitigate the environmental impact in the field of urban hydraulics are considered of vital importance. However, the scarcity of water resources in the world increases daily, given by the constant increase in demand in the industrial, agricultural and urban sectors, caused by the population increase and the climate change. Managers of water supply systems (WSSs) are challenged to supply the growing demand of different sectors with sufficient quantity, quality and efficiency and, in turn, reduce waste and misuse of the resource.

Focusing this perspective, water leaks are the biggest problem faced by the managers of these utilities. Leaks in a network cause health, shortage, economic and environmental problems. The use of non-destructive inspection techniques favors rapid identification to carry out subsequent repair actions on the network. This work makes use of the GPR (ground penetrating radar) as a non-destructive inspection technique because: it favors the exploration of the ground without causing altera-

tions to the environment, it is easy to apply, and also allows to obtain pseudo images of the subsoil.

This document presents two data processing methodologies that allow obtaining images from which it is possible to identify both the system components and the leak and its scope. The data treatment methodologies applied in this document are a multi-agent-based system (MABS) methodology and the variance filter, a methodology based on second-order statistical parameters. Subsequently, after applying these processing methodologies to the images, the results are subjected to an analysis that eases the best choice, avoiding expert's subjectivity. Under this concept, this document proposes the joint use of two multi-criteria decision-making (MCDM) methods. The Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) is used first to weight various evaluation criteria, in order to mitigate the uncertainty that characterize the experts' judgments, in conjunction with the ELECTRE III method, to obtain the final classification of alternatives in the most objective way.

The results of this document are satisfactory, allowing to obtain extensive knowledge of leaks and their interaction with the subsoil, giving a guideline to subsequently develop automation methodologies that allow locating, monitoring and predicting problems in WSSs.

Resum

Els esforços que fan els països en conjunt amb organitzacions mundials, como ara IWA (per *International Water Association*), ONU-Agua i OMS (per *Organització Mundial de la Salut*), per a mitigar l'impacte ambiental en el camp de la hidràulica urbana són considerats de vital importància. No obstant això, l'escassetat dels recursos hídrics en el món augmenta diàriament, donat per l'augment constant de la demanda en els sectors industrial, agrícola i urbà, provocat per l'augment poblacional i el canvi climàtic. Els administradors dels sistemes d'abastiment d'aigua (WSSs, per les seues sigles en anglès, *water supply systems*) s'han vist desafiats a suplir la creixent demanda dels diferents sectors amb la quantitat, qualitat i eficiència necessaris i, al seu torn, reduir el desaprofitament i el mal ús del recurs.

Enfocant aquesta perspectiva, les pèrdues d'aigua són el problema més gran fet front pels directors d'aquestes utilitats. Les pèrdues d'aigua en una xarxa provoquen problemes de salut, d'escassetat, econòmics i mediambientals. L'ús de tècniques d'inspecció no destructives que afavoreixen una ràpida identificació per a realitzar accions de reparació posteriors en la xarxa. Aquest treball fa ús del GPR

(sigles en anglès per *ground penetrating radar*) com a tècnica d'inspecció no destructiva perquè afavoreix l'exploració del subsol sense causar alteracions al entorn, és de fàcil aplicació i a més permet obtenir pseudo imatges del subsol.

Un dels objectius d'aquest document és identificar i extraure característiques d'una pèrdua en un WSS mitjançant imatges de GPR, amb la fi última de recrear les pèrdues a través de models 3D. Es van realitzar assajos de laboratori sota condicions controlades on es va emular una parcel·la en la qual s'ha enterrat una canonada amb una xicotet forat que simula una pèrdua d'aigua; després d'introduir aigua al sistema, s'obtenen prospeccions amb el GPR. Una vegada finalitzada l'exploració del subsol, atès que les imatges de GPR en brut obtingudes no són fàcilment interpretables per personal no expert, són sotmeses a processament de dades que afavoreixen la seua fàcil interpretació.

Aquest document presenta dues metodologies de processament de dades que permeten obtenir imatges de les quals és possible identificar tant els components del sistema com la pèrdua i el seu abast. Les metodologies de tractament de dades aplicades en aquest document són una metodologia basada en multi-agents (MABS, per les seves sigles en anglès, *multi-agent-based systems*) i el filtre de variància, metodologia basada en paràmetres estadístics de segon ordre. Posteriorment, després d'aplicar aquestes metodologies de processament a les imatges se sotmeten els resultats a una anàlisi que faciliti la millor elecció evitant la subjectivitat de l'expert. Sota aquest concepte, aquest document proposa l'ús conjunt de tècniques de decisió multi-criteri (MCDM, per les seves sigles en anglès, *multi-criteria decision-making*). Es va utilitzar el Procés de Jerarquia Analítica Difusa (FAHP, per les seves sigles en anglès, *Fuzzy Analytical Hierarchy Process*) el qual s'utilitza per a ponderar diversos criteris d'avaluació, amb el propòsit de mitigar la incertesa que caracteritzen els judicis dels experts, en conjunt amb el mètode ELECTRE III, per

a obtenir la classificació final d'alternatives, tot això de la manera més objectiva possible.

Els resultats d'aquest document són satisfactoris, permetent obtenir ampli coneixement de les pèrdues d'aigua i la seua interacció amb el subsol, donant-nos la pauta per a desenvolupar posteriorment metodologies d'automatització que permeten localitzar, seguir i predir problemes en els WSSs.

Índice

Resumen	I
Abstract	V
Resum.....	VII
Índice.....	XI
Lista de figuras	XV
Lista de abreviaturas.....	XVII
1 Introducción	21
1.1 Introducción	21
1.1.1 Técnicas no destructivas	24
1.1.2 El GPR como técnica no destructiva.....	29
1.1.3 Procesamiento de imágenes GPR.....	32
1.1.4 Métodos multi-criterio para ayudar en la interpretación de imágenes	33
1.2 Objetivos	37
1.2.1 Objetivo General	37
1.2.2 Objetivos específicos	37
1.3 Justificación.....	38
1.4 Organización de tesis.....	41

2	3D Model evolution of a leak based on GPR image interpretations.....	45
	Publicación.....	45
	VERSIÓN AUTOR DEL ARTÍCULO.....	47
2.1	Abstract.....	47
2.2	Introduction.....	47
2.3	Overall approach.....	50
2.4	Case study: The layout for the laboratory tests.....	51
2.5	Interpretation and classification of the GPR profiles.....	52
2.6	Analysis of results.....	56
2.7	Conclusions.....	60
2.8	Acknowledgement.....	60
3	GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters.....	63
	Publicación.....	63
	VERSIÓN AUTOR DEL ARTÍCULO.....	65
3.1	Abstract.....	65
3.2	Introduction.....	66
3.3	Case study – assay configuration.....	69
3.4	Proposed methodology – variance filter.....	71
	3.4.1 Variance filter.....	71
	3.4.2 Raw image.....	72
	3.4.3 Variance filter image.....	72
	3.4.4 Smoothed image.....	73
	3.4.5 Binarization.....	73
	3.4.6 Processed image (contour selection).....	73
3.5	Analysis of results – variance filter.....	74
	3.5.1 First scenario – transversal slices.....	74
	3.5.2 First scenario – longitudinal slices.....	76
	3.5.3 Second scenario – transversal slices.....	77
	3.5.4 Second scenario – longitudinal slices.....	79
3.6	Comparison analysis using a multi-agent-based method.....	80

3.6.1	Pre-processing algorithm with multi-agent systems.....	81
3.6.2	Comparison and image analysis.....	82
3.6.2.1	<i>First scenario comparison- Transversal slices</i>	82
3.6.2.2	<i>First scenario comparison - Longitudinal slices</i>	84
3.6.2.3	<i>Second scenario comparison - Transversal slices</i>	84
3.6.2.4	<i>Second scenario comparison - Longitudinal slices</i>	86
3.7	Model Comparison.....	87
3.8	Conclusions.....	89
3.9	Acknowledgement.....	90
4	A hybrid multi-criteria approach to GPR image mining applied to water supply system maintenance.....	91
	Publicación.....	91
	VERSIÓN AUTOR DEL ARTÍCULO.....	93
4.1	Abstract.....	93
4.2	Introduction and literature review.....	94
4.3	Data processing techniques to handle GPR images from WSSs.....	99
4.3.1	Raw images.....	99
4.3.2	Multi-agent-based pre-processing algorithm.....	100
4.3.3	Subtraction method.....	102
4.3.4	Variance filter.....	104
4.4	Integration of MCDM methods to manage results of data processing analyses.....	105
4.4.1	The FAHP technique.....	105
4.4.2	The ELECTRE III to rank results of data processing analyses.....	110
4.5	Case study.....	115
4.5.1	The FAHP to calculate criteria weights.....	116
4.5.2	The ELECTRE III to rank alternatives.....	118
4.6	Conclusions.....	121
4.7	Acknowledgements.....	123
5	Discusión.....	125
5.1	Discusión.....	125

5.1.1	Discusión General	125
5.2	Discusión del capítulo 2	128
5.3	Discusión del capítulo 3	130
5.4	Discusión del capítulo 4	131
6	Conclusiones y líneas futuras.....	133
6.1	Introducción.....	133
6.2	Conclusiones.....	135
6.2.1	Ensayos en laboratorio.....	135
6.2.2	El GPR como método de inspección	137
6.2.3	Metodología basada en sistemas multi-agente.....	139
6.2.4	Metodología basada en el filtrado de varianza.	141
6.2.5	Toma de decisión mediante métodos multicriterio	143
6.3	Desarrollos futuros.	144
	Contribuciones propias	147
	Referencias.....	151

Lista de figuras

Figure 2.1 Survey configuration: (a) pipe burying process in the laboratory tank, (b) polypropylene plate – antenna sliding surface, (c) control set schematic configuration.	51
Figure 2.2 An example of the applied process: (a) raw image – MB matrix; (b) pre-processed image – Output1; (c) normalized pre-processed image – Output2; (d) image after range selection – Output3; (e) contouring, group selection; and (f) contour extraction and retrieval.....	55
Figure 2.3 Leakage area contour slices A through D.....	58
Figure 2.4 3D model leak evolution; (a) to (i) represent times t1 to t9, respectively.	59
Figure 3.1 Assay configuration: (a) Buried pipe (black), (b) polypropylene plate (light blue) - GPR antenna of 1.5 GHz, (c) data sampling configuration.....	69
Figure 3.2 Methodology: (a) Raw input image, (b) variance filter image, (c) smoothed image, (d) binarized image and (e) processed image.....	72
Figure 3.3 a) Raw images, b) variance filter images, and c) binarized images.....	75
Figure 3.4 a) Raw image, b) variance filter images, and c) binarized images	76
Figure 3.5 a) Raw images, b) variance filter images, and c) binarized images.....	77
Figure 3.6 a) Raw images, b) variance filter images, and c) binarized images.....	80
Figure 3.7 Scheme for the agent-race algorithm.....	82

Figure 3.8 (a) MABS pre-processed images and (b) variance filter images	83
Figure 3.9 (a) MABS pre-processed images and (b) variance filter images	84
Figure 3.10 (a) MABS pre-processed images and (b) variance filter images	85
Figure 3.11(a) MABS pre-processed images and (b) variance filter images	87
Figure 3.12 3D Models: (a) 3D model obtained from variance filter images and (b) 3D model obtained from MABS pre-processed images	88
Figure 4.1 Scheme for the agent-race algorithm	102
Figure 4.2 a) Raw image, MR_j matrix, (b) white matrix, MW, (c) subtraction matrix, MC_j , and (d) selection of color range for the subtraction matrix	103
Figure 4.3 Fuzzy version of the Saaty scale	107
Figure 4.4 Representation of the degree of possibility that $n1 \geq n2$	109
Figure 4.5 GPR images resulting from: raw image analysis (HF_1), multi-agent system (HF_2), subtraction method (HF_3), variance filter (HF_4)	116
Figure 4.6 Flowchart representing the application of the first phase of ELECTRE III	118
Figure 4.7 Flowchart representing the application of the second phase of ELECTRE III	119

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Significado
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
CCTV	<i>Closed-Circuit Television</i>
COPRAS	<i>COmplex PProportional ASsessment</i>
CR	<i>Consistency Ratio</i>
ELECTRE	<i>ELimination Et Choix TRaduisant la realitÉ (ELimination Et Choice Translating REality)</i>
FAHP	<i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FPCM	<i>Fuzzy Pairwise Comparison Matrix</i>
FTOPSIS	<i>Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
FPI	<i>Formación de Personal Investigador</i>
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
GRA	<i>Grey Relational Analysis</i>

HT	<i>Hydroscopy Technology</i>
IWA	<i>International Water Association</i>
LFEM	<i>Low Frequency Electromagnetic Field</i>
MABS	<i>Multi-Agent-Based Simulation</i>
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>
MAUT	<i>Multi-Attribute Utility Theory</i>
MAVT	<i>Multi-Attribute Value Theory</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision-Making</i>
MFL	<i>Magnetic Flux Leakage</i>
MIVES	<i>Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles</i>
NDT	<i>Non-Destructive Technique (Testing)</i>
OCDE	<i>Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos</i>
OMS	<i>Organización Mundial de la Salud</i>
ONU	<i>Organización de las Naciones Unidas</i>
PAID	<i>Programa de Ayudas de Investigación y Desarrollo</i>
PIRAT	<i>Pipe Inspection Real-time Assessment Technique</i>
PMF	<i>Passive Magnetic Fields</i>
PROMET-HEE	<i>Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations</i>
RMPS	<i>Rapid Magnetic Permeability Scan</i>
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>
SSET	<i>Sewer Scanner and Evaluation Technology</i>
TFN	<i>Triangular Fuzzy Numbers</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TrFN	<i>trapezoidal Fuzzy Numbers</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational Scientific and Cultural Organization</i>

UPV	<i>Universitat Politècnica de València</i>
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
VIKOR	<i>VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (Multicriteria Optimization and Compromise Solution)</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>
WI	<i>Wave Impedance</i>
WRI	<i>World Resources Institute</i>
WSS	<i>Water Supply System</i>

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Grandes son los desafíos que enfrentan los gobiernos y los gestores de los sistemas de abastecimiento de agua (denotados en este documento, en el que los capítulos clave están en inglés, como WSSs, por sus siglas en inglés, *water supply systems*) a nivel global. En la actualidad, la escasez provocada por la sobreexplotación de los recursos hídricos, así como la contaminación de los mismos, trae como consecuencia que las necesidades básicas de una población no puedan ser cubiertas con la cantidad, calidad y eficiencia mínimas necesarias. Asimismo, el aumento poblacional a nivel mundial provoca que la demanda de agua en los diferentes países vaya en aumento y, en consecuencia, los recursos hídricos disponibles disminuyan. Además, hay que sumar los desafiantes retos a los que se enfrentan estos sistemas como consecuencia del cambio climático.

En este sentido, la gestión de los recursos hídricos es un importante desafío a nivel mundial. Desde esta perspectiva, los gobiernos y las organizaciones a nivel mun-

dial han desarrollado e implementado políticas orientadas a satisfacer la demanda de agua con la calidad y cantidad suficiente, y asimismo garantizar el abastecimiento futuro (Huerta, Jiménez, & Prado, 2011). Al respecto, hay un problema persistente al que se denomina estrés hídrico que mide la presión que ejerce la actividad humana sobre los recursos hídricos y ofrece una indicación de la sostenibilidad ambiental del uso de los recursos hídricos. El estrés hídrico se define como la proporción de agua que extraen todos los sectores (social, agricultura e industrial) en relación con los recursos hídricos disponibles (FAO, 2018). Actualmente, el estrés hídrico a nivel mundial es del 13% y, pese a que la media mundial de estrés hídrico es bajo (FAO, 2018), existen países que sufren un estrés hídrico preocupante, siendo 32 países los que sufren un estrés hídrico de entre el 25% y el 70%; 22 países se sitúan por encima del 70%, que se califica como estrés grave; en 15 países, la cifra ya supera el 100% y, de ellos, 4 presentan un estrés hídrico superior al 1000%. Un elevado estrés por déficit hídrico puede acarrear consecuencias negativas para el desarrollo socio-económico y la seguridad alimentaria de un país (FAO, 2018). Ante esta situación, es necesario optar por implementar políticas eficaces para una gestión sostenible de los recursos hídricos y, con ello, garantizar la disponibilidad suficiente del agua, así como gestionar su uso eficiente en los sectores social, económico e industrial a través de los WSSs.

La falta del recurso hídrico ha llevado a los países a implementar medidas que favorezcan la gestión óptima del agua en los WSSs. Por un lado, los países más desarrollados invierten en nuevas tecnologías para monitorear, inspeccionar y gestionar de una manera más adecuada los WSSs. Por otro lado, los países en desarrollo se han inclinado a tomar medidas drásticas (por ejemplo, suministro intermitente) que afectan directamente a la población, pero, sobre todo, al mismo sistema, poniendo en peligro su adecuado funcionamiento. El principal inconveniente de implementar este tipo de acciones en los WSSs es que se reduce significativamente la

eficiencia de las redes provocando un acelerado deterioro de su infraestructura, lo que potencialmente puede llevar a un inadecuado funcionamiento, en cuanto a cantidad y calidad del agua entregada al usuario se refiere. En consecuencia, aparecen fracturas (e.g. agrietamiento transversal, aplastamiento o agrietamiento longitudinal, fisuras por asentamiento, etc.) en los componentes de los WSSs. Ilaya-Ayza (2016) cita a Faure & Pandit (2010) quienes señalan que este tipo de suministro, al final, requiere mucha más agua que los sistemas continuos debido a que provocan altos niveles de desperdicio de agua potable.

Desde el punto de vista de los altos niveles de desperdicio de agua tratada, para algunos WSSs se estima que las pérdidas de agua en sus redes (i.e. a través de las fugas de agua) es superior al uso real de dicha agua (Hamilton & McKenzie, 2014). Por ejemplo, se estima que en Europa la pérdida de agua, en promedio, es del 26%, aunque en algunas ciudades importantes, tanto en Europa como en América del Norte, se han informado tasas de fugas que superan el 30%. Además, los servicios públicos en algunos de los países en desarrollo sufren hasta un 70% de pérdidas de agua. Según un estudio realizado por la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos), en 2016 se encontró que en más de 40 ciudades las tasas de fuga variaban entre el 4% en Países Bajos, hasta el 65% en México (Van Hecke, 2020). De igual manera, un estudio realizado por Liemberger R. y Wyatt A. (2018), estima que el volumen global de agua perdida es de 126 mil millones de metros cúbicos por año, valorada en 39 mil millones de dólares anuales. Ante esta crítica situación, los gestores de los WSSs en todo el mundo se ven obligados a implementar acciones denominadas inteligentes encaminadas a minimizar y controlar las pérdidas de agua en las redes.

1.1.1 Técnicas no destructivas

Dado que las fugas en los WSSs representan un problema tanto a nivel medioambiental (e.g. niveles de abstracción de agua para su distribución), como a nivel económico (e.g. cantidad de agua tratada, impactos debidos a la rotura de tuberías, etc.) de gran magnitud, es importante detectarlas y monitorearlas de manera efectiva y temprana (Shen, Lin, Li, Fu, & Wang, 2020). Para esto, es necesario aplicar un sistema eficaz de detección y localización de fugas que minimicen dichas pérdidas de agua y dichas pérdidas económicas. En relación a esto, en los últimos años se han desarrollado técnicas innovadoras de inspección no destructivas (NDTs, por sus siglas en inglés, *non-destructive techniques* o *non-destructive testing*) que son aplicadas en diferentes campos de la ingeniería. En lo que compete a la hidráulica urbana, estas técnicas han sido ampliamente utilizadas, debido a que permiten conocer el subsuelo y, además, identificar las infraestructuras contenidas en él (tuberías de abastecimiento, tuberías sanitarias, etc.), sin provocar deterioros. Desde esta perspectiva, las NDTs son herramientas eficientes que proveen un conocimiento real del trazado de la red y de las características (diámetro, material, etc.) de sus componentes (tuberías, válvulas, etc.), además de permitir detectar daños presentes en las infraestructuras del sistema en una etapa incipiente, lo que permite tomar acciones específicas (Martínez-Garrido, Fort, Gómez-Heras, Valles, & Varas-Muriel, 2018). Este conocimiento es esencial para aplicar una gestión técnica adecuada que favorezca la detección de fugas, el control de agua, y la identificación de conexiones ilegales, de modo que, con esta información, sea posible planificar operaciones de mantenimiento, rehabilitación y renovación tempranas en la infraestructura del sistema (Ayala Cabrera, 2015), con el fin de evitar el deterioro o la necesidad de una restauración costosa (Martínez-Garrido, Fort, Gómez-Heras, Valles, & Varas-Muriel, 2018).

Existen numerosas investigaciones donde se realizan revisiones de las diferentes NDTs empleadas recientemente en relación con las fugas de agua, así como sus ventajas y desventajas (Adedeji, Hamam, Abe, & Abu-Mahfouz, 2017; Obeid, et al., 2016; Liu & Kleiner, 2013; Hao, et al., 2012; Chan, Chin, & Zhong, 2018). Estas técnicas se pueden clasificar basándose en el software o en el hardware, como proponen Li, R. et al. (2015). Las técnicas basadas en el software hacen uso de los datos recopilados por sensores de presión y/o flujo en tiempo real; son técnicas de inteligencia artificial y herramientas de análisis de datos estadísticos (Li, Huang, Xin, & Tao, 2015; Aslam, Manreet, Maruf, Yehia, & Ali, 2018). Por su parte, las técnicas basadas en hardware se dividen en: técnicas visuales; técnicas acústicas y de vibración; técnicas electromagnéticas y de radiofrecuencia; y otras técnicas (Ayala-Cabrera, Herrera, Izquierdo, Ocaña-Levario, & Pérez-García, 2013b).

Para poder tener una gestión eficiente de la pérdida de agua en los WSSs, Klingel, P. y Knobloch, A., (2015) proponen que es necesario establecer un balance hídrico como condición previa. Bajo esta hipótesis, las técnicas basadas en software son ideales. Estas técnicas, por lo general, hacen uso de programas informáticos que permiten simular y modelar hidráulicamente las tuberías y accesorios de un WSS (AL-Washali, Elkhider, Sharma, & Kennedy, 2020), haciendo uso de datos obtenidos con sensores de presión y/o flujo instalados en los nodos de la red. Algunos programas que permiten modelar numéricamente un sistema se enumeran a continuación: Aquadas-QS, Aqualibre, AWWA Water Audit, EPANET, H2O MAPWater, InfoWater, KYPipe, Leaks suite, SigmaLite, WaterGEMS, WB-EasyCalc, WNetXL, entre muchos otros (AL-Washali, Elkhider, Sharma, & Kennedy, 2020; Tsitsifli & Kanakoudis, 2010; Klingel & Knobloch, 2015). Estas herramientas permiten ayudar a las empresas gestoras de los WSSs a evaluar la red y sus pérdidas de agua, así como a planificar intervenciones para la reducción de las mismas

(Tsitsifli & Kanakoudis, 2010; Hamilton & McKenzie, 2014; Klingel & Knobloch, 2015).

La ventaja de las técnicas basadas en software es que son de bajo costo relativamente; brindan información acerca de los volúmenes de agua circulantes en la red, con lo cual es posible estimar volúmenes de agua perdidos; y, además, es posible determinar la zona de la fuga, así como detectar y localizar la fuga de manera oportuna y precisa; pero es preciso establecer un modelo numérico sencillo y con cierta información de monitoreo (Li, Huang, Xin, & Tao, 2015). El principal inconveniente es que existe la necesidad de contar con información precisa de los componentes de la red y parámetros relacionados que, normalmente, no se pueden obtener (Li, Huang, Xin, & Tao, 2015). Adicionalmente, no es posible conocer con ellos el estado físico de la red, ni tampoco diferenciar fácilmente entre el agua perdida por fugas o aquella provocada por conexiones ilegales, y menos definir su ubicación puntual. Básicamente, estas herramientas permiten cuantificar las pérdidas en un sistema particular sin considerar dónde se están produciendo realmente tales pérdidas (Puust, Kapelan, Savic, & Koppel, 2010). De modo que se requieren técnicas específicas para identificar la ubicación de las fugas (Shekofteh, Ghaziz, & Yazdi, 2020). Bajo estas circunstancias, las NDTs basadas en hardware son las más adecuadas como herramienta de apoyo para realizar un estudio completo, sobre todo en lo referente al control activo de fugas, como lo contemplan, entre otros, Zúñiga, M., (2019) y Puust, Kapelan, Savic y Koppel, (2010).

Por su parte, las NDT basadas en hardware son muchas y muy variadas. En Ayala-Cabrera et al. (2013b) estas técnicas son clasificadas de la siguiente manera: (1) técnicas visuales, entre las que destacan la televisión de circuito cerrado (CCTV, *closed-circuit television*) y la tecnología de evaluación y escáner de alcantarillado (SSET, *Sewer Scanner and Evaluation Technology*); (2) técnicas acústicas y de

vibración; dentro de este grupo encontramos el sonar, la vibro-acústica, el impacto eco/análisis espectral de ondas superficiales y correlacionador, y bastones de escucha para detectar fugas; (3) técnicas electromagnéticas y de radiofrecuencia; este grupo utiliza: fuga de flujo magnético (MFL, *magnetic flux leakage*), técnica de corrientes parásitas, tecnología de hidroscoPIO (HT, *hydroscopy technology*), escaneo rápido de permeabilidad magnética (RMPS, *rapid magnetic permeability scan*), campo electromagnético de baja frecuencia (LFEM, *low frequency electromagnetic field*), campos magnéticos pasivos (PMF, *passive magnetic fields*), banda ultraancha en el dominio del tiempo (UWB, *ultra wide band*), y el GPR (*Ground Penetrating Radar*) ; y por último, (4) otras técnicas que emplean termografía infrarroja, técnica de detección Doppler de onda continua, levantamientos laser, técnica de gas trazador, técnicas combinadas (electromagnética de banda ancha / sonda de impedancia de onda (WI, *wave impedance*), técnica de evaluación en tiempo real de inspección de tuberías (PIRAT, *pipe inspection real-time assessment technique*) y el sistema Sahara (Zheng & Yehuda, 2012).

Dentro de esta diversidad de técnicas, las más utilizadas recientemente para localizar fugas en los WSSs han sido las técnicas vibro-acústicas, la termografía infrarroja, gas trazador y el GPR (Demirci, Yigit, Eskidemir, & Ozdemir, 2012; Dong, Carnalla, & Shinozuka, 2011; De Coster, et al., 2019; Ocaña-Levario, Carreño-Alvarado, Ayala-Cabrera, & Izquierdo, 2018). Las técnicas vibro-acústicas se utilizan ampliamente en la práctica; se basan en la premisa de que una fuga induce ruido o una señal de vibración que viaja a través de la pared de la tubería o la columna de agua y esta señal se puede captar utilizando un equipo de detección (Yazdekhosti, Piratla, Atamturktur, & Khan, 2017). Estas técnicas han funcionado bien para identificar fugas en tuberías metálicas con diámetros pequeños a medianos (e.g. diámetros de 100mm y menores); en cambio, para tuberías no metálicas (por ejemplo, tuberías de PVC), con diámetros de gran tamaño, no son las más

adecuadas, debido a la alta tasa de atenuación que sufre la señal en este tipo de tuberías (Hunaidi, 2012), Asimismo, para una detección de fugas exitosa con estas técnicas se requiere una buena habilidad auditiva. El hecho de que no se escuchen fugas silenciosas y que no se pueda ignorar el ruido de fondo dificulta su aplicación en determinadas situaciones (Puust, Kapelan, Savic, & Koppel, 2010). Por otra parte, la técnica de termografía infrarroja funciona por diferencia térmica, es decir, trata de detectar los contrastes térmicos provocados por la diferencia de temperatura entre el suelo y el agua fugada. Aunque facilita la captura de grandes áreas sin contacto y es fácil de implementar, esta técnica se ve limitada por la temperatura ambiente ya que produce errores cuando existen diferencias considerables de temperatura y también por la profundidad de la tubería (De Coster, et al., 2019). Además, no es posible utilizar esta técnica en verano e invierno, debido a la ausencia de diferencias significativas entre el suelo y el agua (Dong, Carnalla, & Shinozuka, 2011; Carreño-Alvarado & Reynoso-Meza, 2020; Wang D. , 2017).

La técnica de gas trazador, comúnmente es utilizada para localización de fugas en componentes del WSS, la cual consiste en inyectar en una sección aislada de la red una mezcla de gases los cuales no causan alteraciones al medio, estos gases se componen por un 95% de nitrógeno y un 5% de hidrogeno (Li, Huang, Xin, & Tao, 2015). El gas es introducido a la sección de la red con ayuda de un compresor, con el fin de incrementar la presión al interior de la tubería hasta su presión de trabajo. En caso que la tubería presente fuga, la presión disminuirá y el gas saldrá en vertical por la fisura de la fuga hacia la superficie, donde es identificado por medio de un detector especializado; entonces la localización de la fuga se determina de acuerdo al punto donde se detectó el gas (Asensio Avellanas, 2016). Este tipo de metodología permite identificar fugas pequeñas en tuberías no metálicas con una alta precisión, sin embargo, su alto costo las hace poco accesibles. Adicionalmente presenta el inconveniente de que solo se pueden detectar fugas localizadas en la

parte superior de la tubería, debido a que el gas no puede fluir desde el fondo de la misma (Li, Huang, Xin, & Tao, 2015).

Por último, el GPR es una técnica de rápida aplicación que utiliza energía electromagnética para sondear el subsuelo poco profundo (AL-Qurishee, Wu, Atolagbe, El Said, & Ghasemi, 2019), permitiendo obtener información del mismo a través de radargramas (imágenes) que se aproximan a una sección transversal del subsuelo (Biskup, Arias, & Lorenzo, 2005), todo esto sin alterar el medio. En este sentido, esta técnica favorece la inspección de los WSSs al demarcar en los radargramas los contrastes causados entre las tuberías y el agua infiltrada en el suelo con el medio que las contiene; tales contrastes se basan en la diferencia entre las propiedades electromagnéticas de los materiales (Puust, Kapelan, Savic, & Koppel, 2010; Shen, Lin, Li, Fu, & Wang, 2020; Ayala-Cabrera, Herrera, Izquierdo, Ocaña-Levario, & Pérez-García, 2013b). En este sentido, el GPR se muestra como una herramienta adecuada para detectar fugas en las tuberías de agua evitando la realización de catas (test mediante excavación) y el daño a las estructuras circundantes (Amran, et al., 2018). Por estas consideraciones, este trabajo doctoral se centra en aprovechar las ventajas que proporciona el GPR, como técnica de inspección no destructiva, para potenciar, por medio de metodologías adecuadas, la detección y ubicación de fugas de agua en los WSSs.

1.1.2 El GPR como técnica no destructiva

De manera breve, Neal (2004) explica que el GPR es una técnica geofísica no invasiva que detecta las discontinuidades eléctricas de los materiales del subsuelo poco profundo (<50m). Es decir, técnicamente, la prospección con GPR se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos de muy corta duración (1-20ns) y baja frecuencia (10MHz -2.5 GHz), que emite una antena (antena emisora), y se propagan desde la superficie hacia el interior del terreno. Estas ondas propagadas por el suelo

se reflejan parcialmente al encontrar cambios de material a su paso. La energía de los pulsos reflejados y el tiempo de retardo son detectados en la superficie a través de una antena receptora (Biskup, Arias, & Lorenzo, 2005; Ocaña-Levario, Ayala-Cabrera, Pérez-García, Izquierdo, & Herrera, 2013).

La respuesta del medio a las señales emitidas por el GPR, captada en tiempos determinados, se denomina traza. La traza contiene las características electromagnéticas del medio prospectado. La sucesiva acumulación de estas trazas genera lo que se ha denominado radargrama. Los radargramas generalmente son visualizados aplicando escalas de colores (o de grises) a los diferentes valores de amplitud de onda captados, de lo cual se obtiene la imagen de la prospección (Ayala-Cabrera D., Herrera, Izquierdo, & Pérez-García, 2011b). En la Figura 1.1, se muestra el proceso de prospección con GPR.

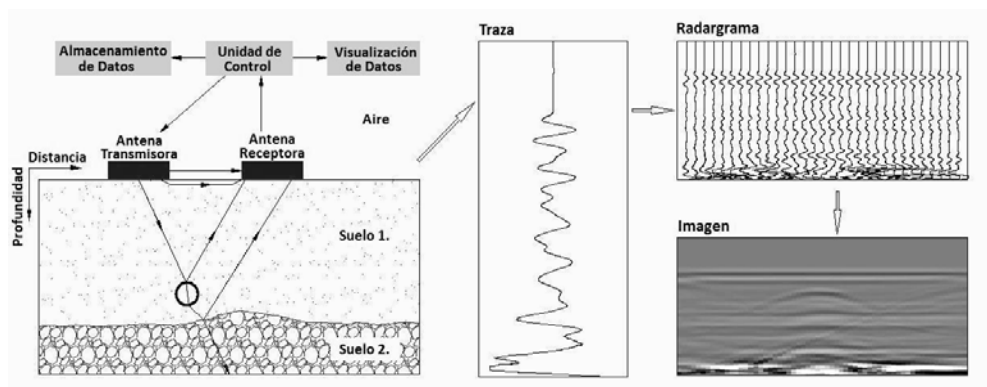


Figura 1.1 Captura de imágenes con prospección GPR

Fuente: Ayala-Cabrera D., Herrera, Montalvo, & Pérez-García, (2011a)

En los últimos años, el uso del GPR ha tomado gran fuerza en la distribución de agua, debido a su capacidad potencial de identificar problemas presentes en los componentes de los WSSs de una manera eficiente y precisa, sin causar alteracio-

nes al medio. A pesar de ser una técnica de fácil aplicación y uso rápido, la interpretación de los datos obtenidos en entornos urbanos es compleja (Adedeji, Hamam, Abe, & Abu-Mahfouz, 2017). En este sentido, es necesario un adecuado tratamiento de las imágenes, aplicando diferentes procesos y filtros, que ayuden a mejorar la visualización de los datos contenidos en las imágenes de GPR (tuberías enterradas y fugas de agua, en nuestro caso). En consecuencia, existen diversos trabajos desarrollados que tratan de mostrar su eficiencia en lo referente a localizar objetos enterrados y daños específicos (fugas, acometidas ilegales, etc.) en las redes de agua mediante la aplicación de metodologías de procesamiento adecuadas para las imágenes de GPR. En este sentido, Hunaidi y Giamou (1998) presentan el caso de una fuga simulada, donde se perforó una tubería de plástico (PVC), se enterró en el suelo y se realizó su análisis utilizando imágenes de GPR en bruto. Por su parte, Stampolidis et al. (2003) muestra un trabajo de campo realizado en tramos de tuberías de WSSs. El procesamiento al que son sometidas las imágenes de GPR se realiza mediante filtros paso bajo para identificar fugas en tuberías de PVC. Hasan (2012) y Hyun et al. (2007) se concentran en tuberías plásticas, aplicando un procesamiento que incluye la eliminación de fondo y el filtrado de imágenes, respectivamente. Otro trabajo de campo representativo se presenta en Liu et al. (2002) que combina ensayos de GPR con ensayos de potencial eléctrico y geoquímico para detectar fugas en tuberías no metálicas. En este caso, las fugas se identifican a partir de imágenes GPR sin procesar. Aslam et al. (2018), muestra un trabajo desarrollado en laboratorio para evaluar la efectividad de los métodos GPR y el espectrómetro en la localización de fugas. Otros trabajos que muestran la efectividad del GPR para localizar fugas en campo y bajo condiciones controladas son los de Atef et al., (2016); Catapano et al. (2014); Glaser et al. (2012); Ayala-Cabrera et al. (2013b); Nakhkash y Mahmood-Zadeh (2004), entre otros. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se basan solo en la ubicación e interpretación de las hipérbolas

típicamente generadas en imágenes sin procesar o pre procesadas. Y esto es realizado, fundamentalmente, por personal altamente especializado en el análisis de este tipo de imágenes.

1.1.3 Procesamiento de imágenes GPR

Ante esta situación, esta tesis doctoral se centra en mostrar diferentes técnicas de preprocesamiento desarrolladas y aplicarlas a imágenes GPR obtenidas en los WSSs. Todo esto, a través de métodos desarrollados para evaluar la viabilidad de identificar y extraer características morfológicas (contornos, patrones, etc.) correspondientes a una fuga de agua que proviene de una tubería de PVC (bajo condiciones controladas de laboratorio). La finalidad última es la de permitir identificar formas y, con ellas, crear volúmenes del área afectada por el agua fugada, a través de modelos 3D.

Los métodos específicamente utilizados en esta tesis, desarrollados en los últimos años en el grupo de investigación en el que esta tesis se realiza, son los siguientes:

1. MÉTODO DE SISTEMAS MULTIAGENTE. La combinación de métodos estadísticos y sistemas multi-agente están desarrollados en Ayala-Cabrera et al. (2013a); específicamente, el proceso es simulado por una carrera entre agentes. El uso de este enfoque sustentó la exploración de metodologías complementarias a la utilizada en (Ayala-Cabrera D. , Campbell, Carreño-Alvarado, Izquierdo, & Pérez-García, 2014a) y en (Ocaña Levario, 2014) con el uso de imágenes de contraste que tenían por objetivo trazar la mancha de la fuga de agua en el suelo (evolución de la fuga) en las imágenes de GPR. De este modo, se buscaba que el contraste pudiese ser realizado usando la misma información registrada en el conjunto de imágenes de GPR.

2. FILTRADO DE VARIANZA. Esta técnica utiliza parámetros estadísticos de segundo orden (filtro de varianza) a fin de mejorar la visualización y, con ello, permite resaltar las características (tuberías y fugas) contenidas en las imágenes de GPR. Esta técnica es el objeto específico del artículo que constituye el Capítulo 3 de esta tesis doctoral.

El objetivo último de estos procesos es producir conocimiento seguro y datos robustos que faciliten entender el comportamiento de una fuga de agua y su alcance en el subsuelo. Todo esto, por medio del análisis de las imágenes pre-procesadas, así como mediante la identificación y extracción de superficies pertenecientes a las fugas y/o componentes del WSS, con el objetivo de, finalmente, recrear modelos 3D que representen la fuga y permitan visualizar el alcance de la misma a través de los volúmenes generados, de modo que se pueda mostrar el comportamiento de este fenómeno en el subsuelo. Estos procesos aplicados permiten obtener información significativa con la cual es posible destacar los componentes críticos o fallos en los WSSs, favoreciendo una gestión óptima referente a las actividades operativas y de mantenimiento, y que beneficien la toma de decisiones en la gestión de los WSSs.

1.1.4 Métodos multi-criterio para ayudar en la interpretación de imágenes

Ante la variedad de metodologías que se aplicaron a las imágenes de GPR y la subjetividad que puede surgir al seleccionar una u otra por parte del operador, en este documento también proponemos evaluar la viabilidad de gestionar los resultados derivados de las técnicas aplicadas a las imágenes de GPR a través de herramientas tales como los métodos de toma de decisiones con criterios múltiples (MCDM, *multi-criteria decision-making*). Todo esto, con la finalidad de clasificar los procesos a través de las imágenes resultantes, evaluando diferentes criterios, para elegir la metodología que mejor se adapte a los objetivos específicos propues-

tos. Con este fin, utilizamos métodos MCDM, que son herramientas efectivas que benefician la solución de diversos tipos de problemas de decisión (Nikas, Doukas, & López, 2018). Por esta razón, en esta tesis doctoral, se considera que el apoyo brindado por estas herramientas es valioso, ya que es capaz de manejar tanto los aspectos cualitativos como los cuantitativos cuando se requiere una evaluación sobre un conjunto de alternativas, como es nuestro caso.

En la literatura se encuentra una gran variedad de métodos MCDM (Sipahi & Timor, 2010), por mencionar algunos, los métodos de puntuación directa como el SAW (*simple additive weighting*), y COPRAS (*complex proportional assessment*); los métodos basados en la distancia como VIKOR y TOPSIS (*technique for order of preference by similarity to ideal solution*); los métodos de comparación por pares como el AHP (*Analytic hierarchy process*), ANP (*Analytic network process*) y MACBETH (*Measuring Attractiveness by a categorical based evaluation technique*); los métodos de superación como el método PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations*), ELECTRE (*ELimination Et Choix TRaduisant la réalité*) y sus variantes. Y, por último, los métodos basados en funciones de utilidad o valor como el método MAUT (*Multi-attribute utility theory*), MAVT (*Multi-attribute value theory*) y MIVES (*Modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles*), entre otros (Sanabria Aguilar, 2006; Hajkowicz & Collins, 2007; Gavade, 2014; Villa-Silva, et al., 2019; De Brito & Evers, 2016). De entre ellos, uno de los métodos más populares y de uso frecuente es el AHP (Kolahi, et al., 2018; Aşchilean, Badea, Giurca, Naghiu, & Iloaie, 2017). Este método tiene la capacidad de manejar situaciones de decisión que involucran tanto juicios subjetivos como objetivos, además de que permiten evaluar la coherencia de los criterios involucrados en base a opiniones de múltiples expertos (Gavade, 2014). A pesar de lo anterior, siempre existe una incertidumbre en las valoraciones o en las comparaciones; además el AHP presenta la incapacidad para

reflejar correctamente la ambigüedad de la percepción de los expertos (Büyüközkan, Çifçi, & Güteryüz, 2011). En este sentido, el AHP, en conjunto con la teoría difusa (FAHP, *Fuzzy analytic hierarchy process*), es una opción que permite gestionar adecuadamente la imprecisión y la incertidumbre que caracteriza los juicios formulados por los expertos.

El FAHP se usa comúnmente para calcular los pesos de los criterios y luego se combina con otros métodos MCDM, para clasificar las alternativas bajo evaluación (Kubler, Robert, Derigent, Voisin, & Le Traon, 2016). En este sentido, el FAHP, en conjunto con el método ELECTRE, ofrece buenos resultados (Figueira J. R., Greco, Roy, & Slowinski, 2013). Este enfoque puede eliminar de manera efectiva los sesgos personales en la elección de alternativas y puede medir las preferencias de los expertos con respecto a cada criterio de decisión y equilibrar los criterios en conflicto (Lupo, 2015; Gao, Na, Dang, & Zhang, 2018).

Por su parte el método ELECTRE ha evolucionado a través de los años en diferentes versiones, ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS, ELECTRE TRI, entre otros (Figueira, Greco, & Ehrgott, 2005). De entre ellos ELECTRE III es el método más utilizado (Govindan & Jepsen, 2016; Fernández, Navarro, & Mazcorro, 2014), ya que permite clasificar alternativas relacionadas en diferentes contextos.

Entonces, en relación al mantenimiento de las redes de suministro de agua nos centramos en utilizar estos métodos de procesamiento de datos para ayudar a prevenir y descubrir posibles daños o fugas presentes en tuberías de los WSSs. La evaluación correspondiente se apoya mediante un enfoque integrado de MCDM, para obtener la clasificación final de alternativas. En el artículo incorporado en esta tesis correspondiente al Capítulo 4, se presenta un estudio de caso real, que se cen-

tra en un conjunto de varias imágenes de GPR como salidas de diferentes técnicas de procesamiento de datos, para demostrar la utilidad del enfoque híbrido propuesto. Para ello, se consideró clasificar las imágenes GPR procesadas según la evaluación de cinco criterios, (1) visualización, (2) interpretación, (3) identificación de características, (4) extracción de información y (5) asequibilidad.

Para tal fin, se propone un proceso de integración entre FAHP y ELECTRE III. En el momento de escribir el artículo, era la primera vez que se sugería un enfoque de este tipo para clasificar las imágenes GPR de elementos de los WSSs con el objetivo de aumentar la calidad de la gestión del mantenimiento. Además, al analizar las características de varias técnicas de procesamiento de datos, se espera que sea posible seleccionar el método más confiable y preciso, que consiga un mejor compromiso entre los elementos involucrados, ya que el mantenimiento es crucial para garantizar el funcionamiento óptimo de los sistemas. El FAHP se reveló como una herramienta útil para calcular los pesos de los criterios, al gestionar eficazmente la incertidumbre de las opiniones de los expertos. A su vez, ELECTRE III proporcionó a los expertos de la toma de decisiones una clasificación de alternativas y, en consecuencia, un soporte adecuado para optimizar el mantenimiento de los WSSs, teniendo en cuenta también la incertidumbre de los datos mediante el uso de umbrales apropiados.

Para acabar esta sección introductoria, resumimos, que con este trabajo se muestra

- que el GPR es una herramienta de inspección útil para conocer el estado de los WSSs;
- que los tratamientos aplicados a las imágenes de GPR permiten comprender y habilitan para dar una clara interpretación de los datos, y, por último,

- que la selección del tratamiento que mejor se adapte a través de la combinación de métodos MCDM (FAHP y ELECTRE III en esta tesis) permite evitar la subjetividad de la elección de la metodología que más favorezca el análisis de esta información por parte del operador.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo General*

El objetivo principal de esta tesis doctoral consiste, primeramente, en evaluar la aplicación de una técnica de inspección no destructiva, el GPR, que permita mejorar la comprensión del fenómeno de las fugas en sistemas de abastecimiento de agua, a través de la creación de herramientas que favorezcan el análisis de imágenes de GPR y permitan la generación de modelos de predicción y/o detección, con el fin último de favorecer la eficiencia en actividades de operación, mantenimiento y, en general, en la toma de decisiones para la gestión de los WSSs.

1.2.2 *Objetivos específicos*

Para alcanzar el objetivo general, se cumplen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un estudio profundo de la literatura relacionada con la localización de fugas de agua en los WSSs con técnicas de inspección no destructivas. Posteriormente, evaluar el estado del arte para demostrar la capacidad y eficacia del GPR para identificar y localizar fugas en WSSs frente a otras técnicas.
- Investigar, desarrollar y aplicar metodologías de procesamiento de imágenes para mejorar la visualización de los componentes (tuberías, fugas, etc.) de los WSSs en las imágenes obtenidas con el GPR.

- Analizar imágenes de GPR pre-procesadas con el fin de identificar características de tuberías y fugas (principalmente) en los WSSs, para así obtener conocimiento confiable de la localización, comportamiento y desarrollo de la fuga a través de las imágenes procesadas.
- Realizar interpretaciones de imágenes GPR que permitan la localización de las fugas.
- Identificar y extraer patrones que pertenezcan a la zona alcanzada por el agua fugada.
- Reconstruir modelos 3D que permitan entender el comportamiento de la fuga al inicio y a través del tiempo.
- Realizar una comparativa de los procesos a los que fueron sometidas las imágenes de GPR y clasificar las opciones más viables, que permitan obtener la información más clara posible.

1.3 Justificación

Como hemos mencionado con anterioridad el agua es un recurso vital y a su vez escaso. Según la ONU (Organización de las Naciones Unidas), durante los próximos años, los problemas relacionados con los recursos hídricos serán más críticos (ONU, 2020). También la ONU, en su informe mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019, indica que el uso del agua a nivel mundial ha ido en aumento en un 1% anual aproximadamente desde la década de 1980, y se espera que la demanda siga en aumento con un patrón parecido hasta el 2050, lo cual representa un incremento del 20 al 30% por encima del nivel actual, esto debido principalmente al aumento de la demanda en los sectores industrial y doméstico (Burek, et al., 2016). Según datos del *World Resources Institute* (WRI), más de 1000 millones de personas viven, actualmente, en regiones con escasez de agua, y hasta 3500 millones podrían sufrir escasez de agua para el año 2025. Por lo tanto, la escasez de

agua representa para muchos países el desafío más apremiante para el desarrollo socioeconómico y humano, en general (UNESCO, 2020).

En relación a la problemática expuesta, numerosos países y organizaciones a nivel mundial han comenzado a tomar medidas para mitigar el desperdicio del agua y maximizar su aprovechamiento para garantizar su sostenibilidad (Cruz Machacuay, 2019; Nieto, 2011; Ballesteros, Brown, Jouravlev, Küffner, & Zegarra Méndez, 2005; Dourojeanni & Jouraviev, 2001; Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2020). Estas medidas proponen una gestión integral de los recursos hídricos, desde su captación hasta la entrega al usuario (Martínez & Villalejo García, 2018). En este sentido, este documento aborda la problemática desde la perspectiva de la gestión de los WSSs. En primer lugar, para lograr una gestión óptima de los sistemas es indispensable conocer la red, es decir, el trazado, las características intrínsecas de los componentes, los caudales circulantes, y las presiones presentes (Ayala Cabrera, 2015; Albarrán Tirado, 2019). Conocidos estos datos es posible emplear herramientas que permitan evaluar el desempeño del sistema y, en caso de identificar fallos, tomar las medidas adecuadas para fortalecerlo y mejorarlo.

Uno de los problemas apremiantes de las últimas décadas son las fugas en los WSSs (Li, Huang, Xin, & Tao, 2015) provocadas por múltiples factores tanto internos (corrosión, envejecimiento, defectos, mala instalación, etc.) como externos (daños mecánicos, excavaciones cercanas, condiciones climáticas, etc.). Debido a estos daños, las pérdidas de agua por fugas llegan a ser del 20 al 30% del suministro total de la red (Chan, Chin, & Zhong, 2018). Esto involucra la pérdida de grandes cantidades de agua potable, además de altos costos económicos, medioambientales y de salud (Li, Huang, Xin, & Tao, 2015; Puust, Kapelan, Savic, & Koppel, 2010; Alonso Guzmán, 2010). Ahora bien, una particularidad de las fugas de agua en los componentes de los WSSs es que, por la naturaleza de estos sistemas, que se

encuentran enterrados, muchas veces estas fugas no son visibles, lo que complica su localización y, por supuesto, su solución.

De acuerdo con lo expuesto con anterioridad, las técnicas de inspección no destructivas son una buena alternativa para dar solución a este tipo de problemáticas presentes en los sistemas (Ahadi & Bakhtiar, 2010; Ozevin & Yalcinkaya, 2014; Shakmak & Al-Habaibeh, 2015; Adedeji, Hamam, Abe, & Abu-Mahfouz, 2017; Aslam, Manreet, Maruf, Yehia, & Ali, 2018; Amran, et al., 2018; De Coster, et al., 2019). Tales técnicas permiten obtener información del subsuelo poco profundo sin alterar el medio, posibilitan conocer el trazado de la red, el estado de sus componentes, características de los mismos, y fallos en el sistema, entre otras. Esto, como paso previo hacia una gestión eficiente de los WSSs. Este trabajo doctoral hace uso de la técnica del GPR ya que ha mostrado ser una técnica poderosa, de uso fácil, que permite obtener resultados *in situ*, de rápida aplicación (frente a otros), y, además, permite obtener una visión del subsuelo poco profundo a través de imágenes, lo cual es de gran importancia, ya que los componentes de los WSSs, generalmente, no se encuentran a profundidades grandes. Finalmente, es importante destacar que es una técnica económica frente a otras tecnologías disponibles (Busquet, Casas, Pinto, Ribero, & Sabadía, 1996). A su vez, la desventaja de esta técnica está en la dificultad de interpretación de sus datos (imágenes de GPR), por lo que es necesario recurrir a expertos en el análisis de este tipo de información, ya que, de ser mal interpretados los datos, se pueden obtener conclusiones erróneas. En este sentido, la identificación de anomalías en la red (fugas, acometidas ilegales, obstrucciones, etc.) en imágenes de GPR es una tarea de alta complejidad y no trivial (Li, Huang, Xin, & Tao, 2015; Adedeji, Hamam, Abe, & Abu-Mahfouz, 2017; Whaite Gimon, 1992).

Por consiguiente, en este trabajo doctoral se planteó desarrollar y aplicar metodologías que favorezcan la visualización de componentes del WSS en las imágenes de GPR, de una manera sencilla y de fácil interpretación. En ese sentido, en este documento exponemos los métodos de pre-tratamiento de imágenes que fueron aplicados a los datos del GPR. El fin último es el de facilitar la visualización, identificación e interpretación de los datos a personal no experto en el uso de los datos de GPR. Por último, realizando un análisis comparativo de los resultados obtenidos tras la aplicación de los procesos empleados, se encontró que era una tarea difícil el elegir objetivamente entre uno u otro procesamiento. Por lo cual, se decidió realizar un análisis que permitiera evaluar los beneficios de cada proceso con el apoyo de métodos de análisis de decisión con criterios múltiples, concretamente el FAHP y ELECTRE III, los cuales, en conjunto, posibilitan la realización de una clasificación de los diferentes procesos, que permite elegir uno de ellos de forma objetiva minimizando el sesgo.

1.4 Organización de tesis

La presente tesis doctoral se organiza de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se presenta una introducción general del trabajo desarrollado en la tesis. Se presenta la problemática principal y se desarrollan con claridad las ideas principales tratando, en la medida de lo posible, de contextualizar las líneas de investigación seguidas, además de presentar los objetivos generales y particulares que han sido guía de la tesis para alcanzar los resultados obtenidos.

A continuación, en el Capítulo 2 se presenta el artículo “*3D model evolution of a leak based on GPR image interpretation*”, publicado en diciembre de 2015 en la revista *Water Science & Technology Water Supply*. Este capítulo aborda el problema de las fugas de agua en los WSSs y su propagación en el tiempo, todo esto a

través del análisis e interpretación de imágenes de GPR. Se presenta una metodología de pre-procesamiento que permite identificar y extraer formas identificadas en las imágenes pre-procesadas, con el fin último de crear, a partir de estas formas, volúmenes de fuga de agua. Por último, se presentan modelos 3D de la evolución temporal de la fuga.

Consecutivamente, en el Capítulo 3 se presenta el artículo “*GPR images analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters*”, publicado en marzo de 2018 en la revista *Journal of Applied Geophysics*. Este capítulo, tras enfatizar que las fugas constituyen un problema de gran entidad para los WSSs, presenta la realización de ensayos de laboratorio bajo condiciones controladas con el fin de obtener imágenes de GPR. Estas imágenes son procesadas a través de un filtro denominado filtro de varianza, que permite identificar y extraer características morfológicas con mayor facilidad que otros métodos aplicados, además de que permite la creación de modelos 3D. Por último, se presenta una comparativa de la metodología del filtro de varianza y la metodología basada en sistemas multi-agente.

Posteriormente, en el Capítulo 4 se presenta el artículo “*A hybrid multi-criteria approach to GPR image mining applied to water supply system maintenance*” publicado en noviembre de 2018 en la revista *Journal Applied Geophysics*. En este capítulo se presenta la aplicación de dos métodos de decisión multicriterio integrados (FAHP y ELECTRE III) con el objetivo de categorizar, priorizar o bien seleccionar una metodología de pre-procesamiento de imágenes. Este enfoque híbrido tiene la intención de evitar la subjetividad de la selección por parte del operador. Esta selección se realiza según la evaluación de cinco criterios (visualización, interpretación, identificación, extracción de información y asequibilidad). Los resultados proveen un soporte fiable para la selección la técnica de pre-procesamiento

más adecuada para las imágenes. Finalmente, se muestran y se discuten los resultados.

En el Capítulo 5 se presenta una discusión general de los resultados obtenidos en el presente trabajo doctoral. Finalmente, se presenta el Capítulo 6, en el cual se muestran las conclusiones finales tras la realización de este trabajo. Asimismo, se presentan las propuestas de posibles trabajos futuros a desarrollar a partir de este trabajo.

Por último, al final del documento se proporciona la lista de referencias propias elaboradas en el seno de esta investigación doctoral, y la lista de referencias utilizadas en esta tesis doctoral.

Capítulo 2

3D Model evolution of a leak based on GPR image inter- pretations.

Publicación

Ocaña-Levario, S.J., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Pérez-García, R., 3D model evolution of a leak based on GPR image interpretations. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15.6, 1312-1319, 2015.

DOI: 10.2166/ws.2015.093

INDICIOS DE CALIDAD (2019): JCR: IF = 0.900, Q4; SJR: IF = 0.33, Q3

VERSIÓN AUTOR DEL ARTÍCULO

2.1 Abstract

This paper presents some aspects regarding time propagation of underground water leakage in controlled laboratory conditions using a drilled PVC pipe and interpreting ground penetrating radar (GPR) images. GPR pre-processed images are interpreted for an easy identification and extraction of surfaces and volumes of water leakage. Finally, the temporal evolution of a water leak is shown using 3D models based on interpretation of GPR images. Water volumes obtained using this approach can be easily observed by personnel who lack highly specialized training in the analysis of raw data. The results of this study are promising and can help develop techniques to validate non-destructive models for the identification, distribution, and prediction of water leaks in water supply systems using GPR.

Keywords: ground penetrating radar, GPR interpretations, leak visualization, water leakage evolution, water supply systems.

2.2 Introduction

Water leakage detection and control is one of the greatest challenges in the management of water supply systems (WSSs). This paper addresses the problem of leakage in WSSs from the perspective of non-destructive methods.

The most popular non-destructive methods currently used to locate leaks in WSSs are: acoustic methods; infrared thermography; and ground penetrating radar (GPR) (Demirci, Yigit, Eskidimir, & Ozdemir, 2012). GPR has been shown to be an effective non-destructive tool by showing in radargram images the contrast between leaked water and the surrounding area – the contrasts being caused by dielectric

differences (Charlton & Mulligan, 2001; Crocco, Soldovieri, Millington, & Cassidy, 2010). We performed laboratory tests to extract features of water leakage from GPR images. Temporal evolution of water leakage was the initial feature evaluated in this work, supported by leak evolution tracing via 3D modeling.

The main idea was to produce reliable knowledge and robust data that facilitated an understanding of the phenomenon through 3D representation, thus favoring the prediction and/or detection of water leakage in the system.

The aim was to increase the approximation abilities of the model, so as to improve operational and maintenance activities and favor decision-making in WSS management. This is possible because GPR image interpretation enables identifiable surfaces (with variable grade difficulty) to be obtained and this then enables objects or phenomena underground to be rebuilt in 3D models. This process facilitates the successful use of GPR data by personnel who are not highly qualified.

In this paper, water leak propagation from a buried polyvinyl chloride (PVC) pipe is addressed. This is performed using GPR images obtained under controlled laboratory conditions. Plastic material was selected because of the difficulty experienced in identifying plastic pipes when using GPR (Ayala-Cabrera D. , Herrera, Izquierdo, & Pérez-García, 2011b) and the decreased visibility of surrounding objects caused by plastic materials (Ayala-Cabrera, Herrera, Izquierdo, Ocaña-Levario, & Pérez-García, 2013b)

Several authors have addressed leak detection, including Eyuboglu, Mahdi, Al-Shukri, & Rock (2003), Hasan (2012), Demirci, Yigit, Eskidemir, & Ozdemir (2012), and Cataldo et al. (2014). These works are promising with respect to GPR usage in WSS leak detection. However, all of these works are based on the location and interpretation of the hyperbolae generated either in raw or preprocessed imag-

es. In this sense, we evaluate the viability of applying a pre-processing GPR image methodology that the authors term ‘agent race’ (Ayala-Cabrera D. , Izquierdo, Montalvo, & Pérez-García, 2013a).

With this approach, we aim to eliminate image contrast requirements, as used in Ayala-Cabrera D., Campbell, Carreño-Alvarado, Izquierdo, & Pérez-García (2014a), and follow the evolution of a water leak from GPR images – so that the contrast can be revealed using the information from events registered in GPR images based on the same data set. If this approach is possible, then the application of GPR in uncontrolled soil conditions and without contrast could give significantly improved images. Other interesting work shows support for this line of research: with nondestructive methods for plume dispersion of contaminants (Moradi, Hafizi, Taheri, & Kamal, 2011) in the case of geophysical methods for delineating plumes caused by oil contamination through soil and groundwater. Pollution plume evaluation in an urban environment is also addressed in Vaudelet et al. (2011). Knowledge obtained with the methodology described in this paper may provide basic know-how for other engineering fields in such areas as fluid dispersion through subsoil, infrastructure risks associated with water leaks, and wet bulb distribution for irrigated areas.

This document has been organized as follows: the first section contains a brief introduction of the tasks performed. The general approach along with the difficulties and benefits is presented in the ‘Overall approach’ section. The third section presents a case study and survey characteristics. The approach used to interpret and classify the objects obtained by the GPR images is presented in the fourth section. The fifth section gathers the resulting interpretation and classification analysis. The paper ends with conclusions.

2.3 Overall approach

A 3D model representation of leaks in WSSs is of great interest. For example, a 3D representation of a laboratory simulated water leak can be observed in Tavera (2008).

In this work, Kirchhoff migration and the Hilbert transform were used as pre-processing methods. Although this work is promising, it only presents the leak in a partial manner and based on obtaining the first hyperbolae. In contrast, we assess the feasibility of extracting contours, providing information beyond the first hyperbolae, and enabling more robust 3D representations that show the development of the phenomenon over time.

The most important benefits of 3D representation include a clear visualization of the studied phenomenon; support for feasibility studies of hydraulic behavior in WSSs; and, finally, support for technical WSS management – such as maintenance, rehabilitation, and general decision-making.

The difficulties associated with this study are related to the GPR images from which data were extracted. The first drawback was the absence of clear protocols for performing image interpretations when there is excessive noise in the images – such as radio-waves, mobiles, and electrical sources (Brito-Schimmel & Carreras, 2010)– which cause deformation in the response from the buried objects and made the task of identification harder. This means that interpretation becomes more subjective. Consequently, algorithms were developed that enabled automatic 3D leak modeling and so avoided subjectivity.

2.4 Case study: The layout for the laboratory tests

We describe in this section the layout of the laboratory tests (Figure 2.1). For the set of tests performed, a plastic pipe commonly used in WSSs was buried in dry soil in a tank.

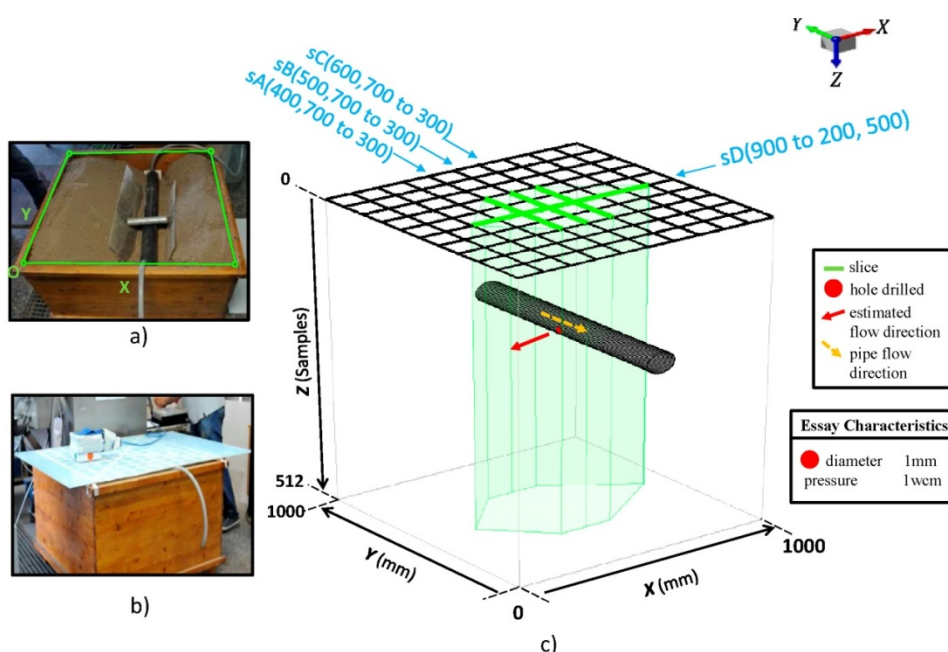


Figure 2.1 Survey configuration: (a) pipe burying process in the laboratory tank, (b) polypropylene plate – antenna sliding surface, (c) control set schematic configuration.

The characteristics of the buried pipe were: (a) PVC; (b) diameter of 100 mm; (c) length of 0.95 m; (d) hole drilled to simulate the leak in the central part of the pipe; and (e) two points for water input and output with connections at the ends (see Figure 2.1(a)). A wooden tank measuring $1.0 \times 1.0 \times 0.60$ m was used. After the pipe was positioned, its supports were removed, and it was then covered with dry soil (before water was introduced into the system). The surface of the tank was covered with a polypropylene plate (see Figure 2.1(b)). Eleven paths parallel to the

X-axis and another 11 paths parallel to the Y-axis were marked on this plate. These 22 paths were spaced 0.10 m apart to form the sampling grid. Three of these 22 paths were parallel to the pipe, and one was positioned in a transversal direction. We term this layout the control set (CS); each CS was composed of four slices, s , with domain $\{A, B, C, D\}$. The three parallel slices (sA – sC) were 400 mm long and the transversal slice (sD) was 700 mm long (see Figure 1(c)). The selection of these profiles crossed the pipe in longitudinal (CSsC) and transversal (CSsD) directions, both profiles intersecting azimuthally above the leak point (see Figure 2.1(c)). The other two profiles were placed close to the pipe and intended to keep track of the leak. A GPR antenna was placed on each line of this mesh.

The GPR equipment used in each survey was a commercial monostatic antenna with a central frequency of 1.5 GHz. The parameters of the equipment were 120 trace/s, 512 samples/trace and 20 ns/512 samples.

The total duration of the tests, corresponding to a timeframe of 35 minutes was divided into three stages. Stage 1 starts at $[(t_0, 00:00:00)]$ with the initial condition so that the test is performed under the established configuration with no water in the system. Stage 2 $[(t_1, 00:02:10), (t_2, 00:06:02)]$ involved filling the pipe. Times t_1 and t_2 correspond to a volume of water less than that required to fill the pipe. Stage 3 $[(t_3, 00:11:42), (t_4, 00:14:02), (t_5, 00:17:03), (t_6, 00:21:54), (t_7, 00:28:05), (t_8, 00:33:06), (t_9, 00:35:06)]$, in turn, corresponds to the water added to the system once the pipe has been filled.

2.5 Interpretation and classification of the GPR profiles

The proposed approach to extract contours of the GPR images is presented in this section. The process follows these steps: a) raw image pre-processing; b) pre-processed image abnormality analysis and location; c) interesting abnormality col-

or range identification; d) contour extraction; and e) 3D model representation. This process is described below.

The data obtained from the GPR laboratory surveys was the main input and was visualized as radargrams consisting of the equipment received signals stored in a matrix (MB, raw image matrix, Figure 2.2(a)). This matrix was composed of m -vectors b_k , $k = 1, \dots, n$ (traces), representing the change in depth of the electromagnetic inspected soil properties. Arranging this matrix by columns, we obtained $MB = [b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n]$. Vector b_k of length m corresponds to the registered data volume in each trace, depending on the characteristics of the equipment (in our case 512 data per trace). Considering the difficulties for raw data analysis caused by the poor visibility of some objects (based on their electromagnetic characteristics), a raw image pre-processing methodology is proposed in this document that helps improve visualization of abnormalities contained in the survey images.

The pre-processing algorithm used was proposed by Ayala-Cabrera D., Izquierdo, Montalvo, & Pérez-García (2013a). The algorithm is based on game theory and uses the so-called multi-agent paradigm.

Specifically, the process is simulated by a race between agents, as explained below. The algorithm input in our case is the radargram resulting from the GPR prospection, consisting of the $m \times n$ matrix, MB. The GPR prospection generated consists of n traces, which were employed as parallel tracks to be walked by the n agents. The race is an endurance test for the competing agents, the prize for each agent being a movement step for each effort performed. Those efforts are based on wave amplitude value changes in each column of the matrix (Ayala-Cabrera D., Izquierdo, Montalvo, & Pérez-García, 2013a). The race takes a total time (tt), $tt = tw + tr = m$, tw being the warm up time and tr the competition time.

The displacements of the agents during time tr are conditioned by the trend change of the wave amplitude on the trace that is being run. The race ends when time t has elapsed, and the race winner is the agent that has obtained the largest displacement during this time. Output 1 (Figure 2.2(b)) of this process consists of an $m1 \times n$ matrix, $m1$ being the maximum number of displacements. Columns in this matrix describe the movement of the agents related to the competition. In this work, the movements obtained by the agents are called time lines. On each time line, the time obtained in the competition by each agent is sorted by increasing values and indexed from 1 – giving equal index to equal times. These time lines are later normalized, obtaining Output 2 (Figure 2.2(c)) which is the matrix used in the sequel.

Output 2 results are subjected to detailed visual analysis, and compared to detect characteristics that give information regarding the water development in the control set. The zone affected by the water input into the system is identified by comparing the current time of each slice with the previous time, thus observing the appearance of new forms for the current time. In cases in which the only variation in the system is the input of water from the leak, the presence of a new form in the evaluated slices is associated with the trace left by the water input. Once the affected zone is identified in each image of Output 2, an iterative segmentation is made, based on one or more ranges ($[min\ max]$). Figure 2.2(d) contains the identified zone as the zone affected by the water input. As a result of this range selection, a matrix (Output 3) is obtained that has the same dimensions as Output 2: $\{if\ v \geq\ max\ and\ v \leq\ min,\ then\ v1 = 1,\ otherwise\ v1 = 0\}$, where v is the data value in Output 2, and $v1$ is its corresponding binary value in Output 3.

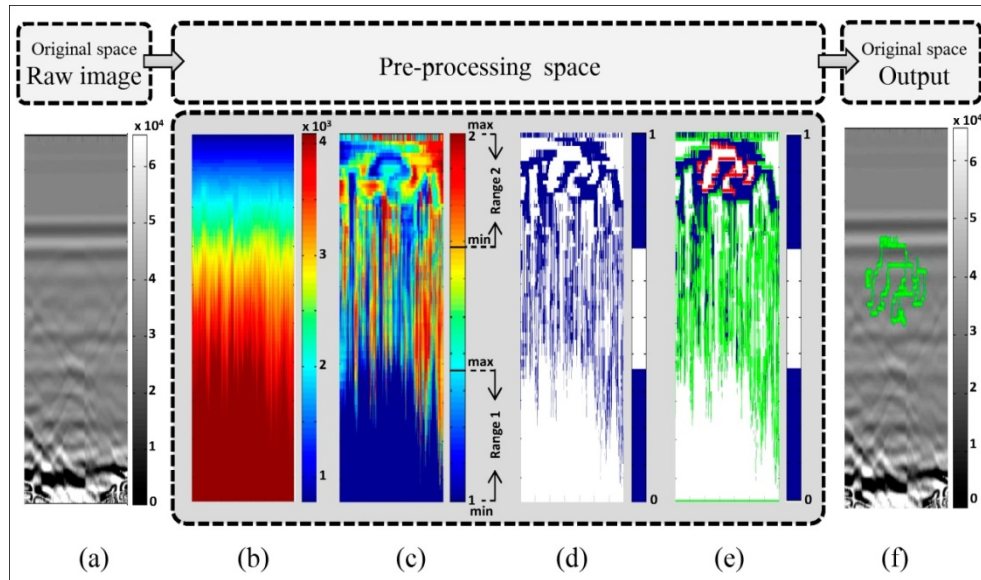


Figure 2.2 An example of the applied process: (a) raw image – MB matrix; (b) pre-processed image – Output1; (c) normalized pre-processed image – Output2; (d) image after range selection – Output3; (e) contouring, group selection; and (f) contour extraction and retrieval

From Output 3 a contour detection was performed (Figure 2.2(e)) using the Moore-Neighbor tracing algorithm modified by Jacob’s stopping criteria (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004) in Matlab’s `bwboundaries` function. From those generated contours a selection that shows spatial continuity when compared with previous time step contours was made. The selected contours were transferred to the original raw image space. Finally, to improve comprehension and visualization of the results, a fusion of the different contours (in the original space) was performed for each capture set. Fusion of the shapes obtained from GPR images after the iterative interpretation was performed using 3D models. This fusion was performed by positioning the points at their respective spatial coordinates and then plotting the end points for each group. These extreme points were connected by a Delaunay triangulation, which enabled surface visualization.

The contours obtained in this process will serve in future research to train intelligent data classification systems that can automatically detect contours. This can be achieved by using shape characteristics (such as eccentricity and orientation) and system parameters (such as pressure, water volume, and soil humidity) and the final objective is to validate or generate models that facilitate an improved understanding of the phenomenon.

The aim is to improve the visualization in subsequent extraction and classification of contours.

2.6 Analysis of results

In this section, the obtained results are presented after the GPR image interpretation and classification process. It must be mentioned that although the selected contours do not cover the total leakage area, a considerable part of this area is effectively selected. This means that the obtained results show some deformation and are not fully accurate.

Nevertheless, these results give relevant information about the represented phenomenon. We also claim that, with some improvements, complete information could be automatically extracted. The obtained results of the process of interpretation and extraction of contours are shown in Figure 2.3.

Figure 2.3 shows that times corresponding to Stage 2 (t_1 and t_2) in the slices from A through C do not present a significant difference, which is coherent with the survey plan when considering that this is the pipe-filling stage. From Stage 3 (t_3 through t_9), the pipe has reached its maximum volume and starts leaking; it is just after t_3 that the slices start to demark the zone being filled with leaked water. It is observed that from t_3 , in slices A and B, the extracted contours present a similar

form. For slice C the first demarcating contour appears at t4. The difference between the extracted contours lies in the difference in zone growth and in ascending contour displacement, caused by the volume increase and rising water.

In slice D, the results corresponding to the transversal slice for the pipe over the leak spot are shown. For Stage 2, in t1 and t2, it is observed that it is possible to extract the pipe zone in the filling process, in contrast to the previous slices (slices A through C). The pipe is demarked by a hyperbola and this is observed in all the images; the contours are fully (t1 and t2) or partially (t3 through t9) enhancing the pipe (zone within the hyperbola) and leaked water (remaining zone). In Stage 3, the selected zone set grows and takes the main role in the image, enabling the water action to be seen once it is out of the pipe.

The variation of the forms in the various images shows that it is possible to obtain (to some extent) the path of the water as it leaks from the pipe. While the results are not accurate and reveal some deformation, it is also true that they can be calibrated to establish a model of leaked water for each type of breakage, and relate the leak to the pressure and flow values in the system. Similarly, a more complete study with different soil types could serve to identify the type of propagation and model the plume dispersion.

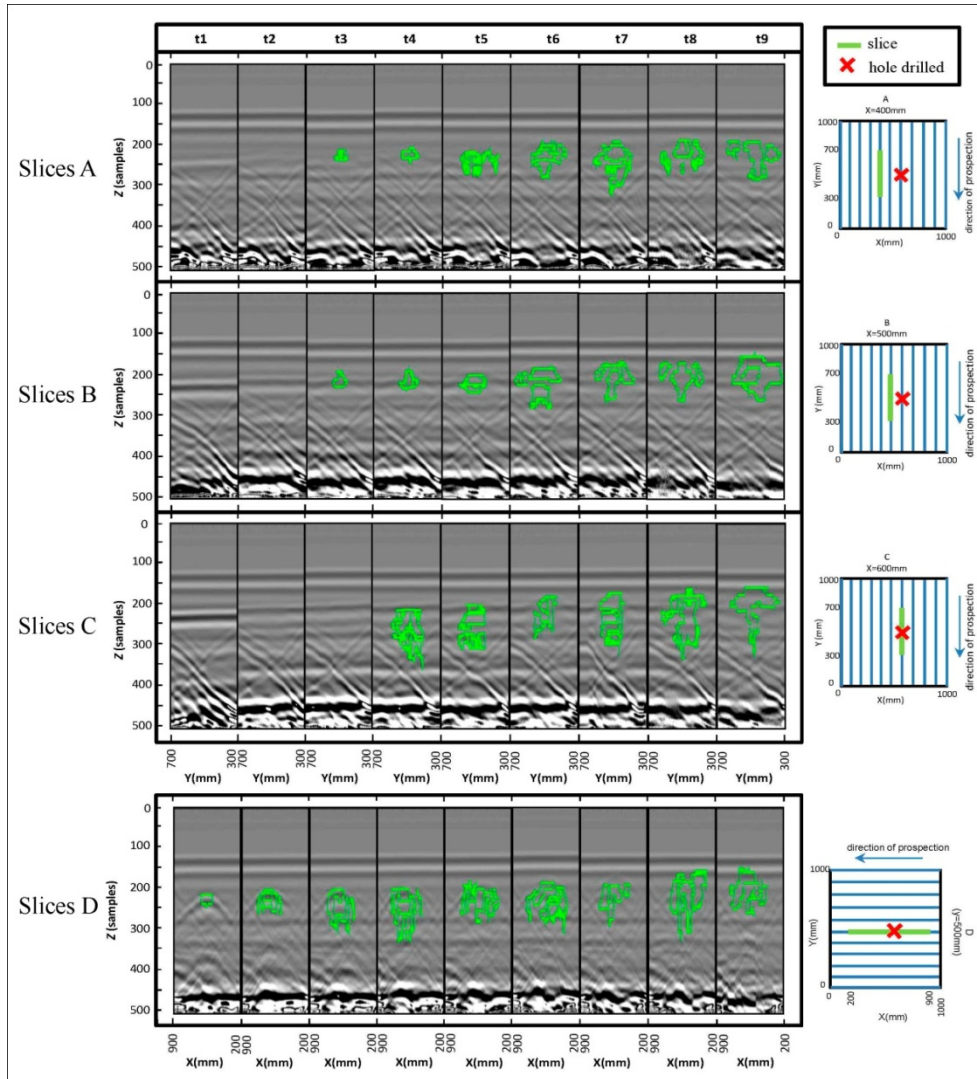


Figure 2.3 Leakage area contour slices A through D

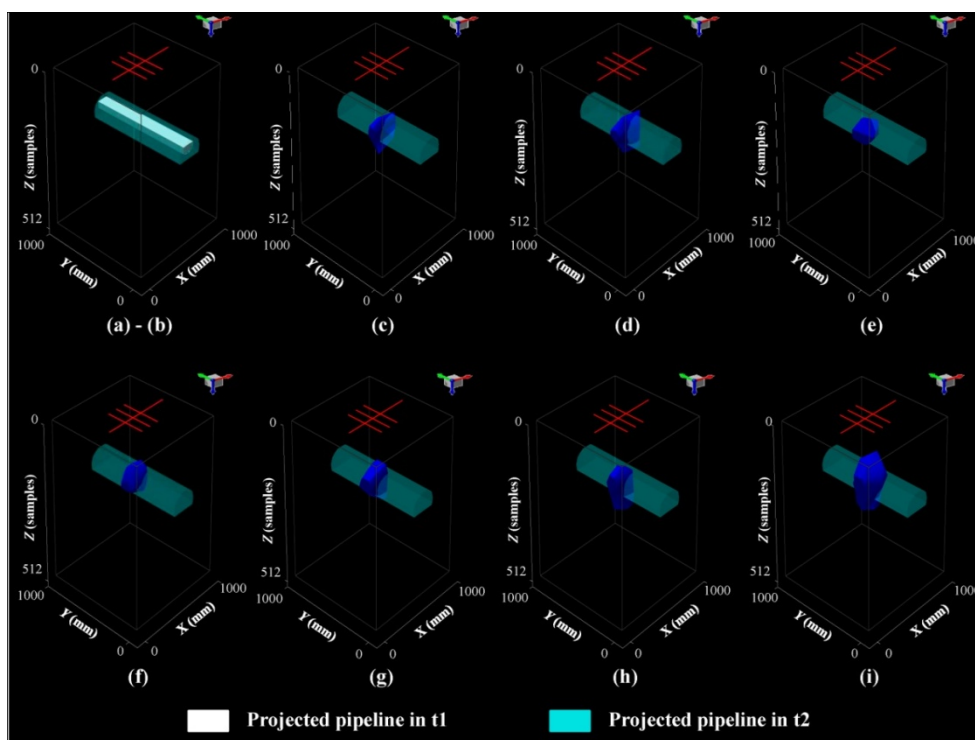


Figure 2.4 3D model leak evolution; (a) to (i) represent times t_1 to t_9 , respectively.

With the objective of better understanding the presented phenomenon in Figure 2.3, Figure 2.4 shows the results obtained in 3D representations to improve visualization. Figure 2.4 shows the volume form caused by the leaked water through the different survey stages, making evident the difference between Stages 2 and 3. The corresponding volumes show the evolution of the leak over time in the area of interest. Form and volume variation are observed as the leakage grows, along with its development. In addition, it is possible to appreciate how the water leak tends to grow upwards. This enables determination of the tank volume that is affected by the simulated water leak, thus generating the basis to create theoretical models of dispersion under less controlled conditions. The 3D images obtained by using this

approach may enable personnel who are not highly qualified in GPR to understand the phenomenon of a buried water leak.

2.7 Conclusions

From this study we can conclude that it is feasible to use non-destructive methods (GPR in our case) in water leak detection from buried pipes to reconstruct the stages of the leak and show how water is dissipated underground. Since this work shows that it is possible to obtain the wet area contours, from which more complex studies can be made, it is also possible to determine the volume of wet soil, and the volume change over time. From this perspective, we conclude that the obtained contours of this study contribute information beyond the initial hyperbolae study that some previous works rely on. This approach favors the generation of more accurate models in terms of reproduction or detection of leaks and is also a step towards a possible automatic process in the future.

In addition, the application of pre-processing to the GPR images enables the image data to reveal more information based exclusively on these data (that is to say, with no reference or contrast images) and so improves visualization. This brings us closer to an automatic detection and location of these abnormalities. The work performed has shown the feasibility of generating 3D models that are easily interpreted by personnel who are not highly qualified in the use of GPR, enhancing the understanding of the phenomenon.

2.8 Acknowledgement

Part of this work has been developed under the support of an FPI (*Formación de Personal Investigador*)-UPV (*Universitat Politècnica de València*) scholarship granted to the second author by the *Programa de Ayudas de Investigación y*

Desarrollo (PAID) of the Universitat Politècnica de València, and the support of Fundación Carolina PhD, within its short stances scholarship program for the first author. The use of English in this paper has been revised by John Rawlins.

Capítulo 3

GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters

Publicación

Ocaña-Levario, S.J., Carreño-Alvarado, E.P., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters. *Journal of Applied Geophysics*, 152, 236-247, 2018.

DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.03.025

INDICIOS DE CALIDAD (2019): JCR: IF = 1.975, Q2; SJR: IF = 0.78, Q2

VERSIÓN AUTOR DEL ARTÍCULO

3.1 Abstract

Nowadays, there is growing interest in controlling and reducing the amount of water lost through leakage in water supply systems (WSSs). Leakage is, in fact, one of the biggest problems faced by the managers of these utilities. This work addresses the problem of leakage in WSSs by using GPR (Ground Penetrating Radar) as a non-destructive method. The main objective is to identify and extract features from GPR images such as leaks and components in a controlled laboratory condition by a methodology based on second order statistical parameters and, using the obtained features, to create 3D models that allow quick visualization of components and leaks in WSSs from GPR image analysis and subsequent interpretation. This methodology has been used before in other fields and provided promising results. The results obtained with the proposed methodology are presented, analyzed, interpreted and compared with the results obtained by using a well-established multi-agent based methodology. These results show that the variance filter is capable of highlighting the characteristics of components and anomalies, in an intuitive manner, which can be identified by non-highly qualified personnel, using the 3D models we develop. This research intends to pave the way towards future intelligent detection systems that enable the automatic detection of leaks in WSSs.

Keywords: Variance filters; GPR images; Non-destructive methods; Water leaks; Water supply systems.

3.2 Introduction

In the last years, water leaks have taken a leading role in the management of urban water supply systems (WSSs) because leakage represents a serious problem that severely affects WSS utilities and, ultimately, water consumers. According to several reports, a substantial amount of water gets lost through leaks in WSSs (Martini, Troncossi, & Rivola, 2015; Nasirian, Maghrebi, & Yazdani, 2013). For example, the World Bank in partnership with the International Water Association states that in developing countries, in a coarse manner, 45 million cubic meters of water are lost daily. This, in economic terms, can be valued over US\$3 billion per year. This amount decreases in more developed countries (World Bank, 2016). To face this problem, it is crucial to implement actions to detect, locate and control leaks in water networks.

Leaks in WSSs not only represent a high percentage of quality water loss, but also reduce system efficiency, put water quality at risk, and produce economic cost increase for the utility. To overcome efficiently this problem, early detection of anomalies and precise location of the flaws are deemed necessary. To serve this purpose, the most common methods are the acoustic method (Brennan, Joseph, Muggleton, & Gao, 2008; Hunaidi, Wang, Bracken, Gambino, & Fricke, 2004; Juliano, Meegoda, & Watts, 2013), infrared thermography (Atef, Zayed, Hawari, Khader, & Moselhi, 2016; Fahmy & Moselhi, 2010), gas trace test and ground penetrating radar (GPR) (Demirci, Yigit, Eskidemir, & Ozdemir, 2012; Dong, Carnalla, & Shinozuka, GPR survey for pipe leakage detection: experimental and analytical study, 2012; Lee & Oh, 2018). Among them, GPR is one of the most effective tools for the characterization of ground conditions in urban areas (Hong, Kang, Lee, & Lee, 2018), thus, in particular, making it easier water network inspection by demarking in GPR images (radargrams) contrasts between leaked wa-

ter and the surrounding ground derived from their dielectric characteristics (Crocco, Soldovieri, Millington, & Cassidy, 2010). This is the reason why, in the last years, GPR use has been extended to various subsurface geophysical investigations, particularly at shallow depths (Shaikh, Tian, Shi, Zhao, & Junejo, 2018; Lai, Chang, & Sham, 2018). GPR is an easily applied and fast methodology; however, the images obtained are not easy to interpret (Ayala-Cabrera D. , Herrera, Izquierdo, & Pérez-García, 2011b; Gerlitz, Knoll, Cross, Luzitano, & Knight, 1993; Thomson, Wang, & Royer, 2009). It is necessary an adequate treatment of the images by applying different processes and filters (Santos & Teixeira, 2017; Xue, et al., 2017) that help the visualization of the sought characteristics (buried pipes and water leaks, in our case). Accordingly, works such as Stampolidis, Soupios, & Vallianatos (2003), use GPR image processing by low-band filters to identify leaks in PVC urban pipelines; Hasan (2012) and Hyun, Jo, Oh, Kim, & Kim (2007) perform background extraction and image filtering of GPR images, respectively; furthermore, Simi, Bracciali, & Manacorda (2008) uses the Hough transform to locate hyperbolas in GPR images; Tavera (2008) uses the Hilbert and Fourier transforms; and Ayala-Cabrera D., Herrera, Izquierdo, & Pérez-García (2011b) applies a multi-agent methodology for similar purposes, just to name a few. All of them show varied efficiency for locating buried objects and specific damages in networks by applying adequate processing methodologies to GPR images.

However, most of these works are based only on the location and interpretation of the hyperbolas generated either in raw or pre-processed images. For that reason, this work focuses on the evaluation of the viability of identifying and extracting morphological characteristics (contours, patterns, etc.) corresponding to a water leak from a PVC pipe under laboratory-controlled conditions. In this framework, recent laboratory assays and water leak image processing contributions, such as Lai

W. L., Chang, Sham, & Pang, (2016) on GPR image pattern detection, or Ocaña-Levario, Ayala-Cabrera, Izquierdo, & Pérez-García. (2015) and Ayala-Cabrera D. , Herrera, Izquierdo, Ocaña-Levario, & Pérez-García. (2013b) by using *Multi-Agent-Based Simulation* (MABS) for GPR image pre-processing, can be quoted. In this work, the proposed methodology uses second order statistical (variance filter) parameters to highlight features of interest, such as, objects (pipes) and leaks, which help improve their posterior feature extraction. Enhanced visualization is obtained from more differentiated contrasts, which, in addition, is independent of the direction of the prospection with respect to the location of the element of interest. These advantages are highlighted after comparison with the MABS methodology, a well-established visualization technique. The main objective of this process is to extract leak characteristics from GPR images using a variance filter, and then create 3D models for better understanding WSS buried elements. In future works we expect to use the variance filter-extracted characteristics as inputs for intelligent detection systems, allowing automatic leak detection, and ultimately, to improve efficiency in urban water management.

Related to the employed approach in this document, we have to quote recent researches like Fabijariska (2011), which uses a variance filter to determine contour locations in synthetic and real images, and Sarwas & Skoneczny (2015), which tries various variance filters to locate objects in RGB images. These two investigations show a promising use of variance filters, which are evaluated as a simple filter in RGB images.

In this work we prove that the variance filter overcomes the traditional scope based in boundary detection on GPR images, in a manner that the hyperbolas that are shown in GPR images as components can now be shown with differentiated shapes in the results obtained. As a consequence, it can be concluded that variance filters

help the identification of WSS components and leaks, thus allowing the detection of contrasts between the various material borders within an image.

This paper is organized as follows. In the first section, we have presented a brief introduction to the subject and reviewed relevant literature. The second section is dedicated to the characteristics of the tests performed. The third section shows the proposed methodology based on a variance filter. The analysis and results of processed GPR images with the variance filter are presented in the fourth section. Next, the fifth section presents a comparison analysis between the results obtained by the proposed methodology (variance filter) and the results obtained by a multi-agent based system. The sixth section presents 3D models obtained by both methods to ease interpretation. Finally, a section of conclusions closes the document.

3.3 Case study – assay configuration

In this section, the laboratory assay configuration used to obtain the GPR images is presented. The proposed assay configuration is presented in Figure 3.1.

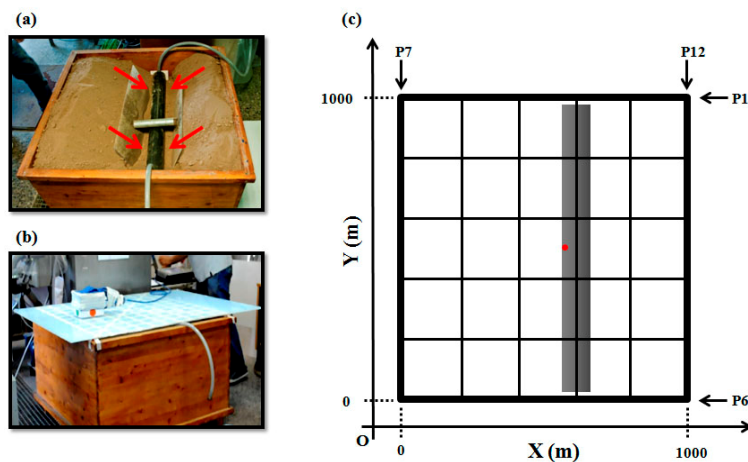


Figure 3.1 Assay configuration: (a) Buried pipe (black), (b) polypropylene plate (light blue) - GPR antenna of 1.5 GHz, (c) data sampling configuration

For the ensemble of tests, a $1.00 \times 1.00 \times 0.60$ -meter wooden tank was employed, thus emulating a land plot. Inside the tank a 0.95-meter-long and 0.10-meter diameter PVC pipe was buried in dry soil. It is important to say that the pipe was connected on both ends by two hose pieces, allowing introduction and extraction of water in and out of the system. Finally, to simulate a pipe break, the PVC pipe was drilled in the center. The pipe was covered with dry soil once placed inside the tank. On top of the tank a polypropylene plate was placed to improve data acquisition. This configuration had also been used in other laboratory tests (Ayala-Cabrera D. , Herrera, Izquierdo, Ocaña-Levario, & Pérez-García, 2013b; Ocaña Levario, 2014) employing various pipe materials. It is worth mentioning that in both cases the location of the leak was inferred after a hard work of interpretation developed by experts in image analysis. The plate had 12 traces (slices), 6 parallel to the X axis (P1 to P6) and 6 parallel to the Y axis (P7 to P12), equally spaced, with separation 0.20 m, thus producing a sampling mesh in which the GPR antenna was slid to capture data. This configuration was intended to ease the fieldwork of operators in capturing the information.

The GPR equipment used for the assays corresponds to a 1.5 GHz central frequency monostatic antenna, with parameters 120 traces/s, 512 data/trace and 20 ns/512 data. The antenna selection was performed given the required soil penetration characteristics, taking also into consideration the shallowness of real pipelines buried in water supply systems (Ayala-Cabrera D. , Izquierdo, Montalvo, & Pérez-García, 2013a).

Additionally, to compare between normal operation conditions of the pipe and a leakage condition, this work proposes two scenarios. The first scenario was performed without water inside the pipe (no leak case); in the second scenario, the pipe was filled with water, which was leaking through the drilled hole.

3.4 Proposed methodology – variance filter

The proposed methodology for leak boundary identification and extraction from GPR images is presented in this section. First the variance filter is introduced, then the methodology applied to the images is described.

3.4.1 Variance filter

The basic principle of the variance filter consists in calculating the variance around each pixel of the image with size $m \times n$, m being the number of rows in the image and n the number of columns; this notation is used throughout this document. First, the window size $s \times o$ (number of pixels to work with) is defined. Then, an iterative process starts, which uses the variance filter formulation described by (Fabijaríska, 2011):

$$\bar{u}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{ij}$$

equation 3.1

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_{ij} - \bar{u}_{ij})^2$$

equation 3.2

In each step, the mean is first estimated for the chosen window. This mean is defined by equation 3.1, which uses the size of our window and the pixel values of the image. Next, the variance is calculated by equation 3.2, with the pixels inside the selected window and the value obtained in equation 3.1; the result is associated to the center pixel of the window in the new image; this is repeated for all pixels of the image. By doing this, a new image is obtained. Notice that the new image is of size $(m - (s - 1)) \times (n - (o - 1))$.

The proposed methodology for leak boundary identification and extraction from GPR images is presented in this section. Figure 3.2 shows the process, which consists of the following steps: a) get the raw input image, b) apply the variance filter to obtained GPR images, c) smooth the filtered images, d) identify range objects of interest by binarization, and e) obtain the contour of the selected groups. Next, this methodology is concisely described. Afterwards, in section six we explain how relevant patterns are extracted to create a 3D model.

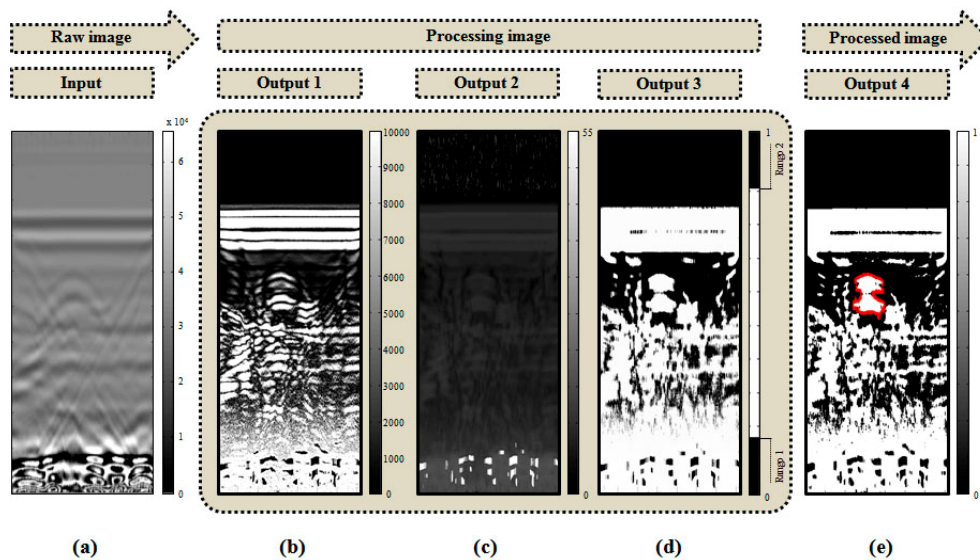


Figure 3.2 Methodology: (a) Raw input image, (b) variance filter image, (c) smoothed image, (d) binarized image and (e) processed image

3.4.2 *Raw image*

Is the GPR image obtained from laboratory surveys that will be used as input for the successive process.

3.4.3 *Variance filter image*

The variance filter is applied to the raw image. In our case, the window size proposed is 3×1 . At this point, it is important to note that the window size was select-

ed after having performed several tests with different configurations. After having tried window sizes of 5×5 , 4×4 , 3×3 , 3×2 , 5×1 , 4×1 , and 3×1 , in 3 different images, the window size of 3×1 resulted the configuration that better improves image visualization while avoiding oversmoothing. In the next step, the variance filter image is processed for a visual analysis, to discover characteristics that give relevant information related to pipe location and/or leak.

3.4.4 Smoothed image

Noise from the variance filtering process in variance filter image is removed by using the median filter implemented in Matlab's function `medfilt1` (The MathWorks, Inc., 2012; Pratt, 2007). The function `medfilt1` applies an n -th order one-dimensional median filter to each row of the image. The application of this function helps thresholding the image and also highlights the area of interest. Once cleaned the image noise (Belotti, Dell'Acqua, & Gamba, 2002; Harrison, 2005; Nagashree, Aswini, Dyana, & Srinivas, 2014; Singh & Nene, 2013) we obtain a smoothed image.

3.4.5 Binarization

Over the smoothed image, an iterative segmentation is done, based on the selection of one or more ranges ($[min\ max]$). Ranges are selected manually by choosing the minimum and maximum values that enhance visualization and selection of the characteristics of the objects as well as the anomalies. As a result of the selection of ranges, a binarized matrix is obtained. The smoothed and binarized images have the same dimensions.

3.4.6 Processed image (contour selection)

In the binarized image, boundary detection is obtained using the Moore's neighbor algorithm modified by Jacob Eliaoff (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004). This

algorithm is implemented in Matlab's `bwboundaries` function (The MathWorks, Inc., 2012). The `bwboundaries` function traces the exterior boundaries of objects, as well as boundaries of holes inside these objects, in the binarized image. Next, the selected contours for the images in both scenarios are compared; this results in an easy way to identify the boundaries belonging to the pipe and those belonging to the wet area created by the leak.

3.5 Analysis of results – variance filter

In this section, the results after applying the proposed methodology, as well as their interpretation, are shown. It is important to say that in this section the word slice is used to denote the GPR images, as they are sections in depth of the inspected ground. The GPR images are named transversal slices if the image was obtained from a prospection transversal to the pipe. Similarly, for longitudinal GPR inspections we speak of longitudinal slices. First, we show the transversal slices for the first scenario, followed by the longitudinal slices for the first scenario. Next, for the second scenario both transversal and longitudinal slices, in this order, are also shown.

3.5.1 First scenario – transversal slices

Figure 3.3a shows raw slices; there is evident difficulty to locate characteristics that confirm the presence of some object or anomaly; nevertheless, by analyzing the slices in detail, the hyperbolas obtained after moving the antenna transversally to the buried pipe can be identified. Hyperbolas are found between 200 and 250 samples (depth) showing the presence of the pipe. The raw images show diagonal lines crossing through and intersecting in the middle of each image approximately; these lines are signal reflections created by the tank walls, generating noise on the images. In slice P4 a couple of additional hyperbolas (anomalies) are shown. These

anomalies can cause confusion in posterior analyses, since they could be mistaken for the leak if not considered in the starting analysis. These hyperbolas cannot be caused by the leak since no water has been introduced to the system yet (first scenario).

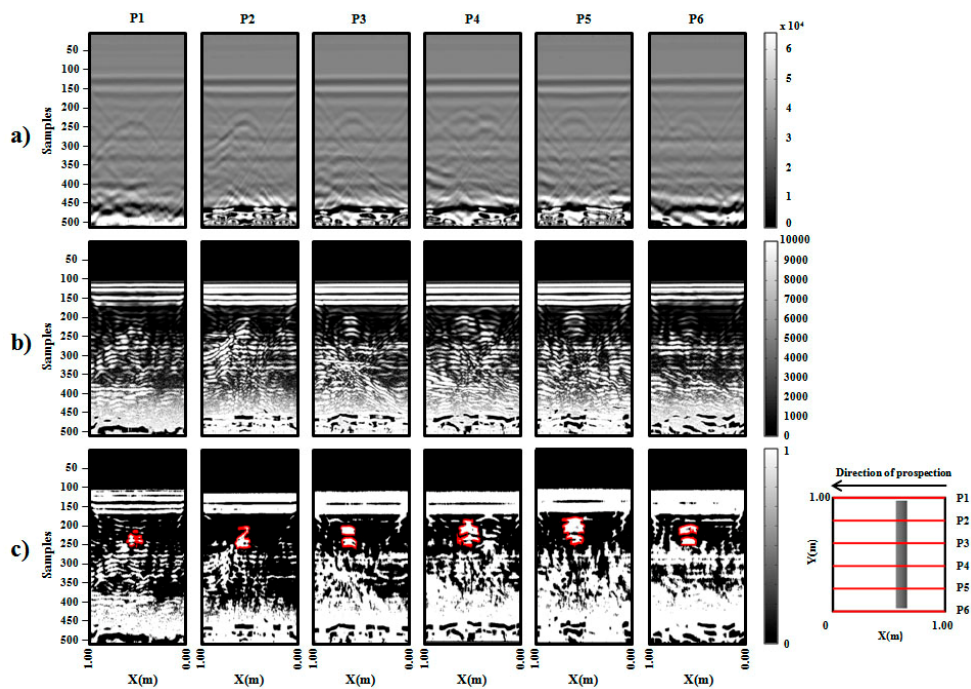


Figure 3.3 a) Raw images, b) variance filter images, and c) binarized images

Figure 3.3 b shows the slices obtained after the variance filtering process; curve-shaped ensembles that match the location of the hyperbolas in the raw images between 200 and 250 samples approximately can be observed. Also, in all of the images, around 175 samples a clear contrast in the images can be found; this contrast denotes the surface of the ground inside the tank. In slices P3 to P5 the shapes that appear in the images are very similar, having 3 to 4 curves that create a circular shape. This does not occur in slice P1 because of the hose that is connected to the

pipe; the presence of this hose, which feeds the system with water, also affects slice P2 and slightly P6. It is important to mention that slice P4 still has the anomaly visible to the right of the ensemble of curves that are considered to be the pipe. Finally, Figure 3.3c shows the contour selection of the shapes in each image.

3.5.2 First scenario – longitudinal slices

In these images the longitudinal layout of the pipe is visible. Normally, experts first locate the pipe by looking for hyperbolas in transversal slices. However, in these images it is shown that it is possible to locate the pipe from longitudinal slices.

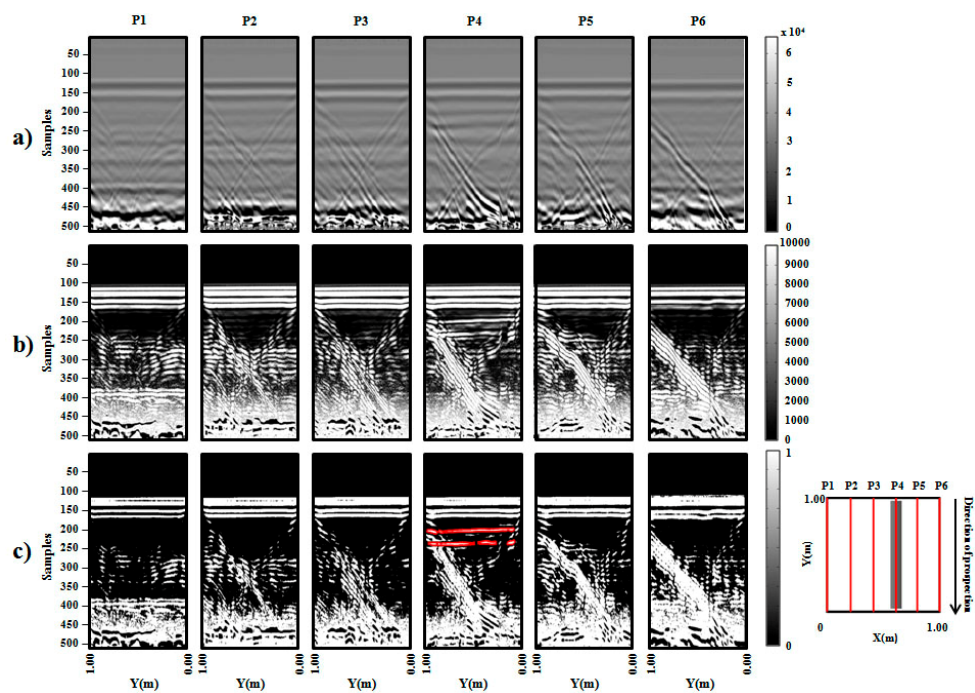


Figure 3.4 a) Raw image, b) variance filter images, and c) binarized images

Figure 3.4a shows the raw images. In the slices the diagonal lines resulting from the reflected signal produced by the tank wall are visible, similar to the slices in Figure 3.3a. Also, as in Figure 3.3a, it is difficult to identify the presence of the

pipe; however, when looking closely and comparing the slices, slice P4 shows a couple of parallel lines, which are demarked slightly; these lines correspond to the pipe located between 200 and 250 samples. In a prospection longitudinal to the buried pipe it is a harder task to find the pipe if compared to a prospection transversal to the pipe since no hyperbolas appear in the raw images; as in this case, the pipe is shown as various parallel lines, that can be easily mistaken or overlooked. Figure 3.4b shows the slices once finished the variance filter process; the presence of the pipe in slice P4, between 00 and 250 samples can be clearly seen. Pipe top and bottom boundaries are highlighted, being, then, easier to detect. Finally, Figure 3.4c shows the binarized slices and the shapes selected. Only slice P4 has a shape to locate the pipe; in all the other slices there is nothing to remark.

3.5.3 Second scenario – transversal slices

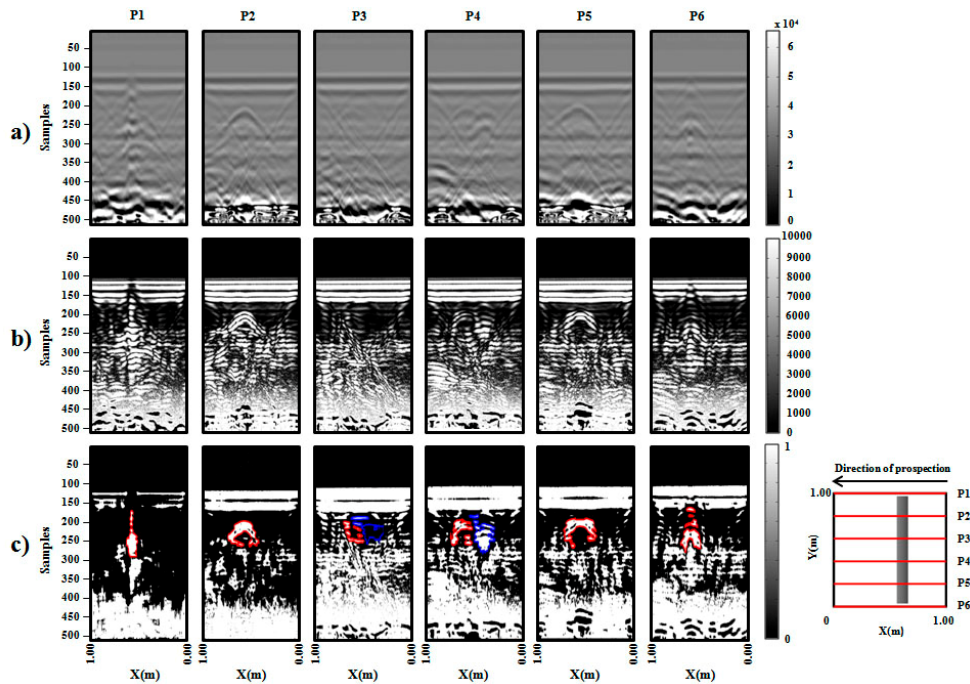


Figure 3.5 a) Raw images, b) variance filter images, and c) binarized images

In Figure 3.5 the raw slices for the second scenario are shown. First, in slices P1 and P6 a vertical distortion caused by the water present in the system can be observed. In slice P1 this distortion is due to water entering the system and in P6 it is caused by water leaving the system. In slices P2 and P5 hyperbolas are demarked around 200 and 250 samples, being clearly visible when compared with their corresponding slices in Figure 3.5a. In slice P3 a slightly demarked hyperbola can be located around 200 and 250 samples and, over it, a bigger hyperbola that contains the former; this is due to the anomaly produced by the presence of water leaking out of the pipe. Slice P4 shows a hyperbola between 200 and 250 samples and, to its right, a couple of hyperbolas, which were also present in Figure 3.3a; the difference now is that in slice P4 of Figure 3.5a, it is possible to detect a thin hyperbola over the couple of hyperbolas detected previously, this suggesting the presence of water. Also, the hyperbolas caused by the pipe show a distortion due to the water leaking out of the pipe.

In Figure 3.5b the slices obtained after the variance filter are shown. The filter casts new relevant results, allowing obtaining previously not visible characteristics when compared with raw slices. The first slice, P1, shows clearly the hose that allows water to enter the system. The hose is located vertically around 150 to 225 samples approximately and, next to it, a circular shape is demarked. The circular shape corresponds to the pipe and it is located between samples 225 and 300; the same occurs in slice P6 for water leaving the tank. In slices P2 and P5 a well-defined ensemble of 3 hyperbolas can be identified; this shows the water contained in the pipe. Slices P3 and P4 denote the presence of water leaking; to the left the shapes that belong to the pipe and to the right the shapes that belong to the zone where the leak is located can be observed. Finally, Figure 3.5c shows the binarized images, as well as the shapes and boundaries selected that match the pipe and the leak.

3.5.4 Second scenario – longitudinal slices

The raw longitudinal slices for this scenario are shown in Figure 3.6a. We remember that these slices were taken with a leak present in the system. In slice P3 a slight perturbation in the shape of a hyperbola located around 200 samples depth approximately is observed. Also, in slice P4, two parallel lines that correspond to the pipe can be seen; these lines are cut in the middle of the image and join together to form an X, and, over it, a hyperbola is located showing the presence of the leak. The precise location of the leak, as well as the wet area around the leak can also be detected. Figure 3.6b shows the images resulting of applying the variance filter; in this figure, the visualization of the pipe and the leak is clearer than before: slice P3 has a dark mark between samples 175 and 250 and fits the observed wet soil caused by water leaking out of the pipe. Slice P4 shows the pipe filled with water; it is now clearer than before to observe the area were the leak is located, the reach of the leak, and the pipe itself. The pipe is located between samples 200 and 250, and the wet zone (affected by the leak) is easily identifiable in the center of the image between samples 125 and 275. Finally, Figure 3.6c shows the binarized slices as well as the respective boundaries of the objects.

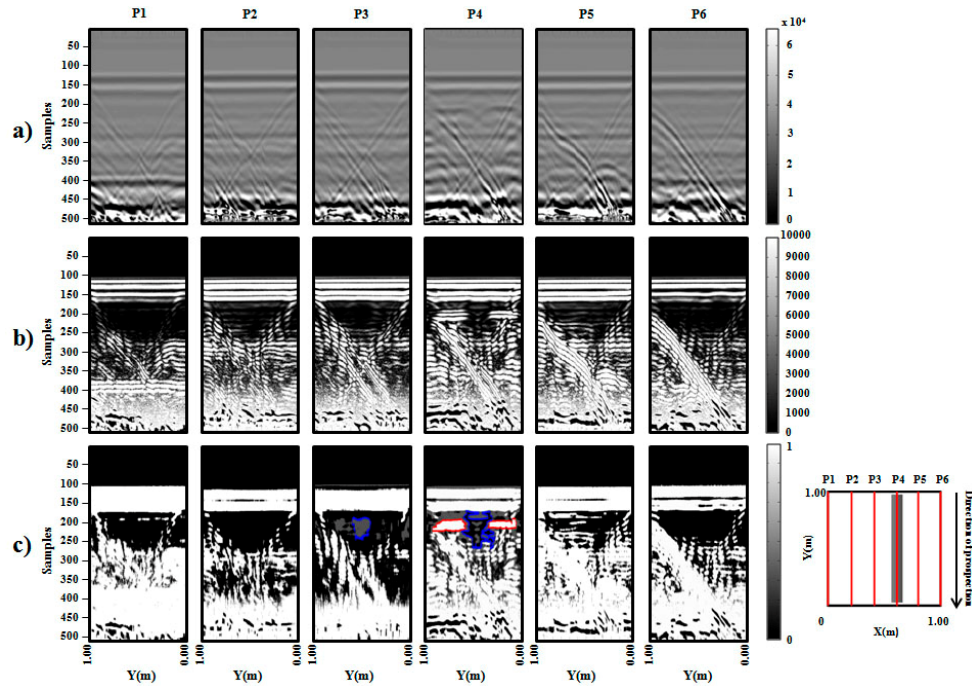


Figure 3.6 a) Raw images, b) variance filter images, and c) binarized images

The previously shown images show relevant information that allows locating the pipe and the anomalies present in the GPR images, a leak in our case. The variance filter provides an easy way to detect, locate and extract characteristics of the images.

3.6 Comparison analysis using a multi-agent-based method

In this section, a comparison analysis between the obtained results using the variance filter and the MABS preprocessing algorithm is presented. The final objective is to highlight each method characteristics, which help GPR image analysis, making it easier the visualization and identification of anomalies in the images, in a clearer and easier way. To this aim, the basic principles of the algorithm are shown, as well as a comparison analysis between the obtained images with each method.

3.6.1 Pre-processing algorithm with multi-agent systems

The pre-processing of GPR images used in this section was proposed by Ayala-Cabrera D., Izquierdo, Montalvo, & Pérez-García (2013a) and was termed an agent race. The algorithm is developed in Matlab, is based on game theory and uses the multi-agent paradigm (Shoham & Leyton-Brown, 2009). The input to this algorithm is the raw GPR image (radargram) of the GPR prospection, which consists of an $m \times n$ -sized matrix. The n traces, of length m , that are generated are used in this work as parallel tracks for the n -agents to run. The race is an endurance test for the competing agents, the prize for each agent being a movement step for each effort performed. Those efforts are based on wave amplitude value changes in each column of the matrix (radargram). The agent race includes two phases: a) warming-up and b) competition. The race takes a total time $tt = tw + tr = m$, tw being the warming-up time and tr the competition time. The displacements of the agents during time tr are conditioned by the trend change of the wave amplitude on the trace that is being run. The race ends when time tt has elapsed, and the race winner is the agent who has obtained the largest displacement during this time. The output (output A) of this process consists of an $m1 \times n$ matrix, $m1$ being the maximum number of displacements. Columns in this matrix describe the movement of the agents related to the competition. In this work, the movements obtained by the agents are called time lines. On each time line, the time obtained in the competition by each agent is sorted by increasing values, indexed from 1 on, giving equal indexes to equal times. These time lines are later normalized, obtaining Output B, which is the matrix used to compare later on. Figure 3.7 shows visually the latter.

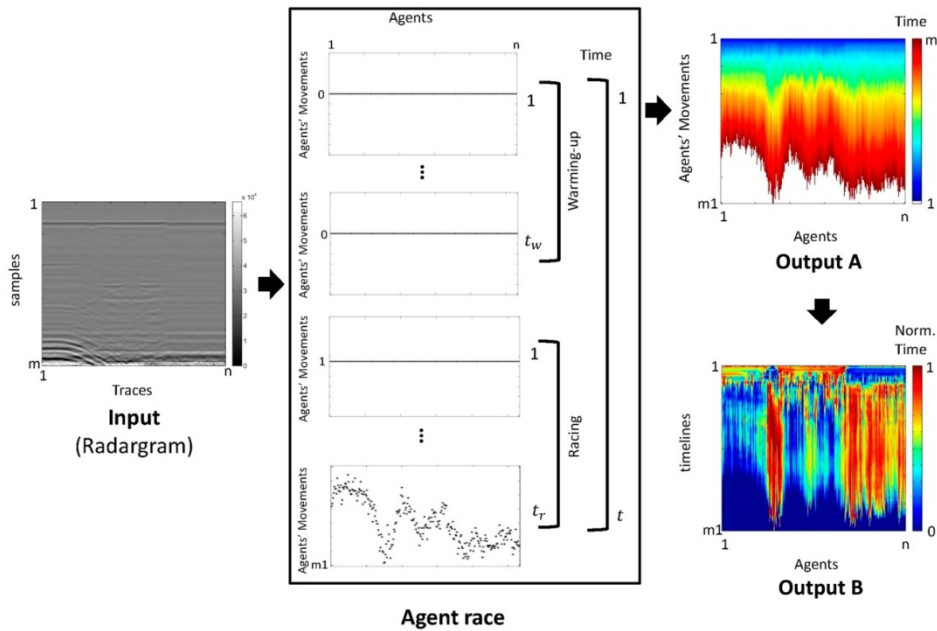


Figure 3.7 Scheme for the agent-race algorithm

Fuente: (Ayala-Cabrera D. , Izquierdo, Montalvo, & Pérez-García, 2013a)

3.6.2 Comparison and image analysis

In the following sub-paragraphs, the comparisons between the variance filter and MABS resulting images presented. For the first scenario (subsections 3.6.2.1 and 3.6.2.2), transversal and longitudinal slices are shown in Figure 3.8 and Figure 3.9 respectively. Additionally, for the second scenario (subsections 3.6.2.3 and 3.6.2.4), the transversal and longitudinal slices for both methods are shown in Figure 3.10 and Figure 3.11.

3.6.2.1 First scenario comparison- Transversal slices

Figure 3.8a shows the slices using the MABS algorithm. In the slices, it is possible to observe the presence of an elliptic formation between time lines 10 and 20 and between 0.5 and 0.6m in the sense of the x-axis; the presence of this elliptical for-

mation corresponds approximately to the place where the PVC pipe is buried. Additionally, the color intensity of the ellipse is stronger in the center of the ellipse and vanishes close to its border; this characteristic favors the location of the pipe. Moreover, slices P1a and P6a show additional formation above the ellipse: the shape of the formation is triangular and is located at time line 5 approximately; this corresponds to the input and output hoses. This has to be highlighted since this formation is not easily detected in the variance filter processed slices (b). However, in contrast, in the variance filter processed slices it is easier to locate the pipe. The shapes obtained with each method are different. The pipe shape is identified by ensembles of hyperbolas in the variance filter slices (b), while in the MABS (a) the pipe is shown by ellipses. Nonetheless, the difficulty in identifying and locating shapes in the slices (a) is harder because the image composition produces some confusion among shapes in the slice.

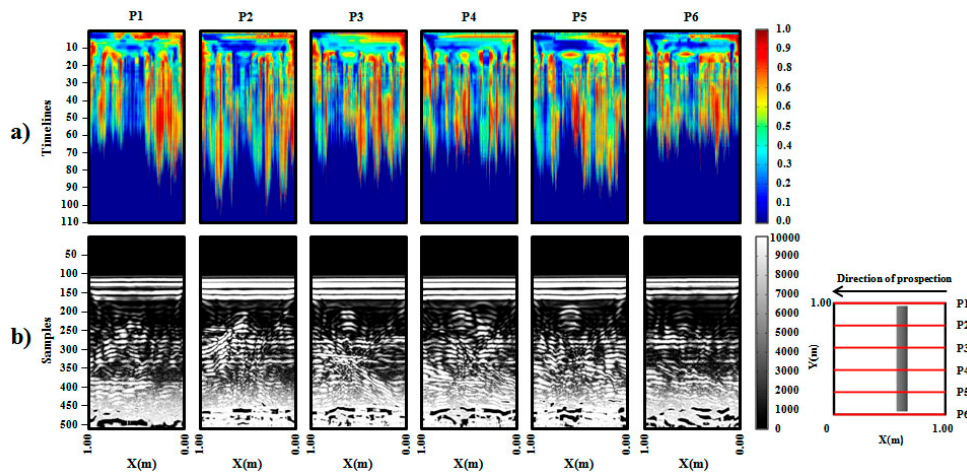


Figure 3.8 (a) MABS pre-processed images and (b) variance filter images

3.6.2.2 First scenario comparison - Longitudinal slices

Figure 3.9 shows the slices longitudinal to the pipe. Focusing first on the slices (a), it can be observed that each slice is different, but nothing particular can be seen at first look. However, if a detailed analysis is performed, in slice P4a, between time lines 10 and 20, intense yellow linear formations can be seen that are not present in any other slice. This formation corresponds to the upper and lower boundaries of the buried pipe. In contrast, focusing now on slices (b), it is possible to identify with certain ease the pipe in slice P4b; this is because the high variance value allows this zone to be brighter, improving a fast pipe location.

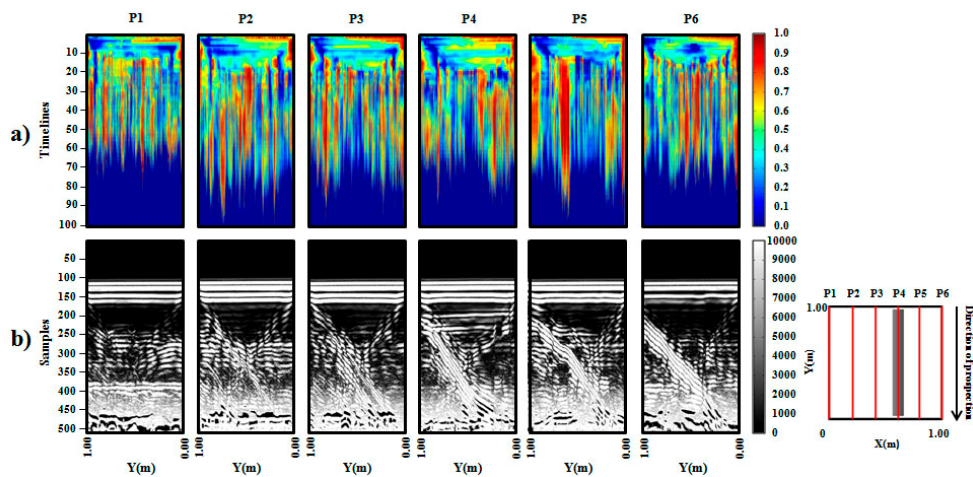


Figure 3.9 (a) MABS pre-processed images and (b) variance filter images

3.6.2.3 Second scenario comparison - Transversal slices

Figure 3.10 shows the transversal slices of the second scenario, a scenario in which the pipe is leaking. By analyzing the slices in Figure 3.10a, it is observable that the ellipse previously detected in the Figure 3.8a has higher color intensity because of the water present in the system.

In Figure 3.10b it is possible to observe that the hyperbolas are closer and tighter between them, changing its shape slightly when comparing with the slices shown in Figure 3.8b.

In Figure 3.10, in slices P1a and P6a, the input hose and the output hose, respectively, can be observed as an increase of color intensity because of the water passing through. When compared with slices P1b and P6b, the hose is shown connected to the main PVC pipe as an ensemble of hyperbolas, improving the image analysis, as it reflects how it is connected in reality.

Finally, slices P3a and P4a show an ellipse of lower color intensity (blue) over the ellipses identified as the pipe; this matches the wet area caused by the leak, showing that the leak is above the buried pipe. Opposite to those slices, slices (b), especially P3b and P4b show that the wet area extends through the right to the top of the buried pipe.

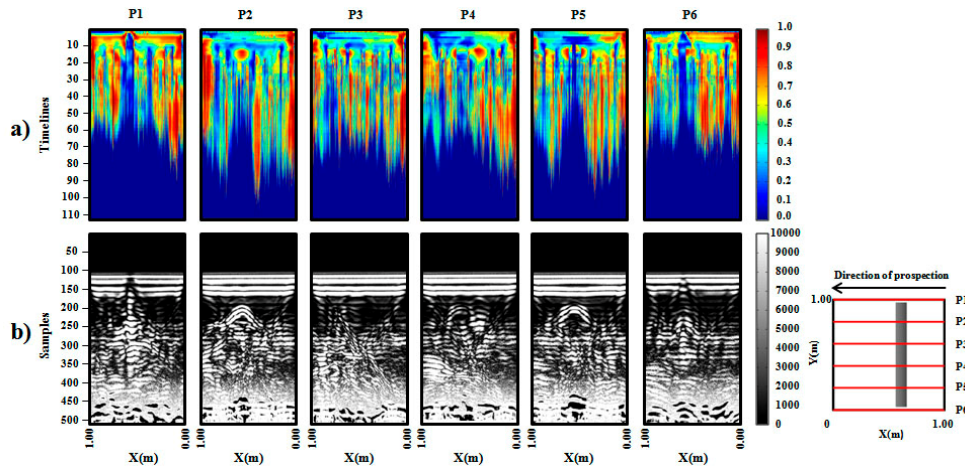


Figure 3.10 (a) MABS pre-processed images and (b) variance filter images

3.6.2.4 Second scenario comparison - Longitudinal slices

In Figure 3.11, the longitudinal slices that show the water leaking out of the pipe are presented. Starting with the analysis of slices (a), the characteristics of these slices are very different as well as the color intensity. However, looking closer to slices P3a and P4a, it is possible to highlight ellipses appearing between time lines 5 and 15, the biggest being the ellipse of slice P4a, which matches where the leak is located. Slices (b) allow identifying easily the zones affected by the leak, which are shown in slices P3b and P4b. Additionally, slices (b) favor the visualization of the pipe itself; this helps the accurate location of the leak.

Finally, from this comparison analysis, we can conclude that both methods are efficient, easily applicable, and allow extracting buried pipe characteristics and also anomalies present underground, such as water leaks. The MABS algorithm favors to obtain shapes that are similar to the pipe shape, but has an inherent difficulty because of image composition and colors. This may introduce confusion when interpretation is done. And even more, if the studied area composition is unknown, misinterpretation can occur with relatively ease. In its turn, variance filtering has an advantage over the previously mentioned method, because variance filtering allows highlighting pipe characteristics or leaks making them visible at first look, being also easily identifiable.

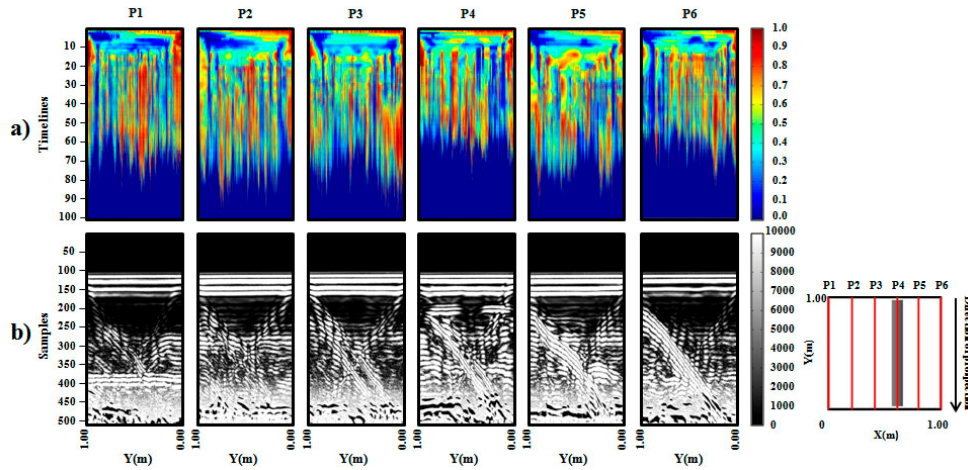


Figure 3.11(a) MABS pre-processed images and (b) variance filter images

Other advantage is that the pipe can be located transversally (usual appearance of hyperbolas) or longitudinally. Finally, the slices processed using the variance filter reduce confusion because the contrast between values can highlight better some characteristics. For example, higher values correspond to brighter areas (pipe), while lower values are darker on the image (leak).

It must be stated clearly that this work has been developed under controlled laboratory conditions, which benefits feature identification.

3.7 Model Comparison

In this section, a 3D model is created to improve comprehension and visualization of the results of both methods. The 3D model is built by merging contours, first placing the extracted contours in their corresponding slice spatial coordinates and then applying Matlab3D Delaunay function (The MathWorks, Inc., 2012), which creates a 2-D Delaunay triangulation of the points (x, y) , where x and y are col-

umn-vectors. The procedure is analogue as the one shown by Ayala-Cabrera D., Izquierdo, Ocana-Levario, & Perez-García (2014b).

To complete the comparison between both methods, Figure 3.12 shows the 3D models obtained from each method. Figure 3.12a shows the 3D model obtained from the images after application of the variance filter, and Figure 3.12b is the 3D model from the MABS pre-processed images. By comparing both models, a slight difference can be noticed. It can be observed that in Figure 3.12a the pipe is rounder than the one in Figure 3.12b. This is because of the elliptical shapes found in the MABS pre-processed images, favoring a shape that is more similar to the real pipe. Also, there is a big difference when looking at the wet area volume of each model. Figure 3.12a has a wider and scattered shape moving away from the pipe to the X axis; in contrast, Figure 3.12b shows a more concentrated volume located over the pipe.

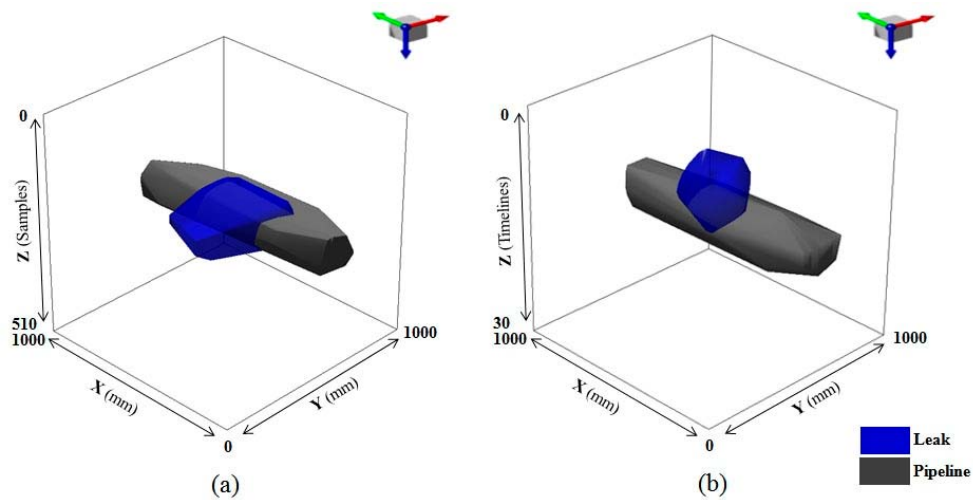


Figure 3.12 3D Models: (a) 3D model obtained from variance filter images and (b) 3D model obtained from MABS pre-processed images

Finally, in spite of the differences, both models are very approximate to the reality because both allow locating the leak precisely. We have to observe, however, that a suitable 3D representation depends on the correct interpretation and the forms found in the GPR images.

3.8 Conclusions

GPR is a potentially powerful tool to obtain valuable information for the location of leaks in water supply systems. This document applies a methodology based on a variance filter to facilitate the display of features that are not reflected in the raw images, thus facilitating the interpretation work for non-highly skilled personnel in GPR data handling.

The benefits of this process are the following. First, the variance filter is an easy-to-apply filter that produces images that help identify the contrast between the different materials present in the image and the objects that are being studied. This improves a precise location of the leak, and also the extraction of contours corresponding to the wet zone caused by water leakage. Also, the pipe is easily located. Using this information, it is possible to create 3D models to help visualize and understand the phenomenon. Additionally, this filter allows locating the pipe irrespective of the direction (transverse or longitudinal) it is located with respect to the GPR prospection, while in other methods this is not so obvious.

Moreover, a comparison with the MABS method for GPR image analysis is performed. This method is also used for leak identification over the images by close examination of the shapes that produces. The MABS has the ability to show elliptical shapes that are similar to the buried pipe, in places where the variance filter shows an ensemble of hyperbolas, that altogether has a circular shape. The MABS detects the input and output hoses as well as the variance filter, but the way to

show the hose is different: for the MABS technique, a triangular shape, and for the variance filter, a long and thin succession of hyperbolas. However, the image composition of the MABS method may cause confusion and trigger inaccurate conclusions if not suitably interpreted. Even so, if both methods are used together, richer information can be obtained from a single GPR image, as in the case of detection of a leak and its behavior.

When compared both 3D models, the MABS algorithm shows a rounder shape, but the leak is more consistent in the variance filter 3D model. However, in contrast, the pipe form is not as round as in MABS. In both cases, pipe and leak can be clearly shown.

Finally, the contours obtained in this process are intended to serve as a basis for training intelligent data classification systems that are able to detect the contours automatically and allow the ultimate objective of generating models that facilitate the understanding of leaks in WSSs. The authors are currently working in this line of research.

3.9 Acknowledgement

Part of this work has been developed under the support of Fundación Carolina PhD and short-term scholarship program for the first author.

Capítulo 4

A hybrid multi-criteria approach to GPR image mining applied to water supply system maintenance

Publicación

Carpitella, S., Ocaña-Levario, S.J., Benítez, J., Certa, A., Enea, M., Izquierdo, J., A hybrid multi-criteria approach to GPR image mining applied to water supply system maintenance. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 754-764, 2018.

DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.10.021

INDICIOS DE CALIDAD (2019): JCR: IF = 1.975, Q2; SJR: IF = 0.78, Q2

VERSIÓN AUTOR DEL ARTÍCULO

4.1 Abstract

Data processing techniques for *Ground Penetrating Radar* (GPR) image mining provide essential information to optimize maintenance management of *Water Supply Systems* (WSSs). These techniques aim to elaborate on radargrams in order to produce meaningful graphical representations of critical buried components of WSSs. These representations are helpful non-destructive evaluation tools to prevent possible failures in WSSs by keeping them adequately monitored. This paper proposes an integrated *multi-criteria decision making* (MCDM) approach to prioritize various data processing techniques by means of ranking their outputs, namely their resulting GPR image representations. *The Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP) is applied to weight various evaluation criteria, with the purpose of managing vagueness and uncertainty characterizing experts' judgments. Then, the *ELimination Et Choix Traduisant la RÉalité III* (ELECTRE III) method is used to obtain the final ranking of alternatives. A real case study, focusing on a set of four GPR images as outputs of different data processing techniques, is presented to prove the usefulness of the proposed hybrid approach. In particular, the GPR images are ranked according the evaluation of five criteria namely visualization, interpretation, identification of features, extraction of information and affordability. The findings offer a structured support in selecting the most suitable data processing technique(s) to explore WSS underground. In the presented case, two options, namely the variance filter and the subtraction methods, offer the best results.

Keywords: GPR, radargrams, Water Supply Systems, FAHP, ELECTRE III

4.2 Introduction and literature review

Water Supply Systems (WSSs) support many daily human activities and, for this reason, their full availability has to be assured. A sudden lack of hydraulic supply may cause enormous inconveniences, both in civil and industrial environments. For this reason, the activities of maintenance for WSSs have critical importance, and interventions have to be adequately planned and implemented. Firstly, various parts of the networks need to be monitored and kept under control. *Non-destructive techniques* (NDTs) are useful tools of inspection to explore and obtain information about the underground without damaging it. NDTs make it easy the inspection of possible damages and the overall evaluation of WSSs, with the aim of optimizing maintenance and costs.

A wide number of NDTs are reported in the literature (Liu & Kleiner, 2013; Hao, et al., 2012), to locate damages in WSSs, the most popular being acoustic methods, thermography and ground penetrating radar (GPR) (Demirci, Yigit, Eskidemir, & Ozdemir, 2012; Dong, Carnalla, & Shinozuka, 2011). In particular, the GPR technique is more effective than the acoustic methods in locating water leaks occurring in plastic pipes (Bimpas, Amditis, & Uzunoglu, 2010). It is also more flexible than thermography approaches because it can be used in the various seasons of the year without being affected by temperature variations (Ayala-Cabrera, Ocaña-Levario, Pérez-García, Izquierdo, & Herrera, 2013c).

Moreover, the GPR technique reveals to be a useful tool in easily exploring hidden elements (Hoarau, Ginolhac, Atto, & Nicolas, 2017; Gurbuz, McClellan, & Scott, 2012; Porsani, Sauck, & Júnior, 2006) by means of radargrams. Radargrams provide graphical representation of contrasts existing between specific elements and the surrounding ground, due to their different dielectric characteristics (Crocco, Soldovieri, Millington, & Cassidy, 2010). The main difficulty in using radargrams

derives from the big volume of information and the complexity of data interpretation, being necessary a high level of ability and experience by the involved personnel (Ayala-Cabrera D. , Herrera, Izquierdo, & Pérez-García, 2011b; Thomson, Wang, & Royer, 2009). For this reason, a plethora of process and analysis methods have been developed. These methods filter and mine GPR images to improve data visualization, with the aim of effectively identifying abnormal situations occurring underground.

Beyond the analysis of raw images (Hunaidi & Giamou, 1998), this paper uses three image processing techniques, namely: multi-agent system, subtraction and variance filter. The former (Ayala-Cabrera, Ocaña-Levario, Pérez-García, Izquierdo, & Herrera, 2013c) uses a multi-agent-based system to identify elliptical shapes related to abnormal conditions in the system. The second (Ocaña Levario, 2014; Ayala-Cabrera D. , Izquierdo, Ocana-Levario, & Perez-García, 2014b) proposes a subtraction between two GPR images in order to discover hidden features in the explored area. Lastly, the latter (Ocaña-Levario, Ayala-Cabrera, Izquierdo, & Pérez-García, 2016) applies the so-called variance filter to raw GPR images to analyse data variability.

This paper deals with the possibility of managing results derived from the mentioned techniques through such tools as *multi-criteria decision making* (MCDM) methods. These tools are useful in supporting various kinds of decision problems (Carpitella, et al., 2017; Nikas, Doukas, & López, 2018) and, as expressed by Kumar et al. (2017), their crucial role is widely recognized in the literature. Mulliner, Malys, & Maliene (2016) recommend these methods to achieve successful outcomes. In fact, various evaluation criteria, sometimes conflicting with each other, need to be taken into account for making decisions. The authors consider the support given by MCDM methods as valuable and capable of managing both qualita-

tive and quantitative aspects when an evaluation concerning a set of alternatives is required.

Mousavi-Nasab & Sotoudeh-Anvari (2017) underline the potential of MCDM methods to significantly improve complex decision processes. Their research proposes a comprehensive MCDM-based framework to deal with material selection problems. Løken (2007) highlights the high suitability of MCDM methods to face energy planning problems, when many decision makers and criteria are involved. Given that each method has both advantages and drawbacks, the authors recognize the combination of more than one method as a really good practice. As an example, Wang, Zhouquan Zhu, & Wang (2016) discuss a case study centred on a facility layout selection problem proposing a hybrid approach based on the following methods: *Simple Additive Weighting* (SAW), *Techniques for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution* (TOPSIS) (Certa, Enea, Galante, & Lupo, 2013a) and *Grey Relational Analysis* (GRA).

Among the wide number of MCDM methods existing in the literature (Sipahi & Timor, 2010) the most popular is the *Analytic Hierarchy Process* (AHP) technique, developed by Saaty (1977). The AHP easily carries out a ranking of decision alternatives (Chen, Wu, & Yang, 2014). The method is able to calculate the vector of weights of involved criteria on the basis of the opinions formulated by a single expert or a group of decision makers. However, Büyüközkan, Çifçi, & Güleriyüz (2011) observe the inability of the AHP in correctly reflecting the vagueness of the decision makers' perception and thus, in many real cases, linguistic assessment is necessary, instead of just crisp numbers, to represent the real situation.

A further– and possibly more reliable – development of the AHP method consists in a fuzzy extension. *The Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP), firstly pro-

posed by Van Laarhoven & Pedrycz (1983), takes advantage of the fuzzy set theory (Zadeh, 1965; Klir & Yuan, 1995) for adequately managing uncertainty often characterizing judgments expressed by experts. Kubler, Robert, Derigent, Voisin, & Le Traon (2016) present a wide review of many applications of FAHP. The authors analyse 190 papers published between the years 2004 and 2016 and classify them on the basis of their main features and application fields. According to the survey carried out by the authors, the FAHP is commonly used in the literature for calculating criteria weights and then it is combined with other MCDM methods, for instance FTOPSIS (Kutlu & Ekmekçioğlu, 2012; Büyüközkan & Çifçi, 2012), to rank the alternatives under evaluation.

In particular, FAHP may be well integrated with methods belonging to the *ELimination Et Choix Traduisant la RÉalité* (ELECTRE) family (Figueira J. R., Greco, Roy, & Slowinski, 2013). They support analysts in a wide range of decision problems (Muñoz-Porcar, Alonso-Nuez, Flores-García, & Duret-Solanas, 2015; Abedi, Torabi, Norouzi, & Hamzeh, 2012; Hatami-Marbini & Tavana, 2011; Hokkanen, Salminen, Rossi, & Ettala, 1995; Jun, Tian-tian, Yi-sheng, & Yu, 2014; Proulx, Rodriguez, Sérodes, & Bouchard, 2007) and enable to accomplish various kinds of results including selection of the best option, and ranking and clustering of alternatives. Examples of integration between FAHP and ELECTRE may be found in the literature. Kaya & Kahraman (2011) propose a combined FAHP-ELECTRE approach to evaluate the environmental impact in the context of urban industrial planning. Ka (2011) suggests the same combination to make decisions concerning the optimal selection among dry ports construction projects.

Among the different ELECTRE versions, the ELECTRE III effectively permits to rank alternatives related to different contexts (Certa, Enea, & Lupo, 2013b; Certa, Enea, Galante, & La Fata, 2009; La Scalia, Micale, Certa, & Enea, 2015). As

shown by Govindan & Jepsen (2016), ELECTRE III is the most used method of the ELECTRE family and the main fields of its application are natural resources and environmental management, energy management, and water management.

Dealing with the field of maintenance of water supply networks, the present research seeks to prioritize techniques of data processing to prevent and discover eventual damages or water losses occurring in buried pipes. Such evaluation is supported by means of an integrated MCDM approach. Actually, this paper is a substantial extension of a previous work (Carpitella, et al., 2017), in which the ELECTRE I method was proposed to select the best alternative belonging to a set of four GPR images resulting from the application of four different data processing techniques. Four crisp evaluation criteria were considered, namely visualization, interpretation, identification of features, and extraction of information. We are now interested in carrying out, in a fuzzy context, a further in-depth analysis of various data processing methods and in drawing up a ranking of resulting GPR images by considering a fifth evaluation criteria, namely the affordability of the analyses. To such aim, an integration process between the FAHP and the ELECTRE III methods is proposed. To the best of the authors' knowledge, it is the first time that such a hybrid approach is suggested to rank GPR images of WSSs with the aim of increasing the quality of maintenance management. Moreover, by analyzing the characteristics of various data processing techniques, we expect that a more reliable and accurate method may be selected as the best trade-off, since maintenance is crucial to guarantee a continuous functioning of systems. The FAHP reveals to be helpful to calculate criteria weights by effectively managing uncertainty of experts' opinions. In its turn, the ELECTRE III provides decision makers with a ranking of alternatives and, consequently, with a proper support to optimize maintenance of WSSs, taking also into account the uncertainty of data by means of the use of appropriate thresholds.

The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 illustrates some useful data processing techniques, aimed at elaborating on GPR images of WSSs. In particular, beyond the raw material analysis, the following techniques are considered: multi-agent based pre-processing algorithm, subtraction method and variance filter. Section 3 presents the proposal of integration between the two mentioned MCDM methods. The steps to apply the FAHP and the ELECTRE III methods are also described. Section 4 discusses a real case study in which GPR images obtained from the application of the above-mentioned data processing techniques are considered and then ranked. Section 5 closes the research with the conclusions.

4.3 Data processing techniques to handle GPR images from WSSs

This section aims to briefly describe some GPR image processing methods and how to apply them to handle GPR images obtained from surveys in WSSs. These results graphically represent critical parts (either hidden infrastructure or developed abnormalities, such as leaks) of the WSS under analysis and provide analysts with important information concerning scheduling of maintenance activities. The ranking of the obtained images is a helpful driver to choose the more suitable technique as a trade-off among different evaluation criteria.

The procedures used to carry out diverse data processing techniques are described next. In Carpitella et al. (2017) images coming from four data processing techniques were considered, namely, the raw material analysis (note that no processing is used here), the multi-agent based pre-processing algorithm, the subtraction method, and the variance filter. Their descriptions are here in summarized.

4.3.1 Raw images

This kind of analysis cannot be considered as a proper method. In fact, it works directly on data matrices obtained via GPR surveys. However, these analyses are

widely used to identify various features in the networks (Ocaña Levario, 2014), which have proved to be sometimes successful.

Raw images are sets of data obtained by means of GPR surveys, and visualized as radargrams. These data are stored in raw radargram matrices, MR_j , $j = 1, \dots, s$ corresponding to the performed measurements. These matrices are made up of m -vectors, $b_k^{(j)}$, where $k = 1, \dots, n$ denotes the trace of each radargram. Traces represent changes in depth of electromagnetic properties of the soil. In particular, matrices can be represented by columns, $MR_j = (b_1^{(j)}, b_2^{(j)}, \dots, b_n^{(j)})$. The length m of vector $b_k^{(j)}$ corresponds to the volume of registered data for each trace k . It depends on the characteristics of the signal emitted by the used equipment.

We can consider raw images as those obtained from a preliminary inspection, in which hyperbolae are mainly sought. Hyperbolae indicate the likely existence of objects or abnormalities in WSSs, suggesting the implementation of further and deeper analyses. We use analyses of raw images for comparison purposes, aiming at showing various difficulties of visualization when compared with images obtained from other methods.

4.3.2 Multi-agent-based pre-processing algorithm

This GPR image pre-processing algorithm was proposed in (Ayala-Cabrera, Ocaña-Levario, Pérez-García, Izquierdo, & Herrera, 2013c) and was termed agent race. The algorithm is based on the game theory and uses the multi-agent paradigm (Shoham & Leyton-Brown, 2009).

The input of this algorithm is the resulting radargram of the GPR prospection, which consists of an $m \times n$ -sized matrix. The n traces of length m generated are used as parallel tracks for the n agents to run. The race is an endurance test for the

competing agents, the prize for each agent being a movement step forward for each performed effort. Those efforts are based on wave amplitude value changes in each column of the radargram. The agent race includes two phases: a) warming-up, and b) competition. The race takes the following total time:

$$tt = tw + tr = m$$

equation 4.1

tw being the warming-up time and tr the competition time. The displacements of the agents during time tr are conditioned by the trend change of the wave amplitude on the trace that is being run. The race ends when time tt has elapsed, and the race winner is the agent who has obtained the largest displacement during this time.

The first output (Output A in Figure 4.1) of this process consists of an $m1 \times n$ matrix, $m1$ being the maximum number of displacements. The columns in this matrix describe the movement of the agents related to the competition. The movements obtained by the agents are called time lines. At the end of the race, time lines are sorted according to the time spent by each agent. Finally, these time lines are normalized, thus obtaining the second output (Output B in Figure 4.1), which is the final visualization matrix of this method.

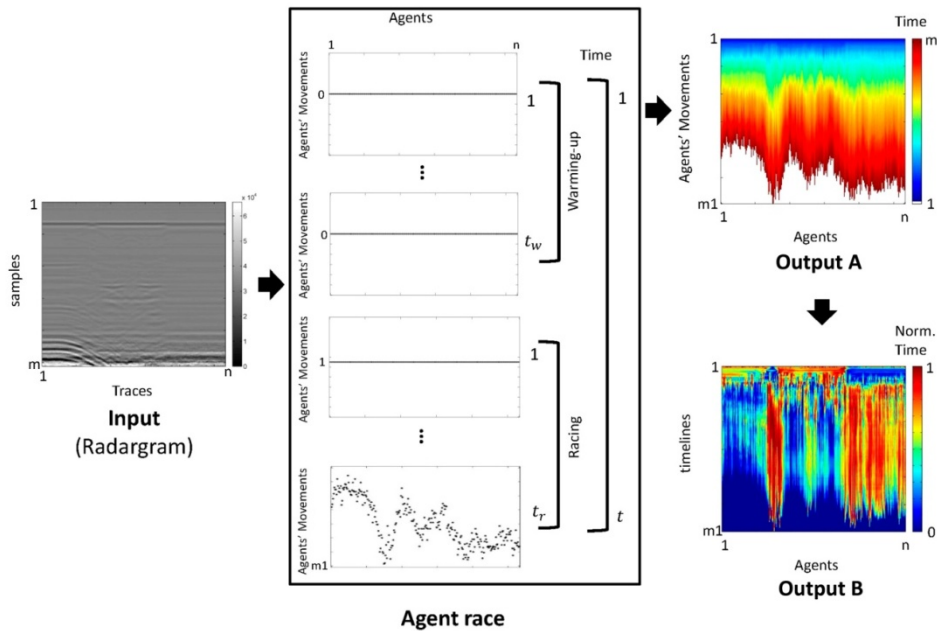


Figure 4.1 Scheme for the agent-race algorithm

4.3.3 Subtraction method

The strengths of this method are both its simplicity of use and its effectiveness in obtaining results. Its application consists in performing a subtraction between a reference image and a GPR image obtained upon inspection. This kind of subtraction is aimed at highlighting the main features of interest.

The input of this method (see Figure 4.2) is the raw image (raw matrix) obtained from the GPR survey, denoted by MR_j , previously described in section 4.3.1. Moreover, a new image (i.e. matrix) has to be created, that is called reference matrix or white matrix, MW . The calculation of this matrix is developed as follows. From the set of measurements, $\{MR_1, \dots, MR_s\}$, an average column vector of size m , called bc , is calculated:

$$bc = \frac{\sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^n b_k^{(j)}}{n \cdot s}$$

equation 4.2

Matrix MW is built by consecutively accumulating this vector n times. Matrix MC_j , called subtraction matrix, is calculated as:

$$MC_j = abs(MR_j - MW)$$

equation 4.3

The images obtained through these matrices are analysed in detail, to iteratively select a range of colour to highlight significant features in the images. The purpose consists in exploring information concerning certain system components and its boundary conditions (Ayala-Cabrera D. , Izquierdo, Ocana-Levario, & Perez-García, 2014b).

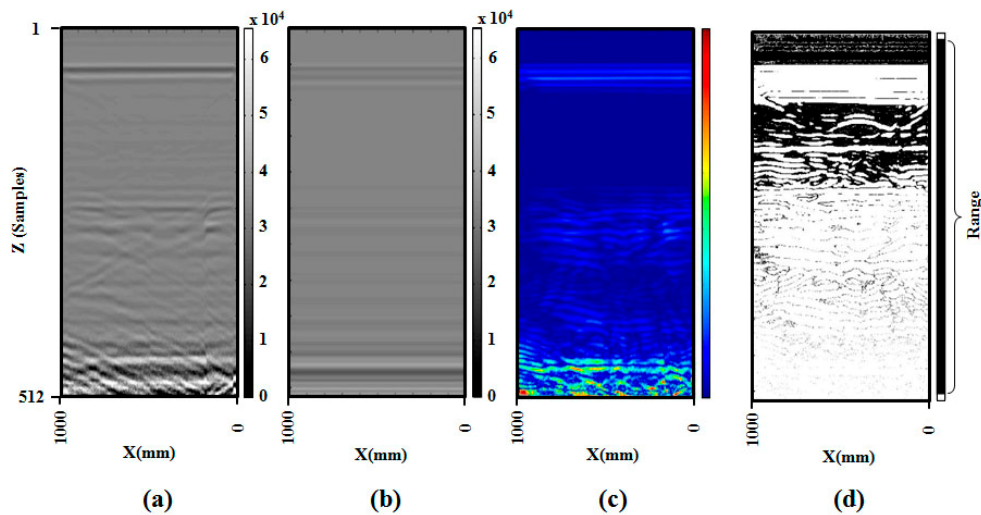


Figure 4.2 a) Raw image, MR_j matrix, (b) white matrix, MW , (c) subtraction matrix, MC_j , and (d) selection of color range for the subtraction matrix

4.3.4 Variance filter

The variance filter enables to demark boundaries among different materials existing in images, highlighting them and allowing a clearer visualization of changes. This helps in the location and posterior extraction of abnormalities.

A variance filter is directly applied to GPR images, and modifies the images according to data variability. The basic principle of the variance filter consists in calculating the variance around each pixel u_{ij} of the image. Firstly, the window size (number of pixels to work with) is defined. In our study, the proposed size of the window has been selected after several tests. The size results to be 3×1 , which is the best result with relation to the visualization of images. The variance filter formulation is defined by:

$$\bar{u}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{ij}$$

equation 4.4

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_{ij} - \bar{u}_{ij})^2$$

equation 4.5

The mean, defined by equation 4.4, is firstly estimated for the chosen window; n is herein the number of pixels in our window and u_{ij} is the pixel value of the GPR image. Secondly, the variance σ_{ij}^2 (equation 4.5) is calculated with the pixels inside the selected window and the value obtained in (equation 4.4). The result is associated to the centre pixel of the window in a new image, and this is repeated for all pixels of the initial GPR image, giving a new image of lower dimension.

4.4 Integration of MCDM methods to manage results of data processing analyses

In this section, a structured framework that combines two MCDM methods is proposed. Integration of these methods aims to prioritize different data processing techniques by ranking their relative outputs, i.e. resulting GPR images. The achieved solution offers effective support since it represents a valid tool to optimize the maintenance management of WSSs. Indeed, a highly reliable technique visually representing critical parts of the network can be easily selected and applied, depending on the involved evaluation criteria. The proposed approach is created through the integration of FAHP and ELECTRE III methods. In the present section these methods are described and successively applied to a real case study.

4.4.1 The FAHP technique

The fuzzy set theory represents a valid support to manage uncertainty affecting human judgments. Indeed, linguistic variables could be expressed through fuzzy numbers rather than crisp values, and have associated a degree of membership, $\mu(x)$, varying between 0 and 1. There are various types of fuzzy numbers. The most common ones are *triangular fuzzy numbers* (TFN) and *trapezoidal fuzzy numbers* (TrFN) (Zimmermann, 1985; Kubler, Robert, Derigent, Voisin, & Le Traon, 2016). A generic TFN (equation 4.6) \tilde{n} is defined by three numerical values, a , b and c , respectively called the lower, the medium and the upper value of the fuzzy number, where $a \leq b \leq c$. A generic TrFN (equation 4.7) \tilde{m} is defined by four numerical values, d , e , f and g , respectively called the lower, the two medium and the upper values of \tilde{m} ; here $d \leq e \leq f \leq g$:

$$\tilde{n} = (a, b, c)$$

equation 4.6

$$\tilde{m} = (d, e, f, g)$$

equation 4.7

Algebraic operations can be accomplished among fuzzy numbers. For instance, considering two TFNs \tilde{n}_1 and \tilde{n}_2 , the following operations (8-10) may be defined:

$$\tilde{n}_1 \oplus \tilde{n}_2 = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2)$$

equation 4.8

$$\tilde{n}_1 \odot \tilde{n}_2 = (a_1 \times a_2, b_1 \times b_2, c_1 \times c_2)$$

equation 4.9

$$\tilde{n}_1^{-1} = \left(\frac{1}{c_1}, \frac{1}{b_1}, \frac{1}{a_1} \right)$$

equation 4.10

Based on the use of fuzzy numbers, the FAHP method is the fuzzy development of the AHP technique, and its application can be summarized through these three following steps (Durán & Aguiló, 2006):

- building the hierarchy structure that represents the problem under analysis;
- collecting fuzzy pairwise comparisons with relation to decision alternatives with respect to each evaluation criterion;
- ranking alternatives to prioritize them or to select the best one.

Concerning the collection of fuzzy pairwise comparisons, the purpose is to build a *fuzzy pairwise comparison matrix* (FPCM), \tilde{X} . In this matrix, the linguistic judgments attributed by the expert(s) correspond to fuzzy numbers. For example, given a number n of criteria (or alternatives) to be pairwise compared, one can build the square reciprocal matrix:

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \cdots & \tilde{x}_{nn} \end{bmatrix}$$

equation 4.11

in which a generic element \tilde{x}_{ij} expresses the degree of preference of criterion (or alternative) i with respect to criterion (or alternative) j with a certain level of uncertainty. Moreover, reciprocity implies that for each pairwise comparison judgment $\tilde{x}_{ij} = x_1, x_2, x_3$ one has that $\tilde{x}_{ij} = \left(\frac{1}{x_3}, \frac{1}{x_2}, \frac{1}{x_1}\right)$.

As said before, linguistic variables are used by an analyst (or decision maker) to express pairwise comparisons about the relative importance between two elements. In particular, these variables refer to the fuzzy version of the Saaty scale, shown in Figure3, and can be stated as: equal (*EQ*), moderate (*M*), strong (*S*), very strong (*VS*) and extreme (*EX*) importance.

The associated TFNs are respectively: (1,1,2), (2,3,4), (4,5,6), (6,7,8) and (8,9,9). The TFNs (1,2,3), (3,4,5), (5,6,7) and (7,8,9) correspond to the intermediate values.

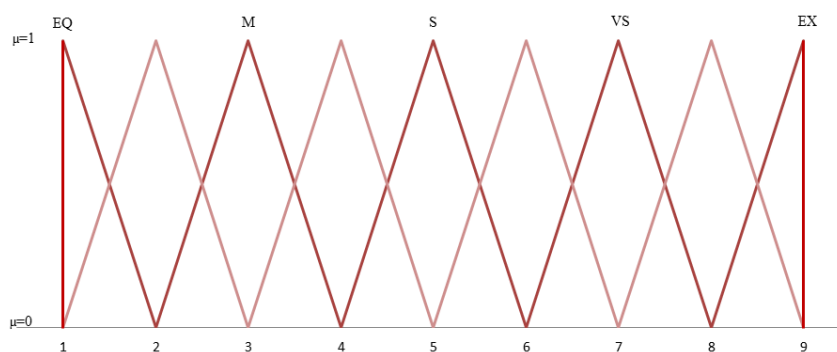


Figure 4.3 Fuzzy version of the Saaty scale

Once built the FPCM \tilde{X} , several approaches are proposed in the literature to obtain the relative weights. In particular, Chang (1996) proposes to derive crisp weights

from the matrix, by exploiting the extent analysis method. The value of fuzzy synthetic extent (equation 4.12) with relation to the *i*th element of the matrix \tilde{X} can be calculated as follows:

$$S_i = \sum_{j=1}^m \tilde{x}_{ij} \odot \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tilde{x}_{ij} \right]^{-1}$$

equation 4.12

being, in our case, $n = m$ since the FPCM \tilde{X} is a square matrix.

Let us consider two fuzzy pairwise comparisons, e.g. two TFNs noted as $\tilde{n}_1 = (a_1, b_1, c_1)$ and $\tilde{n}_2 = (a_2, b_2, c_2)$. We are interested in establishing the degree of possibility that $\tilde{n}_1 \geq \tilde{n}_2$, defined as (Kutlu & Ekmekçioğlu, 2012):

$$V(\tilde{n}_1 \geq \tilde{n}_2) = \mu(x^*) = \begin{cases} 1 & \text{if } b_1 \geq b_2 \\ 0 & \text{if } a_2 \geq c_1 \\ \frac{a_2 - c_1}{(b_1 - c_1) - (b_2 - a_2)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

equation 4.13

where x^* is the ordinate of the highest intersection point P between $\mu_{\tilde{n}_1}$ and $\mu_{\tilde{n}_2}$, as we can observe in Figure4. In order to compare the two TFNs \tilde{n}_1 and \tilde{n}_2 , it is necessary to calculate both values $V(\tilde{n}_1 \geq \tilde{n}_2)$ and $V(\tilde{n}_2 \geq \tilde{n}_1)$.

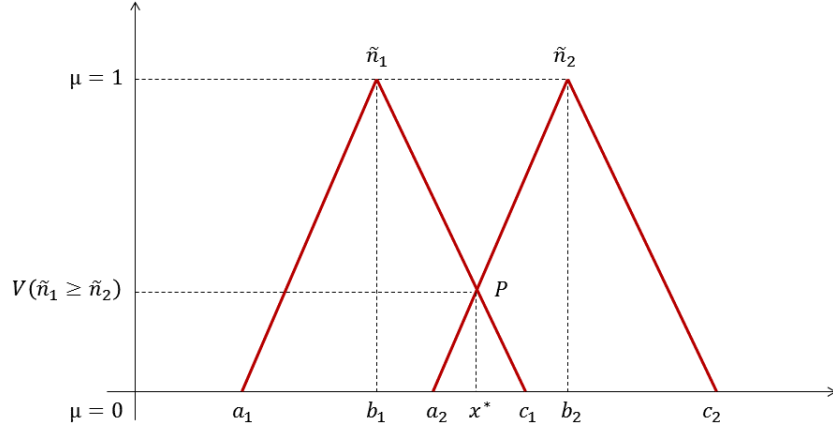


Figure 4.4 Representation of the degree of possibility that $\tilde{n}_1 \geq \tilde{n}_2$

Furthermore, the possibility degree that a fuzzy number \tilde{n} is greater than k fuzzy numbers $\tilde{n}_i (i = 1 \dots k)$ corresponds to:

$$\begin{aligned} V(\tilde{n} \geq \tilde{n}_1, \tilde{n}_2, \dots, \tilde{n}_k) &= V[(\tilde{n} \geq \tilde{n}_1) \text{ and } (\tilde{n} \geq \tilde{n}_2) \text{ and } \dots \text{ and } (\tilde{n} \geq \tilde{n}_k)] \\ &= \min V(\tilde{n} \geq \tilde{n}_i), i = 1 \dots k \end{aligned}$$

equation 4.14

Then, it is possible to link each criterion (or alternative) X_i considered in the FPCM \tilde{X} to the relative value of fuzzy synthetic extent and to define:

$$x^{*'}(X_i) = \min V(S_i \geq S_k)$$

equation 4.15

for $k = 1 \dots n, k \neq i$. The vector of crisp and not normalized weights is lastly given by:

$$W' = (x^{*'}(X_1), x^{*'}(X_2), \dots, x^{*'}(X_n))^T$$

equation 4.16

Let us observe that these obtained weights have to be normalized with respect to their total so that their sum equals one; the vector of normalized crisp weights will be:

$$W = (x^*(X_1), x^*(X_2), \dots, x^*(X_n))^T$$

equation 4.17

The last operation consists in checking the *consistency ratio* (CR) of the collected comparisons. To such an aim, each fuzzy value \tilde{x}_{ij} of the matrix is defuzzified and transformed into a crisp x_{ij} (equation 4.18) by means of the graded mean integration approach:

$$G(\tilde{x}_{ij}) = x_{ij} = \frac{x_1 + 4x_2 + x_3}{6}$$

equation 4.18

After having defuzzified each value of the matrix, consistency can be easily verified with the proper threshold (Saaty, 1977).

4.4.2 The ELECTRE III to rank results of data processing analyses

Originally born in France during the end of the 1960s (Roy, 1968), ELECTRE methods are fundamentally based on the so-called outranking approach (Roy, 1991), seeking to establish outranking relations by pairwise comparing alternatives. These relations need to be examined and confirmed by means of two tests, namely the concordance and the discordance tests, aimed at calculating the concordance and discordance indices. The concordance index C_{ij} quantitatively expresses, referring to a specific criterion, the agreement degree about the fact that alternative A_i outranks or equals alternative A_j . The discordance index D_{ij} quantitatively expresses, referring to a specific criterion, the agreement degree about the fact that

alternative A_i has a worst score compared to alternative A_j . Various versions of the ELECTRE methods have been proposed (Rogers, Bruen, & Maystre, 2013).

The ELECTRE III method is herein applied to rank different GPR images (i.e. alternatives) to effectively support the maintenance management of WSSs. This method considers a fuzzy outranking; it is neither expressed as a certain outranking nor as a certain non-outranking for each pair of compared alternatives. It has actually associated the function $\delta(A_i, A_j)$, varying into the range $[0,1]$, to express the degree of credibility related to the preference of alternative A_i with respect to alternative A_j . The ELECTRE III method requires the preliminary collection of the following input data: 1) set of alternatives, A_i , to be evaluated; 2) evaluation criteria, B_k ; 3) vector of criteria weights, w_k ; 4) numerical evaluation of alternatives with respect to the considered criteria, $u_k(A_i)$.

Moreover, three numerical thresholds (

Table 4.1) have to be fixed for each criterion. These thresholds enable to take into account data uncertainty affecting alternatives. They refer to the difference $u_k(A_j) - u_k(A_i)$, which is the difference between numerical evaluation of two alternatives A_i and A_j under the criterion B_k .

The condition $I_k \leq S_k \leq V_k$ has always to be verified. Once collected input data in a matrix and fixed the mentioned thresholds for all criteria, the development of the procedure is organized in two phases.

The 1st PHASE is made up of four steps explained next.

- Construction of the matrices $C_k(A_i, A_j)$ of concordance indices, one for each criterion. Concordance indices are determined by following the rules (equation 4.19, equation 4.20):

$$\text{if } u_k(A_i) \geq u_k(A_j), \text{ then } C_k(A_i, A_j) = 1 \quad \text{equation 4.19}$$

$$\text{if } u_k(A_i) < u_k(A_j), \text{ then } C_k(A_i, A_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_k(A_j) - u_k(A_i) \leq I_k \\ \frac{[u_k(A_i) + S_k - u_k(A_j)]}{S_k - I_k} & \text{if } I_k < u_k(A_j) - u_k(A_i) \leq S_k \\ 0 & \text{if } u_k(A_j) - u_k(A_i) > S_k \end{cases} \quad \text{equation 4.20}$$

Table 4.1 Thresholds of the ELECTRE III method

Symbol	Threshold	Meaning
I_k	Indifference	the minimal difference considered significant to express a preference between two alternatives;
S_k	Strong Preference	the minimal difference to express a strong preference between two alternatives;
V_k	Veto	if this minimal difference is overcome, the two alternatives are considered not comparable.

The output of the first step will be a number of square matrices equal to the number of criteria, and, in each matrix, the concordance indices $C_k(A_i, A_j)$ are obtained for each pairwise comparison.

- Construction of the aggregated concordance matrix $C(A_i, A_j)$.

The output of the second step will be a single square matrix $C(A_i, A_j)$ in which the elements are obtained by aggregating and weighting the relative elements belonging to the former matrices of concordance indices.

- Construction of the matrices $D_k(A_i, A_j)$ of discordance indices, one for each criterion. Discordance indices are determined by following the rules expressed by (equation 4.21):

$$D_k(A_i, A_j) = \begin{cases} 0 & \text{if } C_k(A_i, A_j) \neq 0 \\ \frac{[u_k(A_j) - u_k(A_i) - S_k]}{V_k - S_k} & \text{if } S_k \leq u_k(A_j) - u_k(A_i) < V_k \\ 1 & \text{if } u_k(A_j) - u_k(A_i) \geq V_k \end{cases}$$

equation 4.21

The output of the third step will be a number of square matrices equal to the number of criteria; in each matrix, the discordance indices $D_k(A_i, A_j)$ are obtained for each pairwise comparison.

- Construction of the outranking credibility matrix $\delta(A_i, A_j)$.

The last step of the 1st PHASE requires the calculation of the outranking credibility matrix, $\delta(A_i, A_j)$. The rules to build this matrix are the following (equation 4.22-equation 4.24):

$$\text{if } \forall k D_k(A_i, A_j) = 0, \text{ then } \delta(A_i, A_j) = C(A_i, A_j);$$

equation 4.22

$$\text{if } \exists k \text{ for which } D_k(A_i, A_j) > 0, \text{ then } \delta(A_i, A_j) = C(A_i, A_j) \text{ if } \forall k D_k(A_i, A_j) < C(A_i, A_j)$$

equation 4.23

$$\begin{aligned} & \text{if } \exists k^* \text{ for which } D_{k^*}(A_i, A_j) \geq C(A_i, A_j), \\ & \text{then } \delta(A_i, A_j) = C(A_i, A_j) \cdot \prod_{k^*} \frac{[1 - D_{k^*}(A_i, A_j)]}{[1 - C(A_i, A_j)]} \forall k^* \end{aligned}$$

equation 4.24

The output will be a square matrix in which elements express the degree of credibility related to the preference of the alternative A_i with respect to A_j .

Once the 1st PHASE is accomplished, the 2nd PHASE is composed of three steps.

- Determination of the minimal value of outranking credibility, δ_0 . The minimal value of outranking credibility corresponds to:

$$\delta_0 = \delta_{max} - s(\delta_{max})$$

equation 4.25

where δ_{max} is the maximum numerical value of the elements belonging to the outranking credibility matrix $\delta(A_i, A_j)$, and $s(\delta_{max})$, called discrimination threshold, is obtained by:

$$s(\delta_{max}) = -0.15 \cdot \delta_{max} + 0.3$$

equation 4.26

- Construction of the Boolean matrix $T(A_i, A_j)$. This Boolean matrix is built on the basis of the test (equation 4.27):

$$T(A_i, A_j) = \begin{cases} \mathbf{1} & \text{if } \delta(A_i, A_j) \geq \delta_0 \text{ and } \delta(A_i, A_j) - \delta(A_j, A_i) > s(\delta_{max}) \\ \mathbf{0} & \text{otherwise} \end{cases}$$

equation 4.27

The purpose is to define the qualification degree of the alternatives and build the ranking.

- Qualification degree of alternatives and construction of the final ranking.

The qualification of alternative A_i , $q(A_i)$, corresponds to the difference between the number of alternatives outranked by A_i and the number of alternatives outranking A_i . Finally, two rankings have to be built by means of two procedures of distillation (ascending and descending distillation chains), (Vincke, 1992), which consist in deleting the row and column from the outranking credibility related to the alternative characterized by the highest and lowest qualification degree, respectively, and in reiterating the 2nd PHASE until all the alternatives have been assigned in both rankings. With relation to the two procedures of distillation, if two alternatives are characterized by the same qualification degree, a distillation procedure would have to be carried out just for the two rows and columns related to the two alternatives of the outranking credibility matrix $\delta(A_i, A_j)$. To obtain a ranking of the entire alternative set, these two rankings must coincide. If they were not equal, it would mean that incomparability among alternatives occurs.

4.5 Case study

In Carpitella et al. (2017) the ELECTRE I method was applied to select the best alternative with relation to a set of four GPR images (HF_1 , HF_2 , HF_3 , HF_4), presented in Figure 4.2 and representing the outputs of the data processing techniques previously described in 4.3. The present case study aims to achieve the final ranking of the same alternatives, by considering one more evaluation criterion, namely the economic aspect in carrying out different data processing analyses.

Therefore, alternatives are now evaluated on the basis of five criteria (B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , B_5): visualization, interpretation, identification of features, extraction of information and affordability. All evaluation criteria have to be maximized and their weights are herein obtained by means of the FAHP technique, in order to better

manage uncertainty of evaluations. Upon the FAHP, the ELECTRE III is applied to rank the four GPR images.

4.5.1 The FAHP to calculate criteria weights

An expert in image mining processing analysis was asked to draw up a fuzzy pairwise comparison matrix (Table 4.2) for the criteria by attributing judgments using the linguistic variables defined in Figure 4.5.

Table 4.2 Fuzzy Pairwise Comparison Matrix

\tilde{X}	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	weights
B ₁	(1, 1, 2)	(1, 2, 3)	(3, 4, 5)	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)	0.2934
B ₂	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 1)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 1)	0.2226
B ₃	($\frac{1}{5}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$)	($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$)	(1, 1, 2)	(1, 2, 3)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 1)	0.1380
B ₄	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 1)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 1)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 1)	(1, 1, 2)	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 1)	0.1109
B ₅	($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 1)	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)	(1, 1, 2)	0.2351

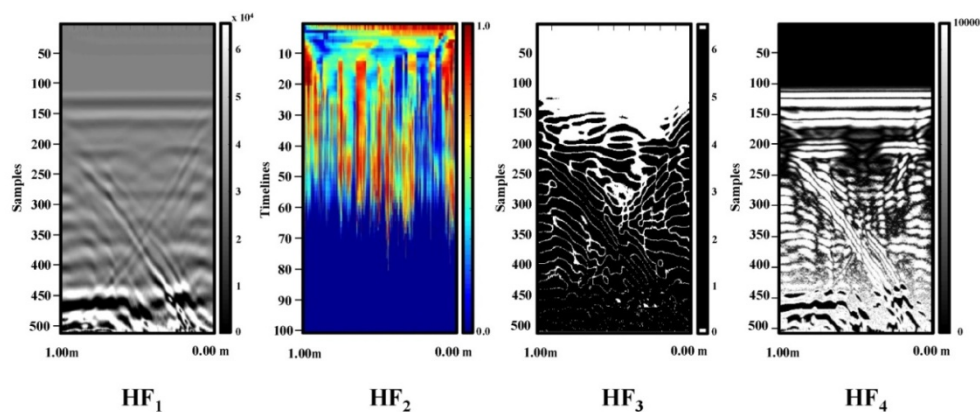


Figure 4.5 GPR images resulting from: raw image analysis (HF₁), multi-agent system (HF₂), subtraction method (HF₃), variance filter (HF₄)

The values of fuzzy synthetic extent for each criterion can be calculated by using equation 4.12:

$$S_1 = (7.00, 11.00, 16.00) \odot \left(\frac{1}{51.82}, \frac{1}{32.58}, \frac{1}{21.12} \right) = (0.14, 0.34, 0.76)$$

$$S_2 = (4.67, 7.00, 11.00) \odot \left(\frac{1}{51.82}, \frac{1}{32.58}, \frac{1}{21.12} \right) = (0.09, 0.21, 0.52)$$

$$S_3 = (2.78, 4.08, 6.83) \odot \left(\frac{1}{51.82}, \frac{1}{32.58}, \frac{1}{21.12} \right) = (0.05, 0.13, 0.32)$$

$$S_4 = (2.33, 3.00, 6.00) \odot \left(\frac{1}{51.82}, \frac{1}{32.58}, \frac{1}{21.12} \right) = (0.05, 0.09, 0.28)$$

$$S_5 = (4.33, 7.50, 12.00) \odot \left(\frac{1}{51.82}, \frac{1}{32.58}, \frac{1}{21.12} \right) = (0.08, 0.23, 0.57)$$

These values have to be compared and the relative degrees of possibility, summarized in Table 4.3, are calculated by means of equation 4.13.

Table 4.3 Degrees of possibility to compare values of fuzzy synthetic extent

$V(S_1 \geq S_2)$	1	$V(S_2 \geq S_1)$	0.7586	$V(S_3 \geq S_1)$	0.4704	$V(S_4 \geq S_1)$	0.3778	$V(S_5 \geq S_1)$	0.8013
$V(S_1 \geq S_3)$	1	$V(S_2 \geq S_3)$	1	$V(S_3 \geq S_2)$	0.7229	$V(S_4 \geq S_2)$	0.6126	$V(S_5 \geq S_2)$	1
$V(S_1 \geq S_4)$	1	$V(S_2 \geq S_4)$	1	$V(S_3 \geq S_4)$	1	$V(S_4 \geq S_3)$	0.8739	$V(S_5 \geq S_3)$	1
$V(S_1 \geq S_5)$	1	$V(S_2 \geq S_5)$	0.9661	$V(S_3 \geq S_5)$	0.6959	$V(S_4 \geq S_5)$	0.5922	$V(S_5 \geq S_4)$	1

The components of the non-normalized vector of weights

$$W' = \left(x^{*'}(B_1), x^{*'}(B_2), x^{*'}(B_3), x^{*'}(B_4), x^{*'}(B_5) \right)^T$$

are calculated through equation 4.15:

$$x^{*'}(B_1) = V(S_1 \geq S_2, S_3, S_4, S_5) = \min(1; 1; 1; 1) = 1;$$

$$x^{*'}(B_2) = V(S_2 \geq S_1, S_3, S_4, S_5) = \min(0.7586; 1; 1; 0.9661) = 0.7586;$$

$$x^{*'}(B_3) = V(S_3 \geq S_1, S_2, S_4, S_5) = \min(0.4704; 0.7229; 1; 0.6959) = 0.4704;$$

$$x^{*'}(B_4) = V(S_4 \geq S_1, S_2, S_3, S_5) = \min(0.3778; 0.6126; 0.8739; 0.5922) = 0.3778;$$

$$x^{*'}(B_5) = V(S_5 \geq S_1, S_2, S_3, S_4) = \min(0.8013; 1; 1; 1) = 0.8013.$$

The obtained normalized vector of weights is given in Table 4.2.

$$W = (0.2934, 0.2226, 0.1380, 0.1109, 0.2351)^T$$

The last step consists in verifying consistency upon having defuzzified the FPCM by means of the graded mean integration approach (equation 4.20). In our case, consistency is perfectly acceptable, being the CR index equal to 0.0639.

4.5.2 The ELECTRE III to rank alternatives

Beyond criteria weights, the input data required to apply the ELECTRE III methodology were collected with the support of the expert mentioned in the former section and are given in Table 4.4. The scale of evaluations of alternatives under the various criteria is one-to-ten. Figure 4.6 and Figure 4.7, summarize the whole application of the ELECTRE III method.

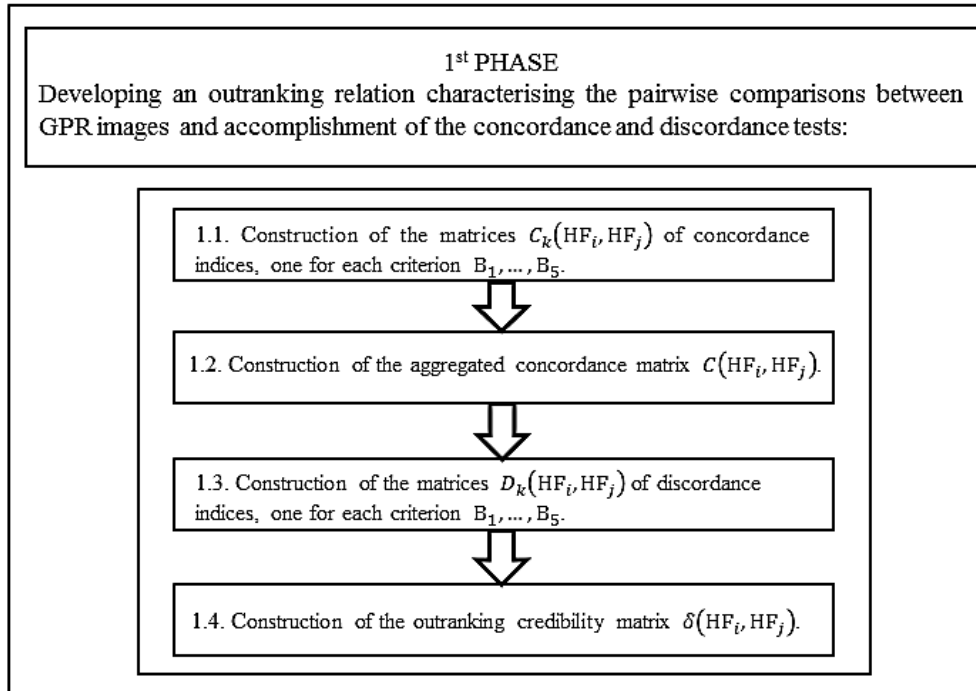


Figure 4.6 Flowchart representing the application of the first phase of ELECTRE III

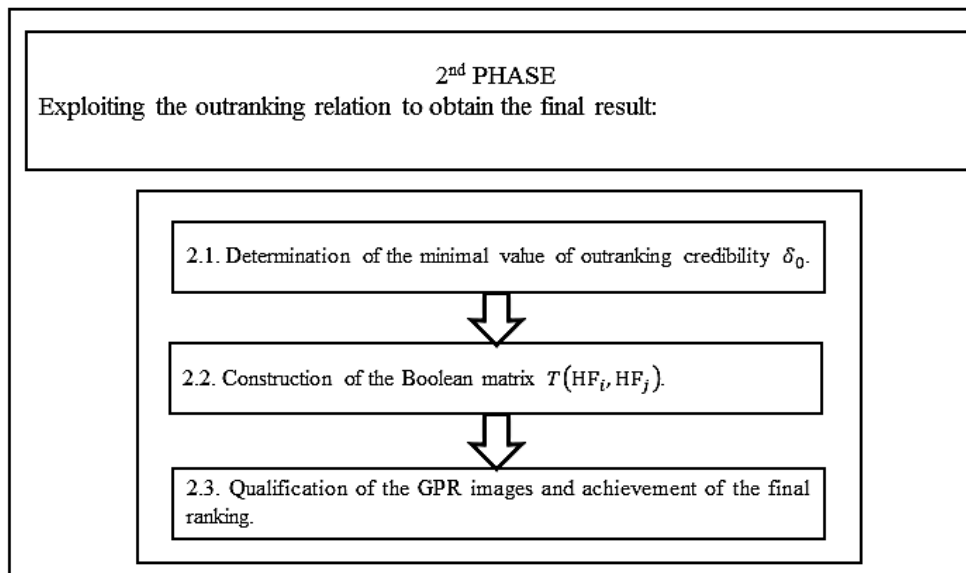


Figure 4.7 Flowchart representing the application of the second phase of ELECTRE III

Table 4.4 Input data of the ELECTRE III

	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
weights	0.2934	0.2226	0.1380	0.1109	0.2351
$I_k - S_k - V_k$	2-4-6	1-3-5	1-2-3	1-2-3	1-3-5
HF ₁	3	2	6	5	8
HF ₂	8	5	7	8	4
HF ₃	7	7	9	5	6
HF ₄	8	7	8	5	6

The output (Table 4.5) of the 1st PHASE of the ELECTRE III is the outranking credibility matrix $\delta(HF_i, HF_j)$, which enables to calculate the minimal value of outranking credibility, that is $\delta_0=0.85$, with the purpose of building the Boolean matrix $T(HF_i, HF_j)$.

The last step of the 2nd PHASE consists of determining the qualification of alternatives $q(HF_i)$ for the final ranking to be built. These results are reported in Table 4.6. Since the two distillation procedures (

Table 4.7 and Table 4.8) do not give the same ranking, sub-distillation between HF₁ and HF₂ is necessary. Thus, the final ranking is reported in Table 4.9. Both alternatives HF₃ and HF₄ occupy the first position of the ranking. It means that there is not a significant difference among them. Then, under the perspective of the considered criteria, the application of the subtraction method or of the variance filter is indifferent for supporting and optimizing maintenance activities of WSSs

Table 4.5 Outranking credibility matrix

$\delta(HF_i, HF_j)$	HF ₁	HF ₂	HF ₃	HF ₄
HF ₁	-	0	0	0
HF ₂	0,7649	-	0,63315	0,77155
HF ₃	0,88245	0	-	1
HF ₄	0,88245	0	1	-

Table 4.6 Qualification of alternatives

Alternatives	$q(HF_i)$
HF ₁	-2
HF ₂	0
HF ₃	1
HF ₄	1

Table 4.7 Ascending distillation results

Alternatives	Position
HF ₂ , HF ₃ , HF ₄	1°
HF ₁	2°

Table 4.8 Descending distillation results

Alternatives	Position
HF ₃ , HF ₄	1°

HF ₂	2°
HF ₁	3°

Table 4.9 Final ranking

Alternatives	Position
HF ₃ , HF ₄	1 st
HF ₂	2 nd
HF ₁	3 rd

4.6 Conclusions

The paper proposes a structured framework based on the combination of two MCDM methods, namely the FAHP and the ELECTRE III, to provide support in selecting the most suitable data processing technique to explore WSS underground and thus help to improve the maintenance management of WSSs. This kind of management can be effectively led by using GPR radargrams as non-destructive technique drivers of critical parts of the networks. The purpose of the research consists in analysing, using a multi-criteria perspective, GPR images obtained from diverse types of data processing analyses.

On the theoretical point of view, being the combination of two MCDM methods a well-established and reliable practice, it can be significant to give a positive contribution in a crucial practical field as the one considered in the paper, also considering uncertainty characterizing human evaluation. On the practical point of view, data processing techniques based on the use of GPR are really useful in providing a graphic overview of the state of buried pipes and components. Since they are often

critical for the good operation of WSSs, the role of maintenance is fundamental and the organization of suitable interventions is strategic.

To this aim, upon having established a set of evaluation criteria, the proposed approach makes firstly use of the FAHP technique to determine criteria weights by taking into account and thus reducing uncertainty of human judgments. Additionally, it is suggested the use of ELECTRE III, which is considered as the most reliable in literature among the methods belonging to the ELECTRE family. Actually, the ranking of GPR radargrams evaluated through ELECTRE III provides interesting information concerning which data processing method is more suitable to optimize the maintenance management of WSSs.

The proposed structured approach has been applied to a real case study, whose alternatives have been derived from four kinds of data processing analyses, namely, raw image analysis, multi-agent system, subtraction method and variance filter. Five evaluation criteria are aimed at considering these analyses both under the technical and the economic point of view. The two most suitable alternatives, both in the first position of the final ranking, are the GPR images reached by the variance filter and the subtraction methods. This ranking demonstrates that the application of the variance filter or the subtraction method equivalently represents the best trade-off among the considered criteria.

The present paper is an extension of a previous research (Carpitella, et al., 2017), in which the ELECTRE I method was applied to select the best alternative (all that this method permits), which resulted to be the image obtained through the variance filter. Moreover, in Carpitella et al. (2017) the weights were merely attributed by the expert. Now, by means of the application of the FAHP we asked the expert to attribute judgments about the importance between pairs of criteria and considered a

wider set of criteria by taking into consideration the presence of uncertainty. As a result, another solution, namely the subtraction method, may be considered as the most suitable, as shown in Table 4.9.

Even more accurate and meaningful results can be achieved by adequately combining different methods of data processing analysis. Indeed, such integration would permit to exploit strengths of different analyses and to sharpen the process of abnormality location in WSSs.

Possible developments of this research will consider the application of other different GPR techniques and the elaboration of a detailed scheduling of maintenance activities on the basis of a further integration between the already proposed MCDM approach and a multi-objective optimization point of view.

4.7 Acknowledgements

Part of this work has been developed under the support of the UPV mobility program for PhD students, awarded to the first author, and of Fundación Carolina PhD, within its short stage scholarship program awarded to the second author.

Capítulo 5

Discusión

5.1 Discusión

En este capítulo se presenta un análisis de los resultados obtenidos con la intención de destacar los aspectos más relevantes del presente trabajo doctoral. En primer lugar, se incluye una discusión general donde se señalan los resultados más generales; posteriormente, presentamos la discusión particular de los resultados obtenidos en los artículos presentados en los diferentes capítulos.

5.1.1 *Discusión General*

El objetivo principal de este trabajo doctoral es la evaluación de las posibilidades del GPR como técnica no destructiva para identificar y localizar fugas de agua en los componentes de un WSS.

En este contexto, se muestran, en primer lugar, las ventajas asociadas al uso del GPR.

- Fundamentalmente, el GPR es una NDT; esto significa que permite realizar prospecciones sin causar alteraciones al medio, ni a la infraestructura de los sistemas enterrados, y tampoco a las estructuras circundantes correspondientes a otros servicios (agua, gas, teléfono, fibra, etc.). El hecho de que el GPR permita obtener información de las estructuras presentes en el subsuelo (en nuestro caso un WSS) y de sus posibles fallos, sin ser necesario realizar una excavación o movimiento de tierras, hace del GPR una herramienta de gran interés para los gestores de los WSSs.
- Además de ser un método de rápida y fácil aplicación, produce imágenes del subsuelo poco profundo con características que no se logran con ninguna otra NDT, sin perjuicio de que puedan obtenerse sinergias de interés con otras técnicas NDT.
- Permite detectar en tiempo real componentes (tuberías y fugas, fundamentalmente) de los WSSs, y tiene una alta precisión en la detección y ubicación de tales componentes, siendo, generalmente, más rápido que otras NDTs.

Pasemos ahora a los inconvenientes.

- Uno de los mayores inconvenientes de esta técnica, a pesar de sus grandes bondades, viene dada por la dificultad de visualización de los componentes de los WSSs en las imágenes de GPR sin procesar, siendo necesaria la interpretación por parte de personal experto. Esta dificultad de visualización se atribuye a las características electromagnéticas propias de los materiales que están presentes en el subsuelo. Es decir, si se encuentra un material altamente con-

ductivo, como un metal, este se verá reflejado con gran intensidad en la imagen del GPR sin procesar; por el contrario, si es un material poco conductivo (PVC o PE) difícilmente será identificado. De la misma manera sucede con el tipo de material del suelo. De acuerdo con esto, los WSSs están delimitados por sus características constructivas y por los materiales utilizados, lo que beneficia este tipo de estudio, ya que, de alguna manera, restringimos los problemas que se puedan presentar en campo.

- Otro problema que causa una deficiente visualización en las imágenes de GPR sin procesar es el ruido excesivo causado por la presencia de señales externas (radio, móviles), materiales altamente conductivos cercanos al área prospectada, diafonía en la antena, ruido moteado, entre otros. Estas interferencias ocultan y causan deformación en las señales de los objetos de interés contenidos en las imágenes, lo cual dificulta su identificación y, muchas veces, da lugar a interpretaciones erróneas.
- Otro inconveniente que presenta el GPR es la limitación que tiene en cuanto a la profundidad de prospección. Las antenas de frecuencias bajas (20-250 MHz) alcanzan mayores profundidades, mostrando objetos de gran tamaño. Por el contrario, las antenas de frecuencias altas tienen menor alcance de penetración, pero permiten detectar objetos de menor tamaño. Por esta razón, las antenas de frecuencias altas son ampliamente utilizadas en los WSSs, ya que estos servicios no se encuentran a profundidades muy grandes.

Dados los inconvenientes que presentan las imágenes de GPR en bruto, este trabajo se ha centrado en realizar mejoras en el tratamiento de estas imágenes, a través del desarrollo de metodologías y algoritmos de tratamiento que permitan mejorar la visualización de las imágenes, para así favorecer la adecuada interpretación, identificación y ubicación de anomalías en los WSSs, de una manera sencilla y fácil de usar y entender para personal no experto en el tratamiento de datos de GPR.

En este sentido, mostramos la eficiencia del GPR para localizar fugas en el sistema y la posibilidad que brinda para realizar el seguimiento de la fuga en el tiempo. Sin embargo, como mencionamos anteriormente, los radargramas (imágenes de GPR en bruto) no son fácilmente interpretables, por lo cual mostramos las metodologías de pre procesamiento aplicadas para destacar las características de la fuga en la imagen.

5.2 Discusión del capítulo 2

En el capítulo 2 de este documento mostramos el artículo “*3D model evolution of a leak based on GPR image interpretation*” en el cual hemos expuesto de manera clara que, a través de las interpretaciones de las imágenes de GPR procesadas, es posible obtener modelaciones 3D de las fugas y, a partir de dichas modelaciones, obtener conocimientos fiables que favorecen la comprensión del fenómeno de tales pérdidas de agua.

En primer lugar, debemos indicar que, al ser un trabajo elaborado en laboratorio bajo condiciones controladas, los resultados claramente no son completamente realistas y, atendiendo a la tipología de la fuga simulada (orificio circular de 2 mm), tampoco será un caso de los más comunes en campo. Sin embargo, a pesar de todos los inconvenientes, este ensayo permite obtener un conocimiento generalizado del comportamiento de una fuga en un WSS. Queda claro que es necesario rea-

lizar ensayos de laboratorio bajo otras condiciones más realistas, así como también realizar ensayos en campo donde sea posible involucrar otros factores que en laboratorio no se presentan.

En este caso, se hizo uso del algoritmo de pre procesamiento propuesto por Ayala-Cabrera D., Izquierdo, Montalvo, & Pérez-García (2013a). El algoritmo está basado en la teoría de juegos, y utiliza el llamado paradigma multi-agente. Específicamente, el proceso se simula mediante una carrera entre agentes. Este algoritmo permite identificar, en imágenes pre procesadas, formas elípticas pertenecientes a una tubería plástica enterrada sin agua de una forma sencilla, directa y rápida mediante imágenes transversales a la tubería. Adicionalmente, cuando la tubería tiene agua, las elipses toman mayor intensidad. Pero cuando la fuga empieza a hacerse notable, las formas pierden su configuración y es complicado diferenciar entre la tubería y la zona de la fuga. Sin embargo, aún es posible, aunque proclive a subjetividad. Desde esta perspectiva, este procesamiento resulta interesante ya que aporta información más allá del estudio inicial de las hipérbolas en el que se basan algunos trabajos (Dou, Wei, Magee, & Cohn, 2016; Maas & Schmalzl, 2013; Chandra, Rajiv, & Rao, 2019; Shkvyrya, 2010).

Otra dificultad que se presenta en estas imágenes es la identificación de la tubería en su sentido longitudinal, con y sin agua. Aun así, la fuga es fácilmente detectable. Sin embargo, debido a la naturaleza del algoritmo, la imagen no es tan sencilla de interpretar si no se tiene una orientación previa por parte de un experto, ya que, de acuerdo a las características intrínsecas de la imagen (colores y formas), se puede malinterpretar y así confundir formas que aparecen de las que no se sabe con certeza si pertenecen a la fuga o a la tubería. Pese a ello, se puede destacar que este pre-procesamiento permite identificar y extraer contornos de la zona húmeda provocada por la fuga con los que es viable recrear las etapas evolutivas de la fuga a través

de modelaciones 3D. Así, aunque los contornos obtenidos no son exactos, ofrecen una idea aproximada del comportamiento y el alcance de una fuga en el subsuelo.

5.3 Discusión del capítulo 3

El capítulo 3 presenta el artículo “*GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters*”. Este artículo propone un pre procesamiento basado en parámetros estadísticos de segundo orden denominado filtrado de varianza, que favorece ampliamente (mejor que otros pre procesamientos que hemos estudiado) la visualización de los componentes del sistema bajo condiciones de fuga.

Este método permite obtener una imagen en la cual es posible acentuar las características morfológicas correspondientes a la tubería, con agua, sin agua y con fuga, de una manera intuitiva. Así, este filtro permite obtener una visualización clara de las formas contenidas en las imágenes procesadas, ya que demarca muy notoriamente los contornos de las diferentes condiciones que se presentan. Principalmente, con este filtro, es posible identificar y visualizar una tubería de un corte longitudinal que en investigaciones anteriores no era fácilmente detectable (análisis de imágenes en bruto o bien con otros algoritmos), de una manera sumamente sencilla, con presencia de agua o sin ella. Además, estas imágenes presentan el beneficio de identificar las zonas de la fuga fácilmente, ya que son demarcadas en las imágenes con tonos intensos (negros) lo que los hace notorios e identificables para personal no experto en el análisis de datos de GPR.

Por otra parte, una vez identificadas las formas correspondientes a cada elemento del WSS (tubería, fuga, etc.), fue posible extraer los contornos y recrear la volumetría, tanto la relativa a la tubería como la afectada por el agua fugada. Esta situación es más difícil de realizar con la metodología MABS, por la complejidad de la

misma imagen. Sin embargo, a pesar de las bondades del filtro de varianza, consideramos que este filtro podría mejorarse significativamente si se aplica un método que permita clasificar los datos según las diferentes características presentes en la imagen (tubería, zona de la fuga y material circundante).

En relación a los modelos 3D obtenidos con ambas metodologías, se observa la significativa diferencia que presentan en la dispersión y alcance la fuga; hay que observar, sin embargo, que una representación 3D adecuada dependerá totalmente de la interpretación correcta y de las formas encontradas en las imágenes GPR.

Por otra parte, se considera que las prospecciones con GPR realizadas en el laboratorio, bajo condiciones controladas, aunque no representan resultados definitivos, porque son resultados apoyados en simulaciones y no completamente realistas, sí son de gran ayuda y permiten avanzar en el conocimiento y posterior análisis de las respuestas obtenidas con el GPR en entornos controlados, lo que sirve como pauta para la comparación y análisis de resultados de futuros trabajos en campo.

5.4 Discusión del capítulo 4

El capítulo 4 contiene el artículo “*A hybrid multi-criteria approach to GPR image mining applied to water supply system maintenance*”. Este artículo, a través de un caso de estudio concreto, centrado en un conjunto de cuatro imágenes GPR correspondientes a resultados de diferentes técnicas de procesamiento de datos, trata de demostrar la utilidad del enfoque híbrido de técnicas de análisis de selección múltiple propuesto.

Tomar decisiones no suele ser un proceso fácil y menos cuando intervienen múltiples alternativas que involucran un conjunto de criterios de decisión que, con frecuencia, entran en conflicto unos con otros. Es entonces cuando es necesario recu-

rrir a herramientas que faciliten el proceso de decisión. A este respecto, para realizar la selección del proceso de tratamiento de imágenes más adecuado bajo ciertos criterios específicos, se hizo uso de dos técnicas de MCDM, el FAHP y el ELECTRE III, que, en combinación, permitieron obtener resultados realmente favorecedores. En particular, las imágenes GPR se clasifican según la evaluación de cinco criterios, a saber, visualización, interpretación, identificación de características, extracción de información y asequibilidad, que son clave para la calidad de la información proporcionada por las imágenes de GPR. Los resultados ofrecen un apoyo estructurado en la selección de las técnicas de procesamiento de datos más adecuadas para exploraciones GPR en los WSSs. En el caso presentado, dos opciones, a saber, el filtro de varianza y los métodos de resta, ofrecen los mejores resultados.

En relación a lo anteriormente expuesto, la combinación de estas metodologías permite clasificar y ordenar los diferentes procesos utilizados de una manera óptima y objetiva. De esta manera, es viable seleccionar el pre proceso más adecuado sin la intervención directa de un operador. Sin embargo, se considera que, para obtener una mayor validez en cuanto a la selección, es necesario recurrir a la opinión de más expertos para enriquecer el análisis. Asimismo, también sería de interés incluir otros criterios de evaluación que permitan realizar un análisis robusto que favorezca seleccionar el método que mejor se ajuste a cada caso de estudio. En todo caso, con la metodología mostrada se abre un camino que demuestra gran adaptabilidad a otros planteamientos semejantes.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas con la realización de este trabajo y se proponen algunas líneas de investigación futuras que pueden servir de apoyo hacia la mejora de las herramientas utilizadas y, también, dar continuidad al trabajo desarrollado.

Actualmente el problema de la escasez de agua va en alarmante aumento. Ante esta situación, gestionar los recursos hídricos de una manera inteligente es imprescindible. Desde esta premisa, este trabajo se ha centrado en aportar herramientas que coadyuven a realizar una administración inteligente del agua potable en los WSSs. Un problema desafiante que afecta ampliamente a estos sistemas son las fugas de agua. Primeramente, porque no son fáciles de detectar. Esto viene dado por el tipo de instalación de sus componentes que suele ser enterrada, lo cual complica la identificación temprana de la fuga, que solo es notable cuando ya está demasiado

desarrollada y ha provocado daños circundantes, además de pérdidas cuantiosas de agua potable y, a su vez, altas pérdidas económicas.

Por este motivo, este trabajo se enfoca en evaluar la viabilidad de aplicar herramientas que favorezcan la localización de fugas en los componentes de los WSSs haciendo uso de técnicas de inspección no destructivas. Actualmente existen numerosas técnicas no destructivas que favorecen la investigación del subsuelo sin causar alteraciones al medio y, al mismo tiempo, permiten obtener vasta información del mismo. En teoría, esto debería beneficiar la toma de decisiones relacionadas con las acciones técnicas a realizar sobre los sistemas, para mitigar las fugas. Sin embargo, dista mucho de ser así: el gran volumen de información que generan y la dificultad de interpretar estos datos merman considerablemente su eficacia.

En esta tesis hemos utilizado el GPR como técnica no destructiva ya que permite obtener información del subsuelo a través de imágenes de GPR (radargramas) permitiendo identificar los componentes y las posibles anomalías (fugas de agua) presentes en los WSSs. Comúnmente, los componentes en los WSS están compuestos de diversos materiales que van desde el hierro fundido hasta los materiales plásticos. Esta técnica permite obtener una detección clara y eficiente de componentes metálicos, aunque también de los no metálicos (PE, PVC, etc.), a pesar de la dificultad que representa identificar y localizar estos componentes no metálicos. Esto potencia el uso del GPR en este tipo de estudios.

Contrario a estos beneficios, el GPR presenta la dificultad de visualizar fácil y claramente los componentes (tuberías, fugas, etc.) de una red dentro de una imagen sin procesar, por lo que es necesario aplicar métodos de procesamiento de imágenes que permitan mejorar la calidad de las mismas. Esto, en general, precisa de la intervención de personal experto para obtener una interpretación adecuada. Otro

problema presente en este tipo de imágenes es el ruido provocado por señales externas. Estos problemas impiden una visualización clara de los objetos o anomalías contenidos en las imágenes, y esto complica la identificación y el análisis, dando lugar a interpretaciones incorrectas.

Ante esta problemática, en este trabajo doctoral propusimos la aplicación de metodologías de procesamiento de datos y de toma de decisión que favorezcan una clara y sencilla interpretación de los datos que, a su vez, permita localizar e identificar en las imágenes de GPR formas concernientes a las áreas afectadas por el agua de una fuga y con las cuales posteriormente sea posible recrear la fuga en un modelo 3D para su mejor comprensión. Mostramos, a continuación, las diferentes conclusiones a las que se llegó en cada paso realizado.

6.2 Conclusiones

En primer lugar, mostramos las conclusiones obtenidas tras haber realizado los ensayos en laboratorio. A continuación, las ventajas y desventajas de usar el GPR como método de inspección en los WSSs. Posteriormente, se presentan las conclusiones adquiridas tras aplicar los dos principales métodos de procesamiento aplicados (sistemas multi-agente y filtro de varianza). Finalmente, mostramos las conclusiones adquiridas tras someter los métodos de procesamiento aplicados a un análisis mediante métodos MCDM para seleccionar la opción más viable.

6.2.1 Ensayos en laboratorio

En primer lugar, para llevar a cabo este trabajo, fue necesaria la realización de ensayos en laboratorio para obtener las imágenes de GPR que son el punto de partida de nuestra investigación.

Cabe destacar que fue una sola configuración la utilizada, pero se tomaron muestras en diferentes tiempos y bajo una amplia variedad de condiciones. En el ensayo

más relevante se planteó simular una fuga común presente en un WSSs. En este ensayo se utilizó un cajón relleno de material de suelo seco, del común utilizado para el relleno de las excavaciones en la instalación de componentes (tuberías, codos, conexiones, etc.) de los WSSs. Además, se colocó una tubería de PVC con una perforación no mayor a 2 mm que simuló una rotura en la tubería. Una vez colocados los componentes, se procedió a la toma de muestras (imágenes de GPR). Se realizaron tres grupos de muestreos diferentes: (1) sobre material seco, sin agua en la tubería, por lo tanto, sin fuga; (2) inyectando agua a la tubería y dejando que circulara mientras se realizaban los muestreos; y (3) sobre material ya afectado por la fuga de agua.

Una vez realizados los ensayos, de ello podemos destacar que:

- Los ensayos en laboratorio nunca van a representar la realidad absoluta de un fenómeno estudiado, a menos que se cuente con las condiciones exactas con las que se presentaría en la realidad. Debemos resaltar que los ensayos realizados en laboratorio fueron simulados bajo condiciones lo más parecidas a un caso real, lo cual ha permitido obtener un conocimiento tangible sobre su comportamiento y la distribución del agua a través del subsuelo.
- El conocimiento obtenido ha sido beneficioso para el desarrollo de este trabajo, permitiendo incrementar el conocimiento del comportamiento de las fugas. No obstante, consideramos la necesidad de realizar más ensayos, bajo diferentes condiciones, que permitan enriquecer el conocimiento del fenómeno bajo diferentes escenarios (rotura transversal, toma clandestina, etc.).
- A pesar del esfuerzo realizado por asimilar las condiciones de los ensayos en el laboratorio a la realidad, proponemos la realización de ensayos también en campo, bajo condiciones reales en las cuales se involucren otros

factores que en laboratorio no puedan ser tomados en cuenta o bien pueden pasar desapercibidos.

- Finalmente, debemos resaltar que el realizar ensayos en laboratorio sirve como conocimiento previo, que allana el camino hacia el conocimiento real del comportamiento de una fuga en campo. Creemos que, con seguridad, apoyados en este conocimiento adquirido, podemos ser capaces de dar soluciones reales y aplicables a casos completamente reales.

6.2.2 El GPR como método de inspección

Una consideración a destacar del desarrollo de este trabajo es que es viable recurrir a los métodos de inspección no destructivos para localizar activos de los WSSs. En el presente estudio seleccionamos el GPR porque:

- Consideramos el GPR como una muy técnica muy adecuada para localizar servicios enterrados. En este trabajo queda ampliamente demostrado que el GPR es una herramienta efectiva, rápida y útil para obtener información imperceptible a la vista de un fenómeno presente en el subsuelo. En nuestro caso, específicamente, información referente a problemáticas presentes en los WSSs.
- El GPR permite evaluar y monitorear el estado de la infraestructura del WSS. Permite así prevenir fallos y detectar daños en etapas tempranas, favoreciendo actuaciones inmediatas para resolverlos. Además, permite inferir la vida útil de las estructuras y realizar acciones puntuales encaminadas a mantenerlas funcionales.
- Permite localizar activos enterrados de un WSS que con otras metodologías no son fácilmente detectables, sobre todo si los materiales son plásticos. El tipo de material de los componentes del sistema en sí mismo no es un

problema para el GPR, ya que es capaz de identificar tuberías de materiales metálicos como plásticos.

- Otra cuestión de importancia en el uso del GPR es el tipo de material del suelo, ya que, dependiendo de sus características electromagnéticas, las condiciones serán más o menos favorecedoras para su correcto funcionamiento. Por ejemplo, en suelos con gran cantidad de material arcilloso la señal emitida por el GPR se ve afectada de manera tal que la señal es atenuada en gran medida, imposibilitando la visualización de algún objeto en los registros. A este respecto, esto no debe ser un problema para los WSSs, porque en la construcción e instalación de estos sistemas normalmente se prescinde de este tipo de material.
- Además, el GPR ha mostrado habilidad para obtener información valiosa sobre la posible existencia de una fuga en el sistema y su ubicación exacta, así como la dispersión del agua en el terreno circundante. En este aspecto, cuando el suelo contiene agua puede disminuir la potencia de la señal emitida por el GPR, haciendo que la señal se atenúe cada vez más, cuanto más saturado esté el suelo. Esta condición, más que perjudicar, favorece la detección de agua en las imágenes de GPR, ya que se presenta una deformación que suele distinguirse notablemente en la imagen.
- No obstante, queda claro que visualizar e identificar componentes o fugas por medio de imágenes de GPR sin procesar es una tarea realmente complicada y requiere un alto nivel de experiencia y habilidad por parte del operador para realizar una interpretación adecuada y realista. Aun así, estas interpretaciones pueden caer en la subjetividad del experto, mermando el potencial del GPR.

Teniendo en cuenta estos puntos, en este trabajo se propone el uso de metodologías de procesamiento de datos que permitan mejorar la calidad de la imagen y faciliten

la identificación de componentes del WSS. Por esta razón, aunque se han probado otros, se propuso la aplicación de dos procesos diferentes, la metodología basada en sistemas multi-agente y el filtro de varianza.

6.2.3 Metodología basada en sistemas multi-agente

Esta metodología fue propuesta por Ayala-Cabrera (2011a), con el objetivo de facilitar la interpretación de las imágenes a personal no altamente capacitado en el uso y manejo de los datos del GPR, proporcionando muy buenos resultados y, por tanto, sirviendo como referente en este tipo de estudios. En este documento hacemos uso de esta metodología con el fin de evaluar la herramienta para localizar fugas de agua y recrear los escenarios de dispersión de la misma. Esta herramienta la utilizamos en el artículo “*3D model evolution of a leak based on GPR image interpretation*” publicado en *Water Science & Technology: Water Supply* en 2015. De esta herramienta podemos concluir:

- Permite obtener resultados realmente buenos y muy visuales, lo que con otros métodos no había sido posible. Aunque las imágenes obtenidas a simple vista resultan algo abstractas, favorecen considerablemente la visualización de los componentes del sistema. De esta manera, fue posible observar claramente delimitadas las zonas húmedas en las imágenes, lo que permitió posteriormente obtener contornos del área húmeda. Cabe destacar que estos contornos sirven para el desarrollo de estudios más complejos.
- En relación a la facilidad de identificar formas (contornos), es importante señalar que sobre los perfiles transversales a la tubería es posible identificar formas elípticas que corresponden con la ubicación de la tubería; además, estas formas son más notables cuando la tubería contiene agua en su interior, haciéndose más intensas en color. Por otra parte, cuando la imagen va reflejando la fuga se presenta un fraccionamiento de la hipérbo-

la y cuanto mayor es la cantidad de agua fugada mayor es el tamaño de la hipérbola y el fraccionamiento, mostrando una hipérbola dentro de otra, de tal forma que resulta complejo identificar cuál forma corresponde al agua fugada y cuál a la tubería. Concerniente a los perfiles longitudinales a la tubería, la identificación es más sencilla, ya que, cuando comienza a hacerse notable la fuga en la imagen, esta se presenta como una elipse que aumenta su tamaño conforme se propaga. Lo que resulta complicado en estos perfiles es identificar la tubería en su sentido longitudinal.

- Asimismo, estos contornos nos permiten determinar volúmenes del suelo húmedo y el cambio de volumen a lo largo del tiempo, a través de recreaciones en modelos 3D. Adicionalmente, esto permite conocer el alcance de la fuga y, con ello, evaluar la edad de la misma y las posibles afecciones que puede provocar a futuro. Esto posibilita el desarrollo de herramientas futuras que permitan clasificar las fugas según su severidad, para su posterior reparación.
- Además, favorece la generación de modelos más precisos en términos de reproducción o detección de fugas, y también da un paso adelante para un posible proceso automático en el futuro.
- Hace viable la generación de modelos 3D con los contornos identificados que, si bien presentan cierta deformación y no son precisos, permiten obtener aproximaciones al volumen real afectado por el agua, además de ser fácilmente interpretados por personal que no está altamente calificado en el uso de GPR, mejorando la comprensión del fenómeno.
- Finalmente, es importante señalar que la metodología aplicada es sencilla y brinda la capacidad de ser repetible, y puede servir como base para crear modelos teóricos de dispersión en condiciones menos controladas.

En general, esta metodología permite obtener resultados realmente buenos, ya que facilita la identificación y extracción de características de una fuga que no es posible en una imagen sin pre procesar. Sin embargo, tras el desarrollo de este trabajo se hizo evidente que el análisis e interpretación sobre este tipo de imágenes resultan más complejos de lo esperado para personal no experto en el manejo de datos de GPR, principalmente, si la fuga que se busca recrear no representa un volumen de gran alcance; en este caso, es posible que pase desapercibida en la imagen, debido a la composición de la misma, la variabilidad de sus colores y sus formas que las caracteriza.

6.2.4 Metodología basada en el filtrado de varianza.

Esta metodología es presentada en el artículo “*GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters*” publicado en *Journal of Applied Geophysics* en 2018. Se presenta con la intención de demostrar que con herramientas simples y de fácil acceso es posible resolver el problema de la visualización sencilla y claramente.

Lo destacable de esta metodología es:

- Primeramente, la metodología basada en el filtro de varianza facilita considerablemente la visualización de características que no se reflejan en las imágenes de GPR en bruto, facilitando así el trabajo de interpretación para personal no altamente calificado en el manejo de datos de GPR. Además, esta técnica es sencilla y fácil de aplicar.
- Permite obtener imágenes que muestran los contrastes entre las constantes dieléctricas de los diferentes materiales contenidos en la imagen (tubería, suelo seco y suelo húmedo).

- Favorece la ubicación con precisión de la fuga, y también la extracción de contornos correspondientes a la zona húmeda causada por el agua fugada. Al mismo tiempo que la fuga, es posible ubicar fácilmente la tubería, algo que con otros procesamientos no resulta tan sencillo. sino que genera confusión.
- Una bondad destacable de este método es que con esta herramienta es posible identificar los bordes externos (superior e inferior) de la tubería en su sentido longitudinal. Esto favorece ampliamente el desarrollo de investigaciones posteriores para estimar el diámetro de la tubería e identificar el cambio del mismo en un tramo de tubería.
- Con esta información, es viable crear modelos 3D para ayudar a visualizar y comprender el fenómeno de una fuga y cómo se distribuye en el suelo. Esto es importante como un primer paso hacia el conocimiento real del comportamiento de una fuga.
- De la comparación realizada entre las dos metodologías, se concluye que ambos métodos son eficientes, fáciles de aplicar y permiten identificar y extraer características de las fugas y otros elementos de los WSSs. Sin embargo, el método multi-agente presenta una dificultad inherente debido a la composición de la imagen y el color, que puede causar confusión y conclusiones equivocadas.
- En relación a los modelos 3D obtenidos con ambas metodologías podemos destacar que, aunque los volúmenes de la fuga representados son muy similares, no muestran la misma dispersión y alcance, lo que hace necesario que se realicen más ensayos que permitan validar los modelos 3D con la realidad.
- Finalmente, consideramos que los contornos obtenidos en este proceso pueden servir como base para el entrenamiento de sistemas inteligentes de

clasificación de datos que faciliten la detección automática de contornos y, además, permitan generar modelos que faciliten la comprensión de las fugas en los WSSs.

6.2.5 Toma de decisión mediante métodos multicriterio

Dado que la selección del proceso de tratamiento al que se someten las imágenes de GPR depende de la elección personal del ingeniero, nace la inquietud de realizar un análisis comparativo de los diferentes procesos que han sido utilizados por los investigadores en trabajos anteriores, con el fin de seleccionar de una manera menos subjetiva el proceso que mejor se adapte. En este sentido, presentamos el artículo “*A hybrid multi-criteria approach to GPR image mining applied to water supply system maintenance*” publicado en *Journal Applied Geophysics* en 2018. Entonces, concluimos:

- Los métodos FAHP y ELECTRE III, permiten resolver efectivamente la problemática de elegir, de entre varias alternativas, la o las diferentes técnicas de procesamiento de imágenes aplicadas a los radargramas que permitan mitigar la subjetividad de las elecciones humanas.
- Los métodos MCDM elegidos son herramientas que favorecen una selección confiable, libre de sesgos y subjetividad, permitiendo elegir la opción que más beneficie una gestión eficiente en lo referente a los WSSs, proporcionando a los gestores información más completa y real sobre el estado de la infraestructura subterránea.
- Tras realizar el análisis planteado, se obtuvo que, de entre las opciones sugeridas, las opciones son igualmente viables, siendo las más apropiadas, en este caso, el filtro de varianza y el método de sustracción. Esta aplicación muestra estas dos técnicas como la mejor compensación entre los criterios considerados y la opinión experta.

6.3 Desarrollos futuros.

Con el desarrollo de este trabajo surgen líneas de investigación interesantes, con el fin de ayudar y facilitar a los gestores de los WSSs a tomar decisiones adecuadas basadas en estudios realistas que servirán como punto de partida en dirección hacia el desarrollo de sistemas inteligentes para la gestión de los WSSs. En este sentido, enumeramos:

- Desarrollar algoritmos de identificación y extracción automática de patrones que sirvan como base para alimentar sistemas de clasificación que ayuden a identificar de forma sencilla en una imagen de GPR las tuberías de una red y sus problemas (fugas, tomas clandestinas, etc.).
- Crear herramientas novedosas apoyadas en algoritmos inteligentes que permitan crear modelos de visualización 3D en tiempo real que sirvan de apoyo para identificar de manera visual el problema de las fugas en los WSSs, y que, adicionalmente, permitan dar soluciones prácticas a los problemas de mantenimiento de activos y de gestión fugas de estos sistemas.
- Desarrollar estudios de campo y/o laboratorio en los cuales se analicen diferentes morfologías de roturas en tubería, con los cuales sea posible evaluar la viabilidad de identificar la forma y longitud de las roturas, utilizando imágenes de GPR, con el propósito de valorar las razones que las provocaron y tomar acciones apropiadas que permitan dar soluciones eficaces al problema.
- Aplicar herramientas matemáticas que permitan calcular los diámetros de las tuberías de los WSSs a través del uso de imágenes de GPR procesadas con el filtro de varianza, además de utilizar los perfiles en los que se refleja la tubería longitudinalmente en lugar de utilizar la estimación basada en la típica hipérbola.

- Desarrollar una herramienta que permita obtener interpretaciones automáticas de las imágenes de GPR, que favorezca la identificación de tuberías de los WSSs, así como de las fugas de agua.
- Desarrollar estudios donde se analice el alcance y desarrollo de una fuga en diferente tipo de suelos, con la intención de crear modelos de dispersión que favorezcan el conocimiento tangible de la propagación del agua a través del subsuelo, que, además, beneficie otras áreas de estudio, por ejemplo, en la agricultura para determinar el riego efectivo en el cultivo, y así evitar gasto de agua innecesario.
- Realizar ensayos en campo haciendo uso conjunto de NDTs basadas en hardware (p. ej. termografía infrarroja, técnicas de emisión acústica, gas trazador, entre otras). La hibridación de estas tecnologías podría resultar en una herramienta potente para el control de fugas. Todavía más robusto sería apoyarse, además, en NDTs basadas en software, las cuales podrían permitir tener un control integral de la red, desde los caudales y presiones circulantes en los WSSs, hasta la posibilidad de identificar, localizar puntualmente y contabilizar el agua fugada.
- Desarrollar ensayos en campo sobre suelos saturados con el fin de evaluar la capacidad del GPR para identificar activos y problemas presentes en los WSSs.
- Ya que se han obtenido respuestas válidas del estudio realizado para la selección de la mejor metodología de procesamiento de imágenes a partir de métodos MCDM, proponemos realizar esquemas de toma de decisión adicionales; por ejemplo, involucrando una variedad más amplia de criterios a evaluar para enriquecer el estudio; además, resultaría de interés considerar un mayor número de expertos que puedan emitir juicios más variados y, con esto, mejorar la objetividad de la selección; finalmente, también pro-

ponemos implementar otros métodos MCDM que permitan validaciones más robustas.

Contribuciones propias

Artículos

- Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., Pérez-García, R., & **Ocaña-Levario, S. J.** (2013). Dynamic Management of water supply systems: a tool to build scenarios by merging GPR surveys and augmented reality. *Water Utility Journal EWRA*, 6, 3-8.
- Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Pérez-García, R., & **Ocaña-Levario, S. J.** (2014). Probabilistic maps for buried pipes location based on GPR images. *International Journal of Complex Systems in Science*, 4(1), 27-30.
- Ayala-Cabrera, D., **Ocaña-Levario, S. J.**, Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2014). Improving Water Supply System Components Visualization into GPR Images. Athens: ATINER'S Conference Paper Series, No: WAT2014-1154.
- Ayala-Cabrera, D., **Ocaña-Levario, S. J.**, Izquierdo, I., & Pérez-García, R. (2016). 3D Representation of (Buried) Water Supply Elements using Pre-Processed GPR Images. *Athens Journal of Technology & Engineering*, 3(3), 241-254.
- Carpitella, S., **Ocaña-Levario, S. J.**, Benítez, J., Certa, A., Enea, M., & Izquierdo, J. (2018). A hybrid multi-criteria approach to GPR image mining applied to water supply system maintenance. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 754-764.

Ocaña-Levario, S. J., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2015). 3D model evolution of a leak based on GPR image interpretations. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15.6, 1312-1319.

Ocaña-Levario, S. J., Carreño-Alvarado, E. P., Ayala-Cabrera, D., & Izquierdo, J. (2018). GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters. *Journal of Applied Geophysics*, 152, 236-247

Capítulos de libro:

Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Carreño-Alvarado, E. P., **Ocaña-Levario, S. J.**, & Campbell, E. (2014). Multi-agent and clustering in data analysis of GPR images. En J. C. Cortés, L. Jódar Sánchez, & R. J. Villanueva, *Mathematical Modeling in Social Sciences and Engineering* (págs. 241-251). Hauppauge, NY,: Nova Science Publishers.

Congresos:

Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., Pérez-García, R., & **Ocaña-Levario, S. J.** (2013). Dynamic management of water supply systems: a tool to build scenarios by merging GPR surveys and augmented reality. 8th International Conference of EWRA "Water Resources Management in an Interdisciplinary and Changing Context". Porto, Portugal, 26-29 June.

Ayala-Cabrera, D., **Ocaña-Levario, S. J.**, Izquierdo, J., Pérez-García, R., & Herrera, M. (2013). Analysis of GPR data through interpretation of pre-processed images obtained by a multi-agent approach to identify pipes in water supply systems. . Decimosexto Congreso Internacional de la Asociación Catalana de Inteligencia Artificial (CCIA 2013). Vic, Barcelona, Spain, 23-25 October .

Ayala-Cabrera, D., **Ocaña-Levario, S. J.**, Pérez-García, R., Izquierdo, I., & Herrera, M. (2013). Georadar y realidad aumentada: una aproximación a la visualización automática del trazado y las características de las tuberías en los sistemas de abastecimiento de agua. XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje. Buenos Aires, Argentina, 11-15 noviembre.

Ayala-Cabrera, D., **Ocaña-Levario, S. J.**, Pérez-García, R., Izquierdo, J., & Herrera, M. (2013). Visualización de fugas de agua en sistemas de

- abastecimiento de agua mediante imágenes de GPR. . XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje. . Buenos Aires, Argentina, 11-15 noviembre.
- Ayala-Cabrera, D., Campbell, D., **Ocaña-Levario, S. J.**, Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2014). Reconstrucción 3D de tuberías a partir de mediciones de GPR. 17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. La Habana, Cuba, 24-28 Noviembre.
- Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., **Ocaña-Levario, S. J.**, & Pérez-García, R. (2014). 3D model construction of water supply system pipes based on GPR images. Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Modelling and Software., San Diego, California, USA, June 15-19.
- Carpitella, S., **Ocaña-Levario, S. J.**, Benítez, J., Certa, A., Enea, M., & Izquierdo, J. (2017). The ELECTRE I method to optimise GPR data processing analyses for maintenance of water networks. 23rd ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design (RQD 2017), August 3-5. Chicago, Illinois, USA.
- Ocaña-Levario, S. J.**, Ayala-Cabrera, D., & Izquierdo, J. (2017). Análisis comparativo de métodos de extracción de patrones en imágenes de GPR para la localización de fugas de agua. Congress on Numerical Methods in Engineering (CMN2017), SEMNI, July 3-5. Valencia, Spain.
- Ocaña-Levario, S. J.**, Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2016). Análisis de imágenes de georadar para la localización de fugas mediante la aplicación de filtros de varianza. XII Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería, 5-7 Septiembre. Lérida, Spain.
- Ocaña-Levario, S. J.**, Ayala-Cabrera, D., Pérez-García, R., Izquierdo, J., & Herrera, M. (2013). Reconocimiento de patrones para la localización y caracterización de elementos plásticos de los sistemas de abastecimiento de agua mediante GPR. XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje. Buenos Aires, Argentina, 11-15 noviembre.

Referencias

- Abedi, M., Torabi, S. A., Norouzi, G. H., & Hamzeh, M. (2012). ELECTRE III: A knowledge-driven method for integration of geophysical data with geological and geochemical data in mineral prospectivity mapping. *Journal of Applied Geophysics* 87, 9–18.
- Adedeji, K. B., Hamam, Y., Abe, B. T., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017). Towards Achieving a Reliable Leakage Detection and Localization Algorithm for Application in Water Piping Networks: An Overview. in *IEEE Access*, vol. 5, 20272-20285, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2752802.
- Ahadi, M., & Bakhtiar, S. M. (2010). Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to Acoustic Emission signals. *Applied Acoustics*, Volume 71, Issue 7, 634-639, ISSN 0003-682X, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.02.006>.
- Albarrán Tirado, L. E. (2019). *Evaluación de los sistemas de abastecimiento de agua potable de la localidad de Shirac, San Marcos-Cajamarca. Propuesta de mejora*. Cajamarca-Perú.
- Alonso Guzmán, C. D. (2010). *Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación de tuberías para sistemas de abastecimiento de agua: Aplicación a la ciudad de Celaya, Gto. (México)*. Valencia, Spain: UPV.
- AL-Qurishee, M., Wu, W., Atolagbe, B., El Said, S., & Ghasemi, A. (2019). Non-Destructive Test Application in Civil Infrastructure. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 6(12), 2092-2114 e-ISSN: 2395-0056.

- AL-Washali, T. M., Elkhider, M. E., Sharma, S. K., & Kennedy, M. D. (2020). A review of nonrevenue water assessment software tools. *WIREs Water*. 2020 , 7:e1413. <https://doi.org/10.1002/wat2.1413>.
- Amran, T. S., Ismail, M. P., Ahmad, M. R., Amin, M. S., Ismail, M. A., Sani, s., . . . Basri, N. S. (2018). Monitoring underground water leakage pattern by ground penetrating radar (GPR) using 800 MHz antenna frequency. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 298 012002. Selangor, Malaysia.
- Aşchilean, I., Badea, G., Giurca, I., Naghiu, G., & Iloaie, F. G. (2017). Choosing the Optimal Technology to Rehabilitate the Pipes in Water Distribution Systems Using the AHP Method. *Energy Procedia*, 112, 19–26.
- Asensio Avellanas, A. (2016). *Localización y reparación de escapes de agua en tuberías sin obras*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Aslam, H., Manreet, K., Maruf, M., Yehia, S., & Ali, T. (2018). Detection of Leaks in Water Distribution System using Non-Destructive Techniques. *Conference: 8th International Conference on Future Environment and EnergyAt: Phuket, Thailand*. Phuket, Thailand.
- Atef, A., Zayed, T., Hawari, A., Khader, M., & Moselhi, O. (2016). Multi-tier method using infrared photography and GPR to detect and locate water leaks. *Automation in Construction* 61, 162-170.
- Ayala Cabrera, D. (2015). *Characterization of components of water supply systems from GPR images and tools of intelligent data analysis*. Valencia, Spain: UPV.
- Ayala-Cabrera, D., Campbell, E., Carreño-Alvarado, E. P., Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2014). Water leakage evolution based on GPR interpretations. *Procedia Engineering* 89, 304-310.
- Ayala-Cabrera, D., Campbell, E., Carreño-Alvarado, E., Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2014a). Water leakage evolution based on GPR interpretations. *Procedia Engineering* 89, 304-310.
- Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2011b). Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images. *Journal of Applied Geophysics* 75 (4), 679-686.
- Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., Ocaña-Levario, S. J., & Pérez-García, R. (2013b). GPR-based water leaks models in water distribution systems. *Sensors* 13(12), 15912-15936.
- Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Montalvo, I., & Pérez-García, R. (2011a). Towards the visualization of water supply system components with GPR images. *Mathematical and Computer Modelling*. 54(7-8), 1818-1822. doi:10.1016/j.mcm.2010.12.045.

- Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Montalvo, I., & Pérez-García, R. (2013a). Water supply system component evaluation from GPR radargrams using a multi-agent approach. *Mathematical and Computer Modelling* 57 (7-8), 1927-1932.
- Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Ocaña-Levario, S. J., & Perez-García, R. (2014b). 3D Model Construction of Water Supply System Pipes Based on GPR Images. *Proc. of 7th International Congress on Environmental Modelling and Software*. San Diego, CA, USA.
- Ayala-Cabrera, D., Ocaña-Levario, S. J., Pérez-García, R., Izquierdo, J., & Herrera, M. (2013c). Visualización de fugas de agua en sistemas de abastecimiento de agua mediante imágenes de GPR. *Proceedings of XII Simposio Iberoamericano sobre Abastecimiento de Agua y Drenaje Urbano (SEREA 2013)*. Buenos Aires, Argentina.
- Ballester, M., Brown, E., Jouravlev, A., Küffner, U., & Zegarra Méndez, E. (2005). *Administración del agua en América Latina: situación actual y perspectivas Serie Recursos Naturales e Infraestructura No.9077*.
- Belotti, V., Dell'Acqua, F., & Gamba, P. (2002). Denoising and hyperbola recognition in GPR data. *Proc. SPIE 4541, VII Image and Signal Processing for Remote Sensing*. Toulouse, France.
- Bimpas, M., Amditis, A., & Uzunoglu, N. (2010). Detection of water leaks in supply pipes using continuous wave sensor operating at 2.45 GHz. *Journal of Applied Geophysics*, 70, 226-236.
- Biskup, K., Arias, P., & Lorenzo, H. (2005). APLICABILIDAD DEL RADAR DE SUBSUELO PARA EL ESTUDIO DE LA ZONA NO SATURADA DEL SUELO: EJEMPLOS EN AMBIENTES ARENOSOS COSTEROS. En F. S. González, *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol.VII*. (págs. 197-204).
- Brennan, M. J., Joseph, P. F., Muggleton, J. M., & Gao, Y. (2008). Some Recent Research Results on the use of Acoustic Methods to Detect Water Leaks in Buried Plastic Water Pipes. *Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton*, 1-7.
- Brito-Schimmel, P., & Carreras, C. (2010). Metodología para la prospección geofísica en arqueología: apuntes a partir de los trabajos de Iesso, Can Tacó, Molins Nous y el Goleró. *Lucentum XXIX* 29, 9-22.
- Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, M. T., Scherzer, A., Tramberend, S., . . . Wiberg, D. (2016). *Water Futures and Solution - Fast Track Initiative (Final Report)*. IIASA, Laxenburg, Austria, iiasa13008: IIASA, WP-16-006.

- Busquet, E., Casas, A., Pinto, Y., Ribero, L., & Sabadía, J. B. (1996). Geofísica ambiental técnicas no destructivas para el reconocimiento de zonas contaminadas por vertidos. *Acta Geologica Hispanica*, 73-82.
- Büyüközkan, G., & Çifçi, G. (2012). A combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS based strategic analysis of electronic service quality in healthcare industry. *Expert Systems with Applications*, 39 (3), 2341–2354.
- Büyüközkan, G., Çifçi, G., & Güleriyüz, S. (2011). Strategic analysis of healthcare service quality using fuzzy AHP methodology. *Expert Systems with Applications*, 38 (8) , 9407–9424.
- Carpitella, S., Ocana-Levario, S. J., Benítez, J., Certa, A., Enea, M., & Izquierdo, J. (2017). The ELECTRE I method to optimise GPR data processing analyses for maintenance of water networks. *Proceedings of 23th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design*. Chicago, Illinois: USA.
- Carreño-Alvarado, E. P., & Reynoso-Meza, G. (2020). Water Leak Detection by Thermographic Image Analysis, In Laboratory Tests. .
- Cataldo, A., Persico, R., Leucci, G., de Benedetto, E., Cannazza, G., Matera, L., & de Giorgi, L. (2014). Time domain reflectometry, ground penetrating radar and electrical resistivity tomography: A comparative analysis of alternative approaches for leak detection in underground pipes. *NDT & E International* 62, 14-28.
- Catapano, I., Affinito, A., Bertolla, L., Porsani, J., & Soldovieri, F. (2014). Oil spill monitoring via microwave tomography enhanced GPR surveys. *Journal of Applied Geophysics*. 108, 10.1016/j.jappgeo.2014.06.017. .
- Certa, A., Enea, M., & Lupo, T. (2013b). ELECTRE III to dynamically support the decision maker about the periodic replacements configurations for a multi-component system. *Decision Support System* , 55 (1), 126–134.
- Certa, A., Enea, M., Galante, G., & La Fata, C. M. (2009). Multi-objective human resources allocation in R&D projects planning. *International Journal of Production Research* 47 (13) , 3503–3523.
- Certa, A., Enea, M., Galante, G., & Lupo, T. (2013a). A multi-decision makers approach to select the maintenance plan for a multi-component system. *Proceeding of 19 th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design*. Honolulu, Hawaii, USA.
- Chan, T. K., Chin, C. S., & Zhong, X. (2018). Review of Current Technologies and Proposed Intelligent Methodologies for Water Distributed Network Leakage Detection . *IEEE Access*, vol. 6, , 78846-78867, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2885444.

- Chandra, G. R., Rajiv, K., & Rao, B. B. (2019). Detecting Radius of Pipe in GPR Images and Comparing with 3D Synthetic Data. *2019 Fifth International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, (págs. 7-10, doi: 10.1109/ICIIP47207.2019.8985761.). Shimla, India.
- Chang, D. -Y. (1996). Application of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95, 649–655.
- Charlton, M. B., & Mulligan, M. (2001). Efficient detection of mains water leaks using ground penetrating radar / Subsurface and Sensing Technologies and Applications III of SPIE. *Proc. SPIE 4491 The International Society for Optical Engineering* (págs. 375-386). San Diego, CA: SPIE, USA.
- Chen, S. -M., Wu, Y. -M., & Yang, L. (2014). Application of the Analytic Hierarchy Process for the selection of wastewater reuse targets. *Management Decision*, 52 (7), 1222–1235.
- Crocco, L., Soldovieri, F., Millington, T., & Cassidy, N. J. (2010). Bistatic tomographic GPR imaging for incipient pipeline leakage evaluation. *Progress In Electromagnetics Research* 101, 307-321.
- Cruz Machacuay, J. (2019). *Propuesta para la aplicación de los principios de la gobernanza del agua de la organización para la cooperación y el desarrollo económicos (OCDE). Estudio de caso: planta de tratamiento de aguas residuales de la localidad de Lunahuaná-provincia de Cañete*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.
- De Brito, M. M., & Evers, M. (2016). Multi-criteria decision-making for flood risk management: A survey of the current state of the art . *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 1019–1033.
- De Coster, A., Pérez Medina, J. L., Nottebaere, M., Alkhalifeh, K., Neyt, X., Vanderdonckt, J., & Lambot, S. (2019). Towards an improvement of GPR-based detection of pipes and leaks in water distribution networks. *Journal of Applied Geophysics* 162 , 138–151.
- Demirci, S., Yigit, E., Eskidmir, I. H., & Ozdemir, C. (2012). Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method. *NDT & E International* 47, 35-42.
- Dong, L., Carnalla, S., & Shinozuka, M. (2011). Experimental and analytical study of detecting leakage of water pipes using ground-penetrating radar. *Proceedings of the 9th International workshop on remote sensing for disaster response*. Stanford, California, USA.
- Dong, L., Carnalla, S., & Shinozuka, M. (2012). GPR survey for pipe leakage detection: experimental and analytical study. *Proc. SPIE 8347, Nondestructive*

Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security. San Diego, California USA.

- Dou, Q., Wei, L., Magee, D. R., & Cohn, A. G. (2016). Real-time hyperbola recognition and fitting in GPR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(1), 51-62.
- Dourojeanni, A., & Jouraviev, A. (2001). Siete lecciones de la experiencia de Chile en materia de mercados del agua. *Ingeniería del agua*. 8. 10.4995/ia.2001.2877. .
- Durán, O., & Aguiló, J. (2006). Selección de máquinas de control numérico usando Fuzzy AHP. *Espacios*, 27 (1), 17-20.
- Eyuboglu, S., Mahdi, H., Al-Shukri, H., & Rock, L. (2003). Detection of water leaks using ground penetrating radar. *Proc. of the 3rd International Conference on Applied Geophysics*, (págs. 8-12). Orlando Fl. USA.
- Fabijarińska, A. (2011). Variance Filter for Edge Detection and Edge-Based Image Segmentation. *Proc. of 7th International Conference of Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*. Zakarpattya, Ukraine.
- Fahmy, M., & Moselhi, O. (2010). Automated detection and location of leaks in water mains using infrared photography. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 24, 242-248.
- FAO. (2018). *Progress on level of water stress - Global baseline for SDG 6 Indicator 6.4.2 2018*. . Rome: FAO/UN-Water. 58 pp Licence: CC BYNC-SA 3.0 IGO.
- Faure, F., & Pandit, M. (2010). Intermittent Water Distribution. Recuperado el 26 de octubre de 2020 de Sustainable Sanitation and Water Management de <https://sswm.info/water-nutrient-cycle/water-distribution/hardwares/water-network-distribution/intermittent-water-distribution>. *Sustainable Sanitation and Water Management*.
- Fernández, E., Navarro, J., & Mazcorro, G. (2014). An Evolutionary Multi-objective Algorithm for Inferring Parameters in Outranking-Based Decision Models: The Case of the ELECTRE III Method. In: (eds) Soft Computing for Business Intelligence. Studies in Comp. En R. Espin, R. Pérez, A. Cobo, J. Marx, & A. Valdés, *Soft Computing for Business Intelligence. Studies in Computational Intelligence vol 537*. Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-53737-0_26: Springer.
- Figueira, J. R., Greco, S., Roy, B., & Slowinski, R. (2013). An overview of ELECTRE methods and their recent extensions. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 20, 61–85.

- Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. . New York: Springer Science + Business Media, Inc. ISBN 0-387-23081-5.
- Gao, T., Na, S., Dang, X., & Zhang, Y. (2018). Study of the Competitiveness of Quanzhou Port on the Belt and Road in China Based on a Fuzzy-AHP and ELECTRE III Model . *Sustainability* 10, 1253.
- Gavade, R. K. (2014). Multi-Criteria Decision Making : An overview of different selection problems and methods. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 5 (4), 5643-5646.
- Gerlitz, K., Knoll, M. D., Cross, G. M., Luzitano, R. D., & Knight, R. (1993). Processing Ground Penetrating Radar Data to Improve Resolution Of Near Surface Targets. *Proc. of the 6th Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. San Diego, California USA.
- Glaser, D., Werkema, D., Versteeg, R., Henderson, R., & Rucker, D. (2012). Temporal GPR imaging of an ethanol release within a laboratory-scaled sand tank. *Journal of Applied Geophysics*. 86, 133-145. 10.1016/j.jappgeo.2012.07.016. .
- Gonzalez, R. C., Woods, R. E., & Eddins, S. L. (2004). *Digital Image Processing Using MATLAB*. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall.
- Govindan, K., & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 250 (1) , 1–29.
- Gurbuz, A. C., McClellan, J. H., & Scott, W. R. (2012). Compressive sensing of underground structures using GPR. *Digital Signal Processing*, 22 (1) , 66–73.
- Hajkovicz, S., & Collins, K. (2007). A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resour. Manag.* 21, 1553–1566.
- Hamilton, S., & McKenzie, R. (2014). *Water Management and Water Loss*. IWA Publishing, ISBN13 9781780406350.
- Hao, T., Rogers, C. F., Metje, N., Chapman, D. N., Muggleton, J. M., Foo, K. Y., . . . Saul, A. J. (2012). Condition assessment of the buried utility service infrastructure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 331-344.
- Harrison, D. (2005). *Threshold estimation using wavelets and curvelets on ground penetrating radar data for noise and clutter suppression*, Master Thesis. University of British Columbia, South Dakota, USA.
- Hasan, A. E. (2012). The use of ground penetrating radar with a frequency 1 GHz to detect water leaks from pipelines. *Proc. of the 16th International Water Technology Conference* (págs. 7-10). Istanbul, Turkey: IWTA.

- Hatami-Marbini, A., & Tavana, M. (2011). An extension of the Electre I method for group decision-making under a fuzzy environment. *Omega*, 39 (4) , 373–386.
- Hoarau, Q., Ginolhac, G., Atto, A. M., & Nicolas, J. M. (2017). Robust adaptive detection of buried pipes using GPR. *Signal Processing*, 132, 293–305.
- Hokkanen, J., Salminen, P., Rossi, E., & Ettala, M. (1995). The choice of a solid waste management system using the Electre II decision-aid method. *Waste Management & Research*, 13 (2) , 175–193.
- Hong, W.-T., Kang, S., Lee, S., & Lee, J.-S. (2018). Analyses of GPR signals for characterization of ground conditions in urban areas. *Journal of Applied Geophysics*, 152:65–76. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.005>.
- Huerta, G., Jiménez, E., & Prado, Z. (2011). *Sistema automático recuperador de agua pluvial y aguas grises*. . Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- Hunaidi, O. (2012). Acoustic leak detection survey strategies for water distribution pipes. *Journal of Construction Technology Update*, 79, 1–5.
- Hunaidi, O., & Giamou, P. (1998). Ground-penetrating radar for detection of leaks in buried plastic water distribution pipes. *Proceedings of the seventh International Conference on Ground-Penetrating Radar*. Lawrence, Kansas, USA.
- Hunaidi, O., Wang, A., Bracken, M., Gambino, T., & Fricke, C. (2004). Acoustic Methods for Locating Leaks in Municipal Water Pipe Networks. *Proc. of the International Conference on Water Demand Management*. Dead Sea, Jordan.
- Hyun, S.-Y., Jo, Y.-S., Oh, H.-C., Kim, S.-Y., & Kim, Y.-S. (2007). The Laboratory Scaled-Down Model of a Ground-Penetrating Radar for Leak Detection of Water Pipes. *Measurement Science and Technology* 18, 2791-2799.
- Ilaya-Ayza, A. E., Pérez-García, R., Martins, C., Izquierdo, J., & Campbell, E. (2016). Análisis de las causas que originan el suministro de agua in-termitente, caso de estudio: zona sur de la ciudad de Oruro (Bolivia). *Acta Universitaria*, 26(NE-3), 64-73. doi: 10.15174/au.2016.1027.
- Juliano, T. M., Meegoda, J. N., & Watts, D. J. (2013). Acoustic emission leak detection on a metal pipeline buried in sandy soil. *Journal of Pipeline System Engineering and Practice* 4, 149-155.
- Jun, D., Tian-tian, F., Yi-sheng, Y., & Yu, M. (2014). Macro-site selection of wind/solar hybrid power station based on ELECTRE-II. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 194–204.
- Ka, B. (2011). Application of Fuzzy AHP and ELECTRE to China Dry Port Location Selection. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 27 (2) , 331–353.

- Kaya, T., & Kahraman, C. (2011). An integrated fuzzy AHP–ELECTRE methodology for environmental impact assessment. *Expert Systems with Applications*, 38 (7), 8553–8562.
- Klingel, P., & Knobloch, A. (2015). A Review of Water Balance Application in Water Supply . *Journal - American Water Works Association*, 107, E339-E350. doi:10.5942/jawwa.2015.107.0084.
- Klir, G. J., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic – Theory and applications*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR.
- Kolahi, H., Jahangiri, M., Ghaem, H., Rostamabadi, A., Aghabeigi, M., Farhadi, P., & Kamalnia, M. (2018). Evaluation of Respiratory Protection Program in Petrochemical Industries; Application of Analytic Hierarchy Process (AHP). *Safety and Health at Work*, 9, (1), 95–100.
- Kubler, S., Robert, J., Derigent, W., Voisin, A., & Le Traon, Y. (2016). A state-of-the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications. *Expert Systems with Applications*, 65, 398–422.
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596–609.
- Kutlu, A. C., & Ekmekçioğlu, M. (2012). Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications*, 39 (1), 61–67.
- La Scalia, G., Micale, R., Certa, A., & Enea, M. (2015). Ranking of shelf life models based on smart logistic unit using the ELECTRE III method. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10 (17), 38009–38015.
- Lai, W. L., Chang, R. W., Sham, J. C., & Pang, K. (2016). Perturbation Mapping of Water Leak in Buried Water Pipes Via Laboratory Validation Experiments with High-Frequency Ground Penetrating Radar (GPR). *Tunnelling and Underground Space Technology* 52, 157-167.
- Lai, W., Chang, R., & Sham, J. (2018). A blind test of nondestructive underground void detection by ground penetrating radar (GPR). . *J. Appl. Geophys.* , 149:10–17. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.12.010>.
- Lee, B., & Oh, S. (2018). Modified electrical survey for effective leakage detection at concrete hydraulic facilities. *Journal of Applied Geophysics*, 149:114–130. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.08.006>.

- Li, R., Huang, H., Xin, K., & Tao, T. (2015). A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems. *Water Supply* 1 June 2015; 15 (3) , 429–441. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2014.131>.
- Liemberger, R., & Wyatt, A. (2018). Quantifying the global non-revenue water problem. . *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(3), 831– 837.
- Liu, G., Jia, Y., Liu, H., Qiu, H., Qiu, D., & Shan, H. (2002). A Case Study To Detect the Leakage of Underground Pressureless Cement Sewage Water Pipe Using GPR, Electrical, and Chemical Data. *Environmental Science & Technology* 2002 36 (5), 1077-1085, DOI: 10.1021/es001954s.
- Liu, Z., & Kleiner, Y. (2013). State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes. *Measurement*, 46(1) , 1-15.
- Løken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (7) , 1584–1595.
- Lupo, T. (2015). Fuzzy ServPerf model combined with ELECTRE III to comparatively evaluate service quality of international airports in Sicily. *J. Air Transp. Manag.* 42, 249–259.
- Maas, C., & Schmalzl, J. (2013). Using pattern recognition to automatically localize reflection hyperbolas in data from ground penetrating radar. *Computers & Geosciences*, vol. 58, 116– 125.
- Martínez, V. Y., & Villalejo Garcia, V. M. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ing. Hidráulica y Ambiental* 39 (1), 58-72.
- Martínez-Garrido, M. I., Fort, R., Gómez-Heras, M., Valles, J., & Varas-Muriel, M. (2018). An overview of non-destructive and minimally invasive techniques for moisture control in the cultural heritage. *Journal of Applied Geophysics*, 155. 10.1016/j.jappgeo.2018.03.008.
- Martini, A., Troncossi, M., & Rivola, A. (2015). Automatic Leak Detection in Buried Plastic Pipes of Water Supply Networks by Means of Vibration Measurements. *Shock and Vibration*, 1-13.
- Moradi, M., Hafizi, M. K., Taheri, B., & Kamal, H. (2011). Application of geophysical methods to delineation of LNAPL contaminated plume. *Proc. of the 7th IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development, France* (págs. 135-139). Angers, France: WSEAS Press, Athens, Greece.
- Mousavi-Nasab, S. H., & Sotoudeh-Anvari, A. (2017). A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems. *Materials & Design*, 121, 237–253.

- Mulliner, E., Malys, N., & Maliene, V. (2016). Comparative analysis of MCDM methods for the assessment of sustainable housing affordability. *Omega*, 59, 146–156.
- Muñoz-Porcar, A., Alonso-Nuez, M. J., Flores-García, M., & Duret-Solanas, D. (2015). The renewal of assets using a tool to aid decision making. *Management Decision*, 53 (7), 1412–1429.
- Nagashree, R. N., Aswini, N., Dyana, A., & Srinivas, C. H. (2014). Detection and classification of ground penetrating radar image using textural features. *Proc. of International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications*. Bangalore, India.
- Nakhkash, M., & Mahmood-Zadeh, M. R. (2004). Water leak detection using ground penetrating radar . *Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar, 2004. GPR 2004.*, (págs. 525-528). Delft, The Netherlands, 2004, .
- Nasirian, A., Maghrebi, M. F., & Yazdani, S. (2013). Leakage Detection in Water Distribution Network Based on a New Heuristic Genetic Algorithm Model. *Journal of Water Resource and Protection* 5, 294-303.
- Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews, Volume 66, Issues 3–4.*, 261-330, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>.
- Nieto, N. (2011). La gestión del agua: tensiones globales y latinoamericanas. *Política y cultura*, (36) . 157-176. Recuperado en 08 de noviembre de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-77422011000200007&lng=es&tlng=es.
- Nikas, A., Doukas, H., & López, L. M. (2018). A group decision making tool for assessing climate policy risks against multiple criteria. *Heliyon*, 4 (3), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00588>.
- Obeid, A. M., Karray, F., Jmal, M. W., Abid, M., Manzoor Qasim, S., & BenSaleh, M. S. (2016). Towards realisation of wireless sensor network-based water pipeline monitoring systems: a comprehensive review of techniques and platforms. *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 10, no. 5, , 420-426, 8 2016, doi: 10.1049/iet-smt.2015.0255.
- Ocaña Levario, S. J. (2014). *Reconocimiento de patrones para la identificación de tuberías enterradas en sistemas de abastecimiento de agua a partir de imágenes de GPR*. Valencia, Spain: UPV.
- Ocaña-Levario, S. J., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2015). 3D model evolution of a leak based on GPR image interpretation. *Water Science & Technology: Water Supply* 15(6), 1312-1319.

- Ocaña-Levario, S. J., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2016). Análisis de imágenes de georadar para la localización de fugas mediante la aplicación de filtros de varianza. *XII Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería*. Lérida, Spain, 5-7 Septiembre.
- Ocaña-Levario, S. J., Ayala-Cabrera, D., Pérez-García, R., Izquierdo, J., & Herrera, M. (2013). Reconocimiento de patrones para la localización y caracterización de elementos plásticos de los sistemas de abastecimiento de agua mediante GPR. . *XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje*. Buenos Aires, Argentina, 11-15 noviembre.
- Ocaña-Levario, S. J., Carreño-Alvarado, E. P., Ayala-Cabrera, D., & Izquierdo, J. (2018). GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters. *Journal of Applied Geophysics*, 236-247.
- Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. (2020). *Results pack de CORDIS: innovación en materia de agua*. 9789278420758: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- ONU. (25 de 10 de 2020). <https://www.un.org>. Obtenido de Objetivos de desarrollo sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2018/06/la-agenda-de-desarrollo-sostenible-necesita-un-impulso-urgente-para-alcanzar-sus-objetivos/>
- Ozevin, D., & Yalcinkaya, H. (2014). New Leak Localization Approach in Pipelines Using Single-Point Measurement. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice Volume 5 Issue 2*.
- Porsani, J. L., Sauck, W. A., & Júnior, A. S. (2006). GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil. . *Journal of Applied Geophysics*, 58 (3), 177–187.
- Pratt, W. K. (2007). *Digital Image Processing, fourth ed.* . Hoboken, New Jersey.: Wiley.
- Proulx, F., Rodriguez, M. J., Sérodes, J., & Bouchard, C. (2007). A methodology for identifying vulnerable locations to taste and odour problems in a drinking water system. *Water Science and Technology*, 55 (5) , 177–183.
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7:1, 25-45, DOI: 10.1080/15730621003610878.
- Rajiv, K., Chandra, G. R., & Rao, B. B. (2017). GPR objects hyperbola region feature extraction. *Advances in Computational Sciences and Technology vol. 10, no 5, p. , 789-804*.

-
- Rogers, M. G., Bruen, M., & Maystre, L.-Y. (2013). *ELECTRE AND DECISION SUPPORT. Methods and Applications in Engineering and Infrastructure Investment*. New York: Springer US.
- Roy, B. (1968). Classement et choix en presence de points de vue multiples (La methode ELECTRE) . *Revue Francaise D Informatique de Recherche Operationnelle*, 2 (8) , 57–75.
- Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory and Decision*, 31, 1, 49–73.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15 (3) , 234–281.
- Sanabria Aguilar, M. A. (2006). *Toma de Decisiones con Criterios Múltiples: un resumen conceptual* . Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica.
- Santos, V., & Teixeira, F. (2017). Application of time-reversal-based processing techniques to enhance detection of GPR targets. . *J. Appl. Geophys.* , 146:80–94. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.09.004>.
- Sarwas, G., & Skoneczny, S. (2015). Object Localization and Detection Using Variance Filter. *Proc. of the 6th Image Processing and Communications Challenges*. Bydgoszcz, Poland.
- Shaikh, S. A., Tian, G., Shi, Z., Zhao, W., & Junejo, S. A. (2018). Frequency band adjustment match filtering based on variable frequency GPR antennas pairing scheme for shallow subsurface investigations . *J. Appl. Geophys.* , 149:42–51. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.12.013>.
- Shakmak, B., & Al-Habaibeh, A. (2015). Detection of water leakage in buried pipes using infrared technology; A comparative study of using high and low resolution infrared cameras for evaluating distant remote detection. *2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*, (págs. 1-7. 10.1109/AEECT.2015.7360563.).
- Shekofteh, M., Ghaziz, M. J., & Yazdi, J. (2020). A methodology for leak detection in water distribution networks using graph theory and artificial neural network. *Urban Water Journal*, 17:6, 525-533, DOI: 10.1080/1573062X.2020.1797832.
- Shen, Y., Lin, Y., Li, P., Fu, Y., & Wang, Y. (2020). Simulation and Detection Leakage of Underground Water Pipeline by Ground Penetrating Radar. *Journal of Testing and Evaluation* 48, no. 3 , 2003-2027, <https://doi.org/10.1520/JTE20190181>.
- Shkvyrya, Y. (2010). Algorithm of data processing in GPR . *INTERNATIONAL KHARKOV SYMPOSIUM ON PHYSICS AND ENGINEERING OF*

MICROWAVES, MILLIMETER AND SUBMILLIMETER WAVES. *IEEE*, (págs. 1-1).

- Shoham, Y., & Leyton-Brown, K. (2009). *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic and Logical Foundations*. New York: Cambridge University Press.
- Simi, A., Bracciali, S., & Manacorda, G. (2008). Hough Transform Based Automatic Pipe Detection for Array GPR: Algorithm Development and On-site Test. *Proc. of Radar Conference*. Rome, Italy.
- Singh, N. P., & Nene, M. J. (2013). Buried object detection and analysis of GPR images: using neural network and curve fitting. *Proc. of International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy*. Kanjirapally, India.
- Sipahi, S., & Timor, M. (2010). The analytic hierarchy process and analytic network process: An overview of applications. *Management Decision*, 48(5), 775–808.
- Stampolidis, A., Soupios, P., & Vallianatos, F. (2003). Detection of Leaks in Buried Plastic Water Distribution Pipes in Urban Places - A Case of Study. *Proc. of the 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*. Delft, Netherlands.
- Tavera, M. (2008). *Aplicación de georadar para la mejora del rendimiento de una red Hídrica*, Master thesis, Polytechnic University of Valencia. Valencia, Spain: Polytechnic University of Valencia Press.
- The MathWorks, Inc. (2012). *MATLAB and Statistics Toolbox Release 2012b*. Natick, Massachusetts, United States.
- Thomson, J., Wang, L., & Royer, M. (2009). *State of technology review report on condition assessment of ferrous water transmission and distribution systems*. EPA United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-09/055.
- Tsitsifli, S., & Kanakoudis, V. (2010). Presenting a new user friendly tool to assess the performance level & calculate the water balance of water networks. *In PRE10 International Conference*. Lefkada Island, Greece. .
- UNESCO. (10 de 10 de 2020). <https://es.unesco.org/>. Obtenido de <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/escasez-calidad#:~:text=Cerca%20de%20una%20quinta%20parte,para%20tomar%20agua%20de%20los>
- Van Hecke, B. (23 de 08 de 2020). *Nickel Institute*. Obtenido de Nickel Institute: <https://nickelinstitute.org/blog/2020/january/lose-the-leaks/>
- Van Laarhoven, P., & Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11 (1), 199–227.

- Vaudelet, P., Schmutz, M., Pessel, M., Franceschi, M., Guérin, R., Atteia, O., . . . Bégassat, P. (2011). Mapping of contaminant plumes with geoelectrical methods. A case study in urban context. *Journal of Applied Geophysics* 75, 738-751.
- Villa-Silva, A., Martínez Gómez, E., Perez-Domínguez, L., Pérez Carlos, J. I., Perez Olguin, I., & Almeraz Durán, S. N. (2019). Una revisión de literatura de 1980 a 2018 de los métodos Multi-criterio A literature review from 1980 to 2018 of Multi-criteria methods a*. *Mundo Fesc*, 9 (18), 89-102.
- Vincke, P. (1992). *Multicriteria Decision-Aid*. Wiley.
- Wang, D. (2017). *Application and evaluation of non destructive methods for buried pipes*. Ontario CA.: Queens University.
- Wang, P., Zhouquan Zhu, Z., & Wang, Y. (2016). A novel hybrid MCDM model combining the SAW, TOPSIS and GRA methods based on experimental design. *Information Sciences*, 345, 27–45.
- Whaite Gimón, F. E. (1992). *Detección de minas anti-personales en señales de GPR con técnicas de Machine Learning*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- World Bank. (2016). Retrieved on 01/12/2017 from <http://www.worldbank.org/en/news/press-release/2016/09/01/the-worldbank-and-the-international-water-association-to-establish-a-partnership-to-reduce-water-losses>.
- Xue, W., Zhu, J., Rong, X., Huang, Y., Yang, Y., & Yu, Y. (2017). The analysis of ground penetrating radar signal based on generalized S transform with parameters optimization. *J. Appl. Geophys.* , 140:75–83. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.03.016>.
- Yazdekhasi, S., Piratla, K. R., Atamturktur, S., & Khan, A. A. (2017). Novel vibration-based technique for detecting water pipeline leakage. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13:6, 731-742, DOI: 10.1080/15732479.2016.1188318.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets . *Information and Control*, 8, 338–353.
- Zheng, L., & Yehuda, K. (2012). State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes. *National Research Council Canada*.
- Zimmermann, H. J. (1985). *Fuzzy set theory and its applications*. Kluwer, Boston, MA: Springer.
- Zúñiga Rodríguez, M. G. (2019). *Análisis y diagnóstico de la red del sistema de Agua Potable de la cabecera cantonal del Cantón Guano, Provincia de Chimborazo, Ecuador*.

