

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**  

---

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO  
AMBIENTE**



**TERMOGRAFÍA Y HERRAMIENTAS  
COMPUTACIONALES COMO TÉCNICA HÍBRIDA NO  
DESTRUCTIVA PARA LA VISUALIZACIÓN DE  
INFRAESTRUCTURA Y FUGAS EN REDES DE AGUA**

**TESIS DOCTORAL**

**PRESENTADA POR**

**ELIZABETH PAULINE CARREÑO ALVARADO**

**DIRIGIDA POR**

**DR. JOAQUÍN IZQUIERDO SEBASTIÁN  
DR. IDEL MONTALVO ARANGO  
DR. RAFAEL ROYO PASTOR**

**VALENCIA, ESPAÑA, JULIO 2017**



We may wish for easier, all-purpose analysis, and for simpler, magical, all-purpose cures, but wishing cannot change these problems into simple matters than organized complexity, no matter how much we try to evade the realities and to handle them as something different.

Death and life of the great American cities,  
Jane Jacobs, 1961



## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar ésta tesis a mi mami, con todo el cariño de mi ser. A Jorge Leonel “mi” Ángel Hurtado y a mis amores peludos: Riu, Nunki y Osti.



## AGRADECIMIENTOS

Esta es la tercera monografía que escribo y hasta ahora nunca había escrito un agradecimiento. Es verdad que no terminaría de plasmar mi infinito agradecimiento por todo lo que he aprendido en mis 36 años en esta tierra. Son tantos los que, de un modo u otro, me han enseñado algo y colaborado en la realización de esta tesis, que no me resulta fácil. Gracias a todos, porque estamos de alguna manera interconectados, gracias a la vida, a la naturaleza, al universo. Gracias a ti que lees esto.

Hay algunas personas que estuvieron conmigo en estos años de doctorado. Quiero agradecerles con todo mi cariño su compañía.

A Leonel Ángel Hurtado, por sabio, por cuidar de Nunki, por todo lo que da de sí. Eres lo que más amo en esta vida. A Núvol Perla de Riu, por llegar en el momento indicado y quedarse conmigo, a Víctor Eslava Echagaray, a quien la vida nos permitió tenerlo más tiempo en esta tierra, en especial por las dos patadas que me dio, la primera para hacerme escaladora, la segunda porque me trajo aquí a emprender la aventura del doctorado. A mi familia: mi mami Elizabeth, a mi Jessy (huesos), a mi Enano (Leonel) y a mi Paco, a mis cuñadas, Leti y Andy, y a mis sobrinas Xavidalet y Ainhoa, que tanta falta me hacen. A mi segunda familia: a Gloria, Luis, Stephanie, Julia, Mateo, Lucas y Matías.

A Manolo Vila Piquer por todo lo que vivimos juntos, por todos esos domingos escalando. Me has enseñado mucho; gracias por ese corazón tan grande que albergas en el pecho y que sabes disimular bien. A Tito que demostraba su cariño con gruñidos y estornudos. Nos vino a faltar en mayo de 2016; echamos de menos su habilidad para detectar bocatas; a José Cebrián Fortuny, por esbozar siempre una sonrisa y su excelente acento inglés cuando canta, el primer pringado que me brindó su amistad. Gracias a ti hablo un valenciano “xurro”. A Andreas Kutscher, que le mola ayudar, por hacernos ketzespitse ese, como dice Manolo. A Aurora Marqués que está a por los animales, y a Cris siempre sonriente, siempre valiente ante las adversidades. Estas dos se dan a querer, las llevo en el corazón, guapas. A Pepe González, por dejarse la seriedad olvidada en algún bar y no buscarla. Eres lo mejor que me pasó en España; a la Gateta de L'ostia, y a Lola, por ser peludas, apapachables y brindarnos cariño; a mis compañeros: Carlitos, Patri, Bea, Cris y Jacob, con quienes se comparten buenos días escalando y entrenando. Carlos sé que solo escalas con nosotros por la birra, pero tu compañía es agradable. Gracias a la montaña, que está ahí para centrarme las ideas. Especialmente quiero agradecer a Gilberto Reynoso Meza, por su simpleza en complejidad. Por las lecciones de vida que me dio. Gi, eres todo y nada a la vez, gracias por todo tú apoyo durante este duro proceso, me faltan palabras para expresar toda la gratitud que siento y el amor que te tengo, así que tope borrego.

A mis compañeros del grupo FluIng-IMM, que la casualidad nos puso en el momento y sitio adecuado para compartir, crecer y aprender, en especial a Joanna, Silvia y Enrique.

Quiero también agradecer y brindar un reconocimiento a mis tutores. Ya no puedo incluir entre ellos a Rafael Pérez García, porque desgraciadamente falleció el pasado 7 de octubre de dos mil dieciséis. Rafa que fue un eslabón importante en todo el proceso. Por todo su apoyo en la realización de esta tesis, por sus consejos su disposición y buenas ideas. Por llevar el grupo como una pequeña gran familia, siendo de todo un poco para con nosotros,

por brindar esa amistad a todo el que pisa esta tierra, el apoyo brindado durante esta etapa de formación.

Quiero agradecer y brindar un reconocimiento afectuoso al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la oportunidad y apoyo para seguir con mi formación científica y tecnológica. Además, por impulsar y apoyar a quienes queremos hacer de México un mejor país.

## RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL

La presente Tesis tiene como principal objetivo estudiar la viabilidad de implementación híbrida de técnicas basadas en la termografía infrarroja aislada y técnicas de *Machine Learning* en el mantenimiento de redes de distribución de agua. Concretamente, se busca estudiar cómo tales herramientas, a base de ensayos no destructivos (END), son adecuadas para la visualización de elementos de la infraestructura y para la detección de fugas.

El abastecimiento de agua para el ser humano se torna complejo a medida que pasa el tiempo, la población aumenta, y como consecuencia de la evolución de la demanda. Las redes de abastecimiento se ven modificadas para poder suministrar un servicio en aumento, mientras que la actualización de la información referente al sistema, en ocasiones, no se registra a la par. Como es natural, a pesar del mantenimiento que se lleve a cabo en la red de distribución, las tuberías envejecen, y los sistemas se deterioran y dejan de funcionar de manera óptima. Existen otros motivos para un mal funcionamiento de la red incluyendo mala operación, deterioros o fugas, siendo estas últimas un problema complejo que acarrea muchos inconvenientes. Las fugas no visibles pueden significar pérdidas de agua, mientras no sean reparadas, y daños indirectos, según sea el tiempo que lleve la fuga o la magnitud que posea.

La termografía puede funcionar como un medio de visión artificial, que puede conducir a la visualización de la infraestructura, ayudando, en particular a la corrección temprana de fugas. Cuenta como ventaja que, al tratarse de una técnica de evaluación no destructiva, no interfiere con el medio. Se pretende que, analizando las imágenes de infrarrojos provistas por la cámara termográfica, sea posible aislar áreas que sean sospechosas de contener fugas. La toma de imágenes tiene una característica muy positiva pues no posee una restrictiva de uso por hora del día o condición de temperatura. Por otra parte, los métodos de *Machine Learning* pueden ayudar a clasificar/obtener información a partir de grandes cantidades de datos. Tales técnicas pueden ser incorporadas en los sistemas SCADA actuales y, mediante datos en tiempo real, proporcionar información sobre posibles puntos de fuga. De la gran cantidad de datos que se reciben, tras un procesamiento adecuado, se puede extraer información altamente valiosa.



## RESUM DE LA TESI DOCTORAL

La present Tesi té com a principal objectiu estudiar la viabilitat d'implementació de tècniques híbrides basades en la termografia infraroja aïllada i tècniques de *Machine Learning*, en el manteniment de xarxes de distribució d'aigua. Concretament, es busca estudiar com tals eines a força d'assajos no destructius (AND) són adequades per a la visualització d'infraestructura y la detecció de fuites.

El proveïment d'aigua per a l'ésser humà es torna complex a mesura que passa el temps, la població augmenta i com a conseqüència de la demanda. Les xarxes d'abastament es veuen modificades per suplir el servei augmentant, i l'actualització de la informació referent al projecte de vegades no es registra a l'una. Com és natural tot i el manteniment que es dugui a terme a la xarxa de distribució, les canonades envelleixen, els sistemes es deterioren i deixen de funcionar de manera òptima. Hi ha altres motius per un mal funcionament de la xarxa incloent mala operació, edat, deterioraments o fuites, sent aquestes últimes un problema complex que implica molts inconvenients. Les fuites no visibles poden significar pèrdues d'aigua, mentre no siguin reparades, i danys indirectes, segons sigui el temps que porti la fugida o la magnitud que tingui.

La termografia pot funcionar com un mitjà de visió artificial, que pot conduir a una correcció primerenca de fuites. Compte com avantatge que, en tractar-se d'una tècnica per a l'avaluació no destructiva, no interfereix amb el medi. Es pretén que, analitzant les imatges d'infrarojos proveïdes per la càmera, sigui possible aïllar àrees que siguin sospitoses de contenir una fuga. La presa d'imatges té una característica molt positiva ja que no posseeix una restrictiva d'ús per hora del dia o condició de temperatura. D'altra banda, els mètodes de *Machine Learning* poden ajudar a classificar / obtenir informació per mitjà de dades vastes i vàlids. Tals tècniques poden ser incorporades en els sistemes SCADA actuals i, mitjançant dades en temps real, proporcionar informació sobre possibles punts de fuga. De la gran quantitat de dades que es reben, després processar-los, es pot extreure informació altament valuosa.



## **PHD THESIS SUMMARY**

The main objective of this thesis is to study the feasibility of implementing hybrid techniques based on isolated infrared thermography and Machine Learning techniques in the maintenance of water distribution networks. Specifically, it seeks to study how such tools, based on nondestructive testing (NDT), are suitable for visualization of infrastructure elements and detection of leaks.

Water supply for humans becomes complex as time passes, the population increases and as a result of the demand variation. The supply networks are modified to provide the increasing demand, while the updating of the information related to the system is sometimes not recorded simultaneously. Typically, irrespective of the kind of maintenance that is carried out in the distribution network, the pipes become old, and the systems deteriorate and stop working optimally. There are other reasons for a malfunction of the network including poor operation, deterioration or leakage, the latter being a complex problem that entails many drawbacks. Non-visible leaks can mean water loss, as long as they are not repaired, and also indirect damage, depending on the age of leaks or how large they are.

Thermography can function as a means of artificial vision, which can lead to early correction of leaks. It has as an advantage that, as it is a technique for non-destructive evaluation, it does not interfere with the medium. It is intended that, by analyzing the infrared images provided by the thermographic camera, it is possible to isolate areas that are suspected of containing a leak. The imaging has a very positive characteristic because it does not have a restrictive use by hour of the day or condition of temperature. Moreover, Machine Learning methods can help classify/obtain information through huge amounts of data. Such techniques can be incorporated into current SCADA systems and, through real-time data, provide information on possible leakage points. Valuable information can be extracted, after processing, from the large amount of data that is received.



## Contenido

DEDICATORIA .....	5
AGRADECIMIENTOS .....	7
RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL .....	9
RESUM DE LA TESI DOCTORAL.....	11
PHD THESIS SUMMARY .....	13
Contenido.....	15
Índice de figuras.....	17
Índice de tablas .....	21
CONTRIBUCIÓN Y ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	23
Objetivo de la tesis.....	23
Estrategia para la obtención del objetivo .....	24
1. INTRODUCCIÓN .....	27
PARTE I: El problema.....	31
2. EVALUACIÓN O ENSAYO NO DESTRUCTIVO.....	33
2.1. Definición general y clasificación .....	33
2.2. Aplicaciones.....	36
2.3. Técnicas de evaluación no destructiva en identificación de fugas de fluidos.....	37
2.3.1. Métodos con uso de instrumentos .....	38
2.3.2. Métodos de análisis por ordenador .....	39
2.4. Evolución de la tecnología y adaptación de los seres humanos a ésta.....	41
3. EL PROBLEMA DE FUGAS DE AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	45
3.1. Crecimiento de la población, la demanda de agua y la carencia de concienciación.....	45
3.2. Caracterización de los sistemas de distribución de agua potable .....	47
3.2.1. Características generales.....	48
3.3. Problemas de las redes de agua potable.....	49
3.3.1. Uso excesivo / Irresponsabilidad .....	50
3.3.2. Clandestinidad.....	51
3.3.3. Fugas .....	52
3.4. Enfoque del problema y planteamiento de la solución .....	55
3.5. Objetivos generales y específicos .....	56
PARTE II: Las herramientas.....	59
4. TERMOGRAFÍA COMO END .....	61
4.1. La termografía, su historia y evolución .....	61
4.2. Espectro electromagnético .....	63
4.3. Principios físicos de la termodinámica .....	65
4.3.1. Fundamentos de la termografía.....	66
4.4. El calor y su interacción con el medio .....	70
4.4.1. Influencia de variables ambientales en las imágenes termográficas .....	71
4.5. Imágenes: tipos y diferencias.....	76
4.5.1. Representación numérica de las imágenes termográficas.....	79
4.6. Aplicaciones de la termografía .....	80
4.7. La Termografía como END .....	81
4.7.1. Toma de imágenes de calidad y sus variables para análisis de fugas.....	85
5. ANÁLISIS CON ORDENADOR COMO END.....	87
5.1. Modelos científicos.....	87
5.2. Modelaciones con ordenador .....	88
5.3. Análisis de datos con machine learning y redes neuronales .....	89
5.4. Leak detection como evaluación no destructiva .....	92

---

---

PARTE III: Resultados en el empleo de termografía .....	93
6. CASOS DE ESTUDIO .....	95
6.1. Interpretación de imágenes IR para identificación de tuberías y posibles fugas .....	95
6.1.1. Experimentos anteriores .....	95
6.2. Hipótesis de trabajo.....	100
6.2.1. Modelo físico.....	100
6.2.2. Toma de imágenes.....	104
6.2.3. Obtención de datos de trabajo .....	105
6.2.4. Procesado de imágenes .....	109
6.2.5. Simulación Computarizada como herramienta de apoyo.....	114
6.3. Viabilidad económica del método en una red de agua potable.....	115
6.3.1. Limitaciones.....	117
6.4. Identificación de la zona donde yace una fuga con métodos de machine learning ....	117
6.4.1. Justificación .....	117
6.4.2. Descripción de la red de Hanoi .....	118
7. RESULTADOS DEL PROCESO DE IMÁGENES.....	127
7.1. Ensayo ID: St-3.....	129
7.2. Ensayo ID: St-4.....	131
7.3. Ensayo ID: St-2.....	133
7.4. Ensayo ID: Exp-1.....	135
7.5. Ensayo ID: Mp-1.....	137
7.6. Ensayo ID: Mgf-1 .....	139
7.7. Ensayo ID: Mr-1 .....	141
7.8. Ensayo ID: Mr-3 .....	143
7.9. Ensayo ID: Mr-4 .....	145
7.10. Ensayo ID: Mrf-1 .....	147
7.11. EnsayoID: Mrf-2.....	149
7.12. Comentarios respecto al análisis de imágenes .....	151
7.13. Conclusiones.....	151
7.14. Línea de trabajo a desarrollar en un futuro .....	152
8. Bibliografía .....	153
8.1. Artículos y consultas digitales .....	153
8.2. Sobre producción propia .....	156
8.3. Libros .....	157
ANEXOS .....	159
ANEXO I. Cámara FLIR SC620, Especificaciones técnicas .....	161
ANEXO II. Red de Hanoi.....	167
ANEXO III. Reportes generados por EpaNet del funcionamiento de la red Hanoi .....	173

## Índice de figuras

Figura 2.1 Clasificación de las diferentes técnicas de pruebas no destructivas.....	33
Figura 2.2 Clasificación de los diferentes métodos por tipo de defecto .....	35
Figura 2.3 Clústeres del sitio web <a href="http://carrot2.org">http://carrot2.org</a> .....	37
Figura 2.4 Comparativa desarrollo tecnológico entre móviles y cámaras termográficas .....	42
Figura 3.1 Niveles en que se clasifica una red de distribución de agua.....	47
Figura 3.2 Ejemplos de red ramificada (a), mallada (b), mixta (c, d).....	48
Figura 3.3 Relación uso del agua vs desarrollo del País.....	51
Figura 3.4 Pérdidas de agua por usuarios .....	51
Figura 3.5 Elementos involucrados en las fugas de agua en redes de distribución .....	53
Figura 3.6 Estrategia planteada para la identificación de fugas.....	56
Figura 4.1 El espectro electromagnético, una representación múltiple .....	64
Figura 4.2 Principios de transmisión de calor.....	65
Figura 4.3 Esquema de radiación de calor percibido por la cámara de infrarrojos .....	66
Figura 4.4 Fracciones de energía incidente.....	67
Figura 4.5 Un cuerpo negro .....	68
Figura 4.6 Curva de Planck.....	68
Figura 4.7 Ejemplificación del funcionamiento de la emisividad .....	69
Figura 4.8 Contribuidores de la calidad de la imagen que afectan la calidad percibida.....	73
Figura 4.9 Imágenes tomadas en un día cálido y un día frío .....	73
Figura 4.10 Comportamiento de la temperatura en las imágenes del T.I. ....	74
Figura 4.11 Temperaturas horarias por día Valencia, España .....	75
Figura 4.12 Temperatura media por día Valencia, España.....	75
Figura 4.13 Temperatura media mensual Valencia, España.....	75
Figura 4.14 Temperatura media mensual Valencia, España.....	76
Figura 4.15 Representación del espacio tridimensional RGB .....	78
Figura 4.16 Paletas de izquierda a derecha: <i>Inverted grey, iron, medical, rain, greyred</i> .....	78
Figura 4.17 Representación de los canales RGB y los valores de la tonalidad .....	79
Figura 4.18 Imágenes obtenida por la cámara, archivo .cvs, mapa de temperaturas.....	79
Figura 4.19 Escala predeterminada de la IR (FLIR systems) .....	80
Figura 4.20 Cronología de artículos búsqueda con palabras claves. ....	85
Figura 4.21 Imagen obtenida por una cámara termográfica, escala de color <i>Iron</i> .....	86

---

---

Figura 5.1 Análisis de componentes principales.....	90
Figura 5.2 Super vector machine, utilizando el truco Kernel .....	91
Figura 6.1 Elementos que aparecen en una IR de formato .jpg .....	96
Figura 6.2 Secuencia de adquisición de datos .....	97
Figura 6.3 Imágenes con variación de color .....	97
Figura 6.4 Imágenes con variación de escala.....	98
Figura 6.5 Elementos involucrados en el pre-proceso con imágenes termográficas .....	98
Figura 6.6 Procesado de IR para delimitar tuberías.....	99
Figura 6.7 Modelo físico forma básica .....	101
Figura 6.8 Modelo físico con sistema a gravedad en su interior .....	101
Figura 6.9 Tubería en "U" .....	102
Figura 6.10 Montaje del modelo.....	102
Figura 6.11 Bomba de recirculación KalkEx-Mobil.....	103
Figura 6.12 Cámara FLIR SC620 .....	104
Figura 6.13 Modelo físico y ángulo de toma de la cámara de infrarrojos .....	104
Figura 6.14 Nueva secuencia de adquisición de datos.....	106
Figura 6.15 Comportamiento de la temperatura en el año.....	106
Figura 6.16 Comportamiento de las temperaturas en el año.....	107
Figura 6.17 Relación de las variables de temperatura (KNIME).....	108
Figura 6.18 Temperaturas medias del periodo.....	108
Figura 6.19 Temperaturas medias en bloque para el procesado de imágenes .....	109
Figura 6.20 IR con escala de temperatura y escala real definida por el termograma .....	109
Figura 6.21 Localización de la zona de interés en la IR .....	110
Figura 6.22 Posición de la temperatura en la IR.....	111
Figura 6.23 Clasificación de zonas .....	111
Figura 6.24 Representación de una IR en el ciclo anual de temperaturas .....	112
Figura 6.25 FLIR QuickReport versión 1.2 SP1.....	114
Figura 6.26 Red de Hanoi .....	119
Figura 6.27 Red de Hanoi en modelada en EpaNet.....	119
Figura 6.28 Diagrama de flujo auxiliar para identificación de posible zona de fuga.....	120
Figura 6.29 Sectores de la red de Hanoi .....	123
Figura 7.1 Imagen con END visual (paleta Glowbow), ensayo ID:St-3 .....	129
Figura 7.2 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID:St-3 .....	129

---

---

---

---

Figura 7.3 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID:St-3.....	129
Figura 7.4 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID:St-3 .....	130
Figura 7.5 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID:St-3.....	130
Figura 7.6 Imagen con END visual (paleta RainHi), ensayo ID: St-4.....	131
Figura 7.7 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: St-4.....	131
Figura 7.8 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: St-4.....	131
Figura 7.9 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: St-4 .....	132
Figura 7.10 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: St-4.....	132
Figura 7.11 Imagen con END visual (paleta Glowbow), ensayo ID: St-2 .....	133
Figura 7.12 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: St-2 .....	133
Figura 7.13 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: St-2.....	133
Figura 7.14 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: St-2 .....	134
Figura 7.15 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: St-2.....	134
Figura 7.16 Imagen con END visual (paleta Yellow), ensayo ID: Exp-1 .....	135
Figura 7.17 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Exp-1 .....	135
Figura 7.18 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Exp-1.....	135
Figura 7.19 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Exp-1 .....	136
Figura 7.20 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Exp-1.....	136
Figura 7.21 Imagen con END visual (paleta Iron), ensayo ID: Mp-1 .....	137
Figura 7.22 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mp-1 .....	137
Figura 7.23 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mp-1 .....	137
Figura 7.24 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mp-1 .....	138
Figura 7.25 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mp-1 .....	138
Figura 7.26 Imagen con END visual (paleta Rain), ensayo ID: Mgf-1 .....	139
Figura 7.27 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mgf-1 .....	139
Figura 7.28 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mgf-1 .....	139
Figura 7.29 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mgf-1.....	140
Figura 7.30 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mgf-1 .....	140
Figura 7.31 Imagen con END visual (paleta Medical), ensayo ID: Mr-1.....	141
Figura 7.32 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mr-1 .....	141
Figura 7.33 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mr-1 .....	141
Figura 7.34 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mr-1.....	142
Figura 7.35 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mr-1 .....	142

---

---

Figura 7.36 Imagen con END visual (paleta RainHi), ensayo ID: Mr-3 .....	143
Figura 7.37 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mr-3 .....	143
Figura 7.38 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mr-3 .....	143
Figura 7.39 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mr-3.....	144
Figura 7.40 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mr-3 .....	144
Figura 7.41 Imagen con END visual (paleta Greyred), ensayo ID: Mr-4.....	145
Figura 7.42 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mr-4 .....	145
Figura 7.43 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mr-4 .....	145
Figura 7.44 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mr-4.....	146
Figura 7.45 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mr-4 .....	146
Figura 7.46 Imagen con END visual (paleta Greyred), ensayo ID: Mrf-1 .....	147
Figura 7.47 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mrf-1 .....	147
Figura 7.48 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mrf-1 .....	147
Figura 7.49 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mrf-1 .....	148
Figura 7.50 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mrf-1 .....	148
Figura 7.51 Imagen con END visual (paleta Yellow), ensayo ID: Mrf-2.....	149
Figura 7.52 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mrf-2.....	149
Figura 7.53 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mrf-2.....	149
Figura 7.54 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mrf-2 .....	150
Figura 7.55 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mrf-2.....	150

## *Índice de tablas*

Tabla 4.1 Algunas emisividades para diferentes materiales .....	69
Tabla 4.2. Valores representativos de emisividad .....	70
Tabla 4.3 Aplicaciones representativas de los sistemas de imágenes térmicas según Hudson ....	80
Tabla 6.1 Características de la bomba de recirculación.....	103
Tabla 6.2 Resumen de imágenes tomadas para investigación .....	105
Tabla 6.3 Topología de la red de Hanoi.....	121
Tabla 6.4 Parámetros de funcionamiento de la red de Hanoi .....	122
Tabla 6.5 Valores asignados de fuga a las tuberías .....	124
Tabla 6.6 Resultados de los clasificadores. ....	124



## CONTRIBUCIÓN Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

La hipótesis de esta tesis es que la termografía es una herramienta práctica y útil para la detección de fugas. Está basada principalmente en: el avance tecnológico que tiene actualmente; la relativa facilidad de acceso a su tecnología y su facilidad de uso; la relativa facilidad en la adquisición de instrumentos avanzados para uso cotidiano, sean por sí solos o en conjunto con otras tecnologías. Y es en el caso del mantenimiento de redes de abastecimiento que trabajaremos, donde contamos con diferente instrumentación, a la que queremos añadir una tecnología innovadora, como lo es la termografía. Profundizando en el tema, de alguna forma, queremos desmitificar y afianzar a la termografía como elemento no destructivo de previsión, mantenimiento y predicción. La termografía, aunque es muy utilizada en diversos campos, es una tecnología reciente y aún se encuentra en proceso de exploración y desarrollo, aunque ha dado buenos resultados en diferentes áreas de investigación. Esto fue lo que nos animó a considerarla en el ámbito de la distribución de agua.

### *Objetivo de la tesis*

El objetivo principal de este trabajo, consiste en **profundizar en el uso de técnicas de evaluación no destructiva, tales como la termografía, las imágenes de infrarrojos (IR) que produce, para determinar su utilidad como herramienta en la detección de fugas.** Con la finalidad de conseguir tal objetivo, los objetivos particulares son los siguientes:

1. **Determinar sus alcances de trabajo para las redes de distribución de agua**, para determinar si, trabajando de forma independiente, consigue dicho propósito o si es necesario que trabaje en forma conjunta con alguna otra tecnología, que permita hacerla herramienta más robusta;
2. si bien la termografía es una técnica potente por sí misma, tenemos la intención de **complementarla con métodos del tipo proceso de ordenador (clasificadores y técnicas *Machine Learning*)**, para hacer más precisa la técnica, o como un elemento más en la identificación de fugas.

El uso de cámaras termográficas y las imágenes que proveen, permiten la visualización de elementos no visibles a simple vista, como podría ser una fuga de agua. La portabilidad de la cámara permite que se trabaje en el sitio donde yace la tubería. La termografía, es una tecnología que, en la última década, se ha desarrollado notablemente, presenta ventajas por encima de lo que aparenta, y sus beneficios aumentan con el desarrollo de la tecnología. A la par de la mejora de las cámaras, su potencia y tamaño, otro tipo de tecnología como drones o dispositivos móviles surgen y permiten trabajar en conjunto; ya hoy en día, existen cursos sobre termografía y su aplicación con drones (Comunidad de Madrid; 2015), y la firma FLIR cuenta con una aplicación para el móvil que permite manipular imágenes de infrarrojos para análisis, con los beneficios de una IR, añadiendo todas las ventajas con las que cuenta un móvil, como lo son el envío y recepción de imágenes o videos.

Hacer uso de un modelo físico de laboratorio para profundizar en el tema de termografía, creando un caso de estudio permite controlar las variables de la escena que nos proveerá material de trabajo, para probar la eficacia del método, cosa que se tiene como un objetivo secundario, pero de vital importancia.

El llevar a cabo la modelación de la red de distribución de agua puede reproducir su comportamiento. Lo anterior ayuda a generar datos que se pueden procesar, para diferente fin, como determinar la existencia de fugas y el sitio donde yacen (de forma aproximada), permitiendo invertir menos tiempo con la cámara termográfica. El inconveniente de esta técnica radica en la fiabilidad del modelo. Los inconvenientes que se pueden presentar se establecen de acuerdo a la estructura del modelo.

Por medio de esto se pretende presentar una secuencia de trabajo con los elementos pertinentes que convierta a la termografía en una herramienta tecnológica para la identificación de fugas. Esto como apoyo al mantenimiento del buen funcionamiento de los sistemas de distribución de agua, basada en tecnología tipo END (ensayos no destructivos). El lector conocerá, los fundamentos de éstas tecnologías, las principales ventajas y las desventajas que posee, respecto a otras tecnologías, sus límites de aplicación y posibilidades de uso.

### ***Estrategia para la obtención del objetivo***

La tesis contiene siete capítulos divididos en tres partes, para que los objetivos sean fácilmente completados. El capítulo 1 contiene una breve introducción que define el contexto que envuelve a las pérdidas de agua en las redes de agua potable, haciendo énfasis en la importancia del agua en nuestras vidas, en nuestra sociedad y la necesidad imperativa de cuidarla.

La parte I, el problema, alberga los capítulos dos y tres. El capítulo 2 se encarga de describir cuales son las técnicas de evaluación no destructiva, las diferencias entre ellas, aplicaciones, su empleo en la detección de fugas de agua en redes de suministro de agua, comenta sobre el avance de las técnicas y cómo se ha adaptado el ser humano a su aplicación.

El capítulo 3 nos describe la caracterización de las redes de distribución de agua; es muy descriptivo en cuanto a una problemática tan compleja como la de las fugas, dados los tipos de fugas que existen. Aborda el problema de la identificación de fugas, plantea la solución y establece los objetivos a cumplir.

La parte II, las herramientas, alberga los capítulos cuatro y cinco. El capítulo 4 se encarga de contar la historia de la termografía, los campos de aplicación de ésta y sus ventajas como una técnica de evaluación no destructiva, describiéndose la complejidad de la técnica y de las imágenes que genera la cámara. Se aborda también en detalle lo que es una imagen y los diferentes formatos que existen; las variables atmosféricas, describiendo la influencia que tienen en la termografía y la generación de imágenes de infrarrojos, resaltando la importancia de las imágenes en nuestra época. Finalmente, se describe a la termografía como técnica de evaluación no destructiva (END) y la factibilidad de su uso para identificar fugas de agua en redes de abastecimiento de agua.

El capítulo 5, describe técnicas por medio de ordenador o modelos hidráulicos para la determinación de la sección aproximada del yacimiento de la fuga. Se hace especial énfasis en los denominados clasificadores y las técnicas de *Machine Learning*, la descripción del fenómeno denominado *leak detection* en el que nos basamos, y la aplicación de los modelos con sus conveniencias e inconveniencias.

La parte III alberga los capítulos seis y siete. En el capítulo 6 se tratan el desarrollo de la secuencia de trabajo, se comentan los experimentos llevados a cabo anteriormente y las

conclusiones que sirven para cumplir los objetivos; se describen los elementos utilizados, la hipótesis de trabajo hecha, bajo el modelo:

1. Desarrollo del modelo físico
2. Obtención y compilación de información
3. Procesamiento de los datos
4. Análisis de las imágenes
5. Visualización de las fugas

Para alcanzar los objetivos se busca desarrollar:

- Técnicas para mejorar la toma de imágenes y estandarizar las relaciones de las imágenes con las variables ambientales.
- Analizar y jerarquizar los métodos disponibles para la diferenciación de los elementos en la red de agua potable y la identificación de posibles fugas, tales como la segmentación, umbralización, y comparación con imágenes previas.
- Desarrollar una secuencia clara para establecer la localización de las fugas en las líneas de agua que incluyan estrategias para análisis de imágenes en tiempo real.

Se habla de forma literal del análisis de la viabilidad económica de poner en marcha una herramienta como esta, y el tiempo que demoraría para tener resultados en favor de la disminución de pérdidas de agua. Es decir, determinar pros y contras, además de generar una opinión realista al respecto de la técnica.

En el capítulo 7, se presentan los resultados de la técnica, la posibilidad de una herramienta para la interpretación de los resultados del tratamiento de las imágenes, y se involucran otras tecnologías END para trabajar en conjunto, la secuencia de uso, las conclusiones y las múltiples opciones de desarrollo de trabajo futuro.

Adicionalmente, se han incluido varios anexos como información complementaria. El Anexo I contiene las especificaciones técnicas de la cámara termográfica utilizada para tomar las imágenes. El Anexo II, la descripción de la red Hanoi, utilizada para hacer las simulaciones. En el Anexo III algunos reportes generados por EpaNet, de las tuberías que intervienen directamente con los nodos que determinan la solución.

Palabras clave: Análisis de imágenes, redes de agua potable, mantenimiento, fugas, termografía.



# 1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural, no renovable, que tiene un papel fundamental tanto en la vida de todo ser viviente, como en el desarrollo de las civilizaciones; dado que su uso es imprescindible, ha existido siempre una necesidad imperante de obtenerla. Ha dado al hombre, razón para buscarla y lograr su propio abastecimiento desde tiempos antiguos. Los asentamientos humanos por naturaleza, se localizaban cercanos a ríos, lagos, manantiales, mostrando la importancia del recurso para todas las actividades diarias. Con el paso del tiempo, surgieron grupos mayores, la industria, ganadería y agricultura se consolidaron; dada la necesidad de los seres humanos de tener un sitio donde estar seguros, evitando las fuerzas de la naturaleza, las ciudades comenzaron a asentarse, a más distancia de dichas fuentes de abastecimiento. Con todos estos elementos, un aumento notable de la cantidad de agua consumida surgía imperando la necesidad de un recurso de calidad. Lo anterior dio pie a una variante del ciclo hidrológico natural, creándose así un ciclo hidrológico urbano.

Tradicionalmente, se cree que los seres humanos tienen necesidades infinitas, mas es posible enmarcar aquellas que son fundamentales: subsistencia, protección, afecto, entendimiento, ocio, creación, identidad y libertad. Se considera la más importante de todas la subsistencia y quedando secundarias, pero no por ello menos importantes, el resto. Si bien el agua puede aparecer como elemento para el ocio, la creación, el sentimiento de libertad y, por ello, remarcar la necesidad de su cuidado, bien se podría prescindir de estos, ante la necesidad de supervivencia, más simplemente no se podría justificar su descuido.

La subsistencia se acota a cubrir las necesidades fisiológicas del ser humano y la salud del individuo. Lo anterior incluye: beber agua, alimentarse, dormir y eliminar los desechos. Siendo más estrictos, cada individuo, debe beber agua de calidad, que no afecte a su salud, alimentarse con alimentos no contaminados y tener un tratamiento de los desechos que no disminuya su calidad de vida. Aquí la ingeniería juega un papel muy importante para cubrir las necesidades de los seres humanos, así como aportar agua de calidad para beber, los cuidados de ésta, agua para producir alimentos y tratar los desechos.

El agua es parte de la vida, parte de los seres vivos, y es un recurso no renovable de disponibilidad limitada. En el mundo, de toda la cantidad de agua disponible, el 97.5% es agua salada, correspondiente a los océanos; el 2.5% es dulce, distribuida de la forma siguiente: 68.7% en glaciares, 30.1% en aguas subterráneas, 0.8% en permafrost, 0.4% en aguas superficiales y en la atmósfera, el 1,1% aproximadamente se encuentra a nivel superficial, en forma de ríos y arroyos, a nivel subterráneo, en forma de acuíferos naturales (lagos de agua dulce 67.4%, humedales 8.5%, humedad del suelo 12.2%, ríos de 1.6%, atmósfera de 8.5% y plantas y animales de 0.8%). Requerimos el agua principalmente para vivir, a la cual, por ley todos los seres humanos tenemos derecho; la cantidad de agua, disponible en el mundo de alguna forma es la misma, haciendo su ciclo hidrológico de forma repetida, pero la población que requiere el recurso, aumenta. El crecimiento de la población, según datos dados por el programa ambiental de las naciones unidas, el informe conciso de la situación demográfica en el mundo, indica que la población alcanzó 7200 millones en 2014; y se espera que para el 2050 habrá aumentado más de 2000 millones[1]. Con el aumento de la población, se incrementa el consumo del agua; la contaminación y el efecto del cambio climático, serán factores para el aumento de la crisis del agua; existirán también, desastres naturales generados por la escasez más aislada. Si no existe una gestión eficaz de las estructuras físicas deterioradas, mantenimiento y en ausencia de cultura del

cuidado del agua, se generarán conflictos dejando a millones de personas sin acceso adecuado de agua o sin ella en definitiva.

La evolución que ha tenido la distribución del agua, va desde las acequias de los indígenas de América, hasta los acueductos de roma; de las tuberías de asbesto cemento a la evolución de los materiales; del hierro fundido al uso de PVC. El paso del tiempo ha dado calidad al vital líquido, sencillez y seguridad de adquisición. Todo esto hace posible suplir algunas de las necesidades de los seres humanos, al menos las fisiológicas. Desafortunadamente, para nuestra evolución, tanta infraestructura sigue siendo imperfecta, mundialmente: en cuestión de aguas, esta infraestructura debe tener mantenimiento y conservación. De ello se encargan los organismos operadores o empresas de distribución de agua; para lo cual, se debe pagar una cuota que contribuye a que estos encargados, revisen periódicamente que la instalación funcione adecuadamente. Tal pago no corresponde al agua en sí, sino a la propia infraestructura de distribución y al mantenimiento de ésta. Cuando una ciudad crece, se incrementa la demanda y toca a los organismos en materia de agua, modificar las redes y ampliarlas, si es el caso. Lo anterior implica también trabajo de oficina, pues una modificación de la red debe ser registrada actualizando la información referente a ésta, cada vez que sea modificada, actualizando planos, etc. En ocasiones esto no se lleva a cabo, dejando la información escasa o incompleta; estas situaciones pueden significar un problema en un futuro, pues tanto si la información es escasa o incompleta, supone llevar una exhaustiva exploración, en su mantenimiento. En esta materia, los países en desarrollo tienen mucho terreno de trabajo, las redes suelen tener muchos años de edad y la mayoría de la información referente a estas, o bien (1) se conservan en papel, o (2) en el equipo humano, que se vuelve obsoleto, dejando vacíos de información. Lo anterior puede generar dudas sobre la red para llevar a cabo su mantenimiento, sin olvidar además de la necesidad de dar acceso de agua potable y tener servicio de colecta y tratamientos eficaces y completos.

Es claro, entonces, que con el crecimiento de la población, la demanda aumenta y, con ella, la necesidad de tener más fuentes de abastecimiento para dotar del servicio de agua potable a la población, la ampliación de las redes de distribución de agua y el cambio de estrategia en su mantenimiento. Lo anterior supone un gran reto, con las limitaciones existentes: ecológicas, económicas y físicas; el abastecimiento del agua potable es un servicio básico, una prestación obligatoria, sustentada por la ley de aguas en España (Artículo 58) que subraya el uso prioritario del agua para abastecer a las poblaciones.

En el cuidado del vital líquido es complicado crear una conciencia general en la población al respecto de éste, incluyendo cualquier tipo de concienciación; por lo que para cualquier tipo de acción, se debe implementar una medida técnica por parte de los encargados de los sistemas de distribución de agua potable. Esto es porque parte de los problemas que aparecen en la conservación del recurso, cuando se trata del servicio de abastecimiento de agua, se derivan de la existencia de fallos que no son visibles en las líneas de agua de los sistemas de distribución. De las diferentes pérdidas de agua que se conocen, las no visibles, son las más desfavorables debido a que no se tiene conciencia de su existencia y no se puede llevar a cabo su reparación. Para centrar la idea, se estima que, en promedio, se está perdiendo alrededor de un 40-50% [2], del agua inyectada en las redes de distribución, durante el recorrido que hace, desde el sitio donde se suple, hasta que llega a los usuarios, alcanzando estas cifras ya a nivel mundial. Hay que tener claro que el mantenimiento de la red de distribución de agua es una competencia del municipio, al menos, hasta el alcance de las acometidas domiciliarias, siendo en este recorrido hasta la acometida el lugar donde se

pierde la mayor cantidad de agua. A partir de ese punto, el sistema es competencia de la propiedad, siendo responsable el propietario de revisar periódicamente si existen pérdidas; estas pérdidas no se ven reflejadas en las pérdidas de la red, aunque, sin duda, deben ser mitigadas. En el dominio particular se encuentran tanto pérdidas de agua, por un mal funcionamiento de la instalación hidráulica, incluyendo pérdidas por fugas, como pérdidas por escasa cultura del agua. Existe así una complejidad añadida, al llevar a cabo el mantenimiento de la red de distribución de agua.

En el mantenimiento de la red de distribución de agua se tiene un factor que complica la identificación de pérdidas y es que la mayoría de la infraestructura se encuentra enterrada. Si la información correspondiente a la red no está completa, encontrar a las tuberías podría tornarse un reto. Muchas de estas redes de abastecimiento de agua tienen años trabajando, décadas, quizá más, sin saber a ciencia cierta en qué condición se encuentran; pues la tendencia natural de los materiales es a deteriorarse con la edad lo que trae consigo un sinnúmero de problemas que pudieran presentarse, que se incrementarán en los diversos escenarios que se presenten para identificar un problema en la red. Aunado a esto, la falta de concienciación por parte de la población respecto a los cuidados del agua, la necesidad de realizar censos para estudiar los hábitos de uso del agua de la población, generar bases de datos de dicha información, hacer balances de agua de entradas y salidas, para cuadrar la información, tornan el problema en algo difícil de abordar.

La situación del agua, recurso natural no renovable, y su obtención que pasan por: captación, almacenamiento, tratamiento, distribución, el sector de la población a la que servirá y el uso que se le dará, es muy general. El “problema” de la identificación de fugas, se torna entonces amplio por lo que me gustaría dejar en claro que el trabajo presentado no resolverá la situación general, sino que es más bien una pequeña colaboración a la sociedad como las muchas tantas que se han aportado en el mundo, que pretende ayudará a recuperar agua a los sistemas, representando una ganancia; servirá además como un elemento de consulta de la UPV, ya que así, puede continuar generando conocimiento y esparciéndolo, en alguna de sus formas.



## **PARTE I: El problema**



## 2. EVALUACIÓN O ENSAYO NO DESTRUCTIVO

### 2.1. Definición general y clasificación

La última década ha sido testigo del desarrollo de nuevas técnicas de evaluación no destructiva, que, entre otras de sus cualidades, pueden ser utilizadas para la inspección de los sistemas de distribución y conducción de abastecimiento de agua.

Las denominadas técnicas de evaluación no destructiva, (también llamadas END, o en inglés NDT, por *non destructing testing*), también se pueden encontrar como: pruebas no destructivas (PND), inspecciones no destructivas (IND), y exámenes no destructivos; considerándose todos sinónimos a los END. Estas técnicas son aquellas que se basan en la aplicación de métodos, pruebas o criterios de evaluación físicos, tales que impliquen un daño nulo, imperceptible, o no considerable a la muestra examinada; durante la prueba no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. En general, una END provee datos menos exactos de la variable a medir que los ensayos destructivos, pero es más barata y funcional ya que no implican destrucción. Sobre las técnicas de evaluación no destructiva se tienen registros desde 1868 cuando se comenzó a trabajar con campos magnéticos. Son técnicas que miden de forma indirecta lo que no puede ser medido de otra forma y determinan la bondad de aquello que está sometido a ensayo.

Con tantas aplicaciones comerciales, aparecieron diferentes terminologías: ensayos no destructivos (NDT), inspección no destructiva (NDI), y evaluación no destructiva (NDE), denominados por sus acrónimos en inglés, que terminan por ser nombres que describen métodos de ensayos o pruebas que no causan daño. Estas definiciones no fueron del todo aceptadas, englobando todas las terminologías en la denominada evaluación no destructiva (END) por su acrónimo en español.

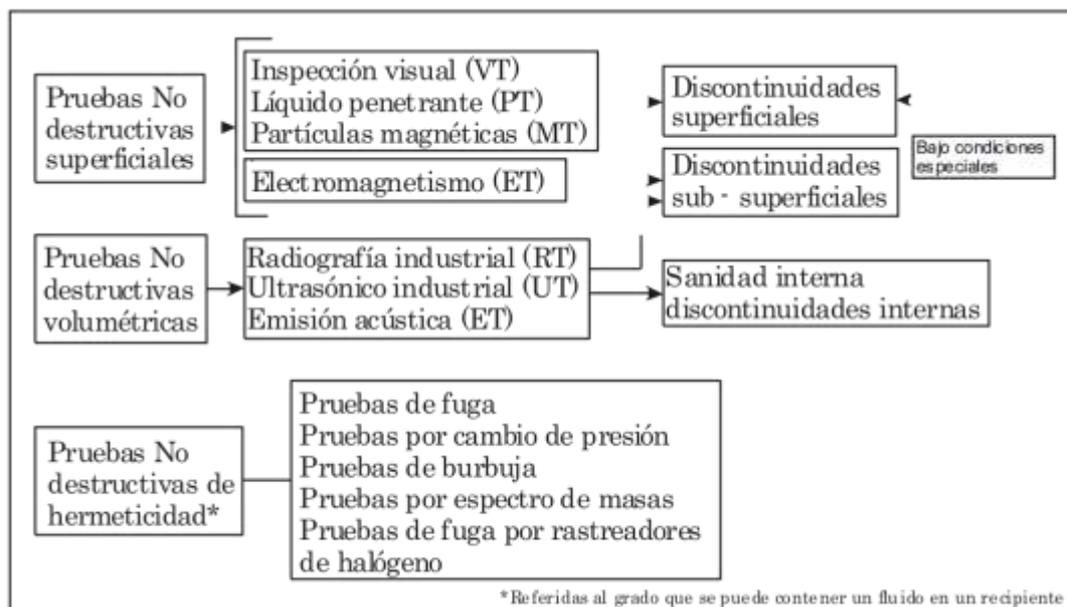


Figura 2.1 Clasificación de las diferentes técnicas de pruebas no destructivas.

Hablar de técnicas de evaluación no destructiva, decanta en un tema que resulta ser muy amplio: el concepto se adecúa a todo aquello que no daña de manera perceptible el objeto de estudio; está planteado, de forma específica, a materiales y cuenta con la posibilidad de ampliar su aplicación por los tipos de pruebas existentes. En la Figura 2.1, se muestran los diagramas de clasificación de las pruebas no destructivas.

Las técnicas de ensayo no destructivo, coinciden en la búsqueda de “defectos” aplicándose de acuerdo a las necesidades del objeto de estudio. Así, de manera general, se pueden clasificar por:

- a) Tipo de defecto
- b) Ubicación del defecto

De acuerdo al tipo o forma del defecto, las técnicas de inspección destacan en función del tipo de control a realizar, siendo diversos los métodos, que a su vez se dividen en dos grupos, las técnicas END superficiales y las volumétricas. De acuerdo a la ubicación del defecto, se consideran que bien sea superficial, sub superficial o interno, siendo nuevamente las técnicas de inspección en función del tipo de control a realizar.

Las técnicas END superficiales (defectos planos), se aplican a defectos, que son pequeños o poco significativos en una de sus dimensiones, en comparación con las otras dos.

- Discontinuidades
- Grietas
- Laminaciones
- Falta de adherencia
- Grietas por tratamientos, trabajo mecánico, fatiga, corrosión, soldadura
- Falta de fusión en soldaduras
- Penetración incompleta en soldaduras

Las técnicas END volumétricas (defectos en tres dimensiones), se aplican para detectar defectos con magnitudes significativas en sus tres dimensiones.

- Porosidad
- Inclusiones
- Contracciones
- Agujeros o vacíos
- Adelgazamientos
- Picaduras

Los métodos se enlistan en la Figura 2.2. Se puede notar que una misma técnica puede usarse en ambos tipos de defecto, ya que la localización del defecto es independiente del tipo, siendo poco útil la inspección en una zona en particular. También es notable que tengan una aplicación diversificada de acuerdo al área de trabajo. En el caso de la termografía infrarroja, puede ser utilizada tanto en las inspecciones superficiales como en las volumétricas.

Algunas de las técnicas destacadas de ensayos no destructivos en materiales, se describen brevemente, para ampliar el concepto. Inspección visual: Este tipo de técnica requiere mucha información sobre el objeto de estudio, sus características visuales para una aceptada

interpretación de las posibles indicaciones. Si esta técnica se aplica correctamente como inspección preventiva, es eficiente en la detección de problemas que podrían hacerse mayores.

Líquidos penetrantes: este tipo de inspección se utiliza para detectar y localizar discontinuidades en los materiales; generalmente, se emplea en aleaciones no ferrosas, en caso de materiales ferrosos es utilizable si el método por medio de partículas magnéticas es complicado de utilizar.

Partículas magnéticas: Este tipo de prueba es aplicable sobre o inmediatamente debajo de la superficie de metales ferrosos (aplicable también en soldadura), para detección de grietas superficiales. Se lleva a cabo rociando polvo de hierro sobre la superficie y, por medio de un flujo magnético, se atrae el polvo de hierro, determinando así la imperfección.

Electromagnetismo o corrientes de Eddy o de Foucault: Inspecciona materiales electroconductores, especialmente los no ferro-magnéticos. La inspección por corriente EDDY está basada en el efecto de inducción electromagnética.

Existen, también, pruebas no destructivas volumétricas, que proporcionan información acerca de la sanidad interna de los materiales inspeccionados como:

- Radiografía industrial (imagen obtenida por rayos X , o radiación gamma, basada en la absorción diferencial de la radiación por los materiales, peligrosa para los seres vivos)
- Ultrasonido industrial (procedimiento de inspección no destructivo de tipo mecánico; su funcionamiento se basa en la impedancia acústica, la que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido entre la densidad del material)
- Emisión acústica (Método de inspección de carácter mecánico, basado en la emisión de pulsos definidos que se propagan en el material de forma radial a la velocidad de sonido)
- Las diferencias radican en su mayoría en la técnica, los materiales usados y el objetivo de estudio; es esta particularidad la que las hace usuales de título.

MÉTODOS DE END PARA DEFECTOS VOLUMÉTRICOS	MÉTODOS DE END PARA EN DEFECTOS PLANOS
Visual Por réplica de superficies Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Campo magnético Corrientes Eddy Microondas Ultrasonido Radiografía Tomografía computarizada por rayos X Radiografía por neutrones <b>Termografía</b> Holografía óptica <b>Procesamiento digital de imagen</b>	Visual Microscopia por réplica Partículas magnéticas Campo magnético Corrientes de Eddy Microondas Perturbación de corriente eléctrica Ultrasonido Absorción magnética Emisión acústica <b>Termografía</b>

**Figura 2.2 Clasificación de los diferentes métodos por tipo de defecto**

Actualmente, están surgiendo infinidad de herramientas para simular comportamientos de redes de distribución de agua, sea software libre, comercial, o modelos por ordenador. Estos nuevos tipos de END, son métodos un tanto lejanos del concepto original, pero manteniendo la principal definición de éste: al trabajar por ordenador, un modelo se puede elaborar, probar y modificar de una forma mucho más independiente al grado de que no es necesario siquiera tener el objeto de estudio cerca, basta tener los datos y el objetivo. Equiparando, los métodos descritos con los modelos de ordenador, ambos persiguen detectar una “anomalía” y ninguno genera "daño perceptible" con el elemento en estudio, por ello son una forma de evaluación no destructiva.

## **2.2. Aplicaciones**

La evaluación no destructiva se utiliza ampliamente como herramienta de control de calidad en la industria y en la construcción. Es el resultado cualitativo, obtenido luego de procesar la información registrada por un ensayo realizado en modo tal de no alterar sus propiedades. Este tipo de evaluaciones, en general miden, caracterizan y ponen en manifiesto “discontinuidades” de los objetos testados, siendo el objetivo principal aceptar o rechazar un elemento. También son usadas para verificar el funcionamiento de un componente cuando se encuentra en servicio, buscando determinar la vida útil de éste; en este caso, en ocasiones, las inspecciones se tornan más complejas porque el elemento pertenezca a un sistema más complejo o por la inaccesibilidad al sitio.

Las técnicas de evaluación no destructiva, como lo son la inspección visual, ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción, o cualquiera que sea el tipo, se rigen por diferentes normativas, como las normas: ASME, ASTM, AWS, ISO, por mencionar algunas. Con ellas se pueden analizar los resultados y compararlos. La Sociedad Americana de las Pruebas no Destructivas (*American Society for Nondestructive Testing*, ASNT) se organiza para trabajar, como un sitio social interactivo, que da oportunidad, a profesionales sobre el tema, de hablar, compartir información, discutir sobre diferentes variantes del tema y de exponer trabajos. Se encargan, también, de revisar las normativas para el uso de los END, y de sus diversas aplicaciones y alcances: puede darse el caso que el END se torne inútil, cuando alguno de los requisitos de aplicación no sea cumplido o cuando la técnica no se puede aplicar, cuando el acceso a la zona de estudio no es posible. Estas técnicas, podrían proveer una información muy variada sobre los elementos en estudio. En la última década, ha surgido una polivalencia en los métodos END para diferentes objetivos y áreas, tanto, que podríamos perdernos en el camino. Por ello, para nuestro fin, es importante definir la línea de acción y encontrar los puntos de convergencia para el tipo de END que queremos utilizar para la localización de fugas en elementos de la red de distribución de agua.

Estas tecnologías tipo END ya han sido utilizadas tanto para la localización de los elementos en las redes de distribución de agua, como en la detección de fugas, con resultados que van desde muy positivos a negativos (estos últimos reportados poco en la literatura científica). Su empleo en el terreno de inspección está tendiendo a ser utilizados de manera incipiente desde hace algunos años, dicho lo cual, la posibilidad de crear herramientas de detección de fugas y mantenimiento es amplia; a la par del uso de estas técnicas, se tiene el incremento del avance tecnológico a velocidades cada vez mayores, trayendo consigo la creación de nuevas herramientas y mejora de las existentes, para usos más simples, compactos y eficientes. Hablar de técnicas END se puede tornar confuso, y es necesario diferenciar lo que es una técnica END y lo que no lo es, para evitar confusiones.



Durante las últimas décadas se han sumado esfuerzos para la detección de fugas en redes de distribución de agua, aplicando métodos teóricos o instrumentación. La mayoría de las veces la pobre distribución de los trabajos publicados, no permite que el avance y la aplicación vaya más allá de la zona de estudio. Son diversas las técnicas que se usan en la identificación de fugas (algunas se describen en el capítulo 3); en este apartado, se pretende hacer notar que las diferentes técnicas pueden ser utilizadas de forma independiente o conjunta. Cada una por sí misma puede tener ventajas y desventajas sobre las otras, en su mismo tipo inclusive. El trabajar con ellas en conjunto permite resaltar las cualidades de una de las dos, o bien complementarla, o bien explorar la sinergia entre ellas.

Las técnicas que se han desarrollado para la detección de fugas van desde análisis de redes de distribución de agua, por medio de software, de códigos programados o algoritmos basados en las ecuaciones fundamentales de la hidráulica, a elementos físicos. Estos últimos no son más que el uso de instrumentos en su mayoría acústicos, para la detección de fugas, siendo más utilizados, los instrumentos como apoyo para el mantenimiento, por las empresas u organismos encargados de materia de agua, ya que su uso es más simplificado y puntual que los análisis por ordenador.

### **2.3.1. Métodos con uso de instrumentos**

Estos métodos se llevan a cabo revisando la red de forma física, con el auxilio de un instrumento, *in situ*, que permite determinar el lugar donde existe la posibilidad que exista una fuga. Para ello hace falta contar con los planos de la red y algún indicio de la existencia de una pérdida de agua, aunque bien podría tratarse de un mantenimiento programado.

**Métodos acústicos:** El agua al salir por una grieta u orificio, origina ruido al pasar de la tubería al terreno por un cambio de presión, este sonido puede ser detectado por oídos sensibles por medio de amplificador de sonido.

**El amplificador mecánico:** Considerado uno de los más antiguos, su cuerpo es una caja de resonancia de una membrana vibratoria, cuya frecuencia puede ajustarse desplazando un botón; trabaja a través de una aguja corta, que permite captar los sonidos en puntos donde la canalización es visible y accesible con facilidad; el ruido captado es amplificado y se escucha a través de un estetoscopio de tipo médico.

**El amplificador electrónico:** El amplificador identifica el sonido silbante de la fuga, por medio de un micrófono y lo amplifica por un circuito electrónico; el micrófono se coloca en el suelo a diferentes intervalos a lo largo del conducto e identifica diferentes cambios de amplitud a medida cuando el micrófono se aproxima a la zona de fuga.

**Los sensores:** Son instrumentos que se colocan en las redes de distribución de agua, que situados en diferentes puntos de la red (válvulas, acometidas,..), de forma temporal o permanente, nos indican la posible existencia de una fuga. Son dispositivos “inteligentes” y activos, que no hay que patrullar, ni programar, ni interpretar, de los cuales se puede obtener información de funcionamiento. Los sensores, envían la señal digitalizada a las radios y estas a la unidad central, donde se realiza el proceso de correlación y se representa en la pantalla.

El método utiliza, como principio de funcionamiento, el parecido entre las dos señales producidas por el ruido de la fuga, y determina la diferencia, entre sus tiempos de propagación, hacia dos sensores colocados en los extremos de la parte de canalización controlada. La eficacia de este método depende de la amplitud del sonido emitido por la

fuga y de la conductividad sónica del conducto. La desventaja radica en su costo; el precio de estos aparatos es muy elevado y, debido a su principio de funcionamiento, son requeridos varios para cubrir la dimensión de la red.

**El georradar:** Permite determinar la posición de las tuberías, de las cuales no se sabía a ciencia cierta la posición. Permite, también, localizar las fugas de los conductos de agua enterrados, ya sea (1) detectando los vacíos creados en el suelo por el agua que se fuga y circula alrededor del conducto; o (2) por los segmentos de las canalizaciones que parecen más profundos (y no deberían hacerlo), por el aumento del valor de la constante dieléctrica del suelo saturado de agua alrededor de la fuga.

**Uso de gas indicador:** Esta técnica emplea un gas no tóxico, más ligero que el aire y no soluble en agua, para que haga de trazador, sin interrupción del servicio de agua a los usuarios. Es útil para la detección de fugas de agua, tanto en conducciones de largo recorrido y gran diámetro, como en pequeñas tuberías de distribución y acometidas, dentro y fuera del casco urbano. Plantea una alternativa más precisa y eficaz que los métodos acústicos convencionales y detecta fugas que pasan desapercibidas con estos últimos.

El gas escapa por la abertura de la fuga, ascendiendo de forma natural, hasta alcanzar la superficie, tras filtrarse por el suelo y el asfalto. La fuga, se localiza barriendo la superficie de suelo situada justo por encima del conducto, con un detector de gas muy sensible, gracias a la concentración de éste en el recorrido del conducto.

**La termografía**[3]: En esta técnica, se considera que el agua que escapa de un conducto subterráneo modifica las características térmicas del suelo alrededor de la tubería. Las anomalías térmicas producidas por encima del conducto se pueden observar mediante cámaras de infrarrojos ya sea portátiles o colocadas en un vehículo terrestre o un avión.

### **2.3.2. Métodos de análisis por ordenador**

Estos métodos se usan para reproducir, por medio de un modelo hidráulico, el comportamiento de la red. La simulación del comportamiento de ésta servirá para analizar, por medio de sus variables, que el funcionamiento sea adecuado. Tales variables bien podrían ser la presión o gasto en un punto determinado de una tubería de la red de distribución. Este tipo de métodos, requieren mucho trabajo de oficina, la compilación de información de la red, disponer de datos geográficos, planos y topografía, y que la información esté completa entre otros detalles; las normas del sitio donde se encuentra la red son importantes, también, para no incurrir en faltas. Se analiza el comportamiento de las variables y, bajo criterios establecidos, por las ecuaciones del comportamiento hidráulico, se observan las relaciones entre las variables o balances de agua, de tal manera que el objetivo, que es determinar si hay existencia de fugas en la red, sea cumplido. La mayoría de estos modelos deben tener una base de funcionamiento, como lo es el propio funcionamiento de la red de distribución de agua.

**Métodos heurísticos:** La heurística es una ciencia que estudia los procesos de decisión respecto a un campo de conocimiento concreto, como lo son las estrategias cognitivas. Su contrapartida formal en computación es el algoritmo. Por heurística se entiende una estrategia, método, criterio o truco usado para hacer más sencilla la solución de problemas difíciles. Los problemas de complejidad importante tienen un gran interés por ser resueltos de una manera práctica, lo que permitió el surgimiento de algoritmos capaces de ofrecer soluciones que, aunque no tengan el resultado óptimo, se acercan bastante con un tiempo de cálculo razonable. No todos los resultados son favorables, en ocasiones la respuesta

demorará o incluso podría ser errónea, pero por lo regular generan buenos resultados. Un método heurístico tiene un conjunto de pasos que se deben llevar a cabo para identificar en el menor tiempo posible una respuesta de calidad a un problema determinado.

**Métodos estadísticos:** La estadística es una ciencia formal que puede definirse como un método de razonamiento, que permite interpretar datos que, como característica principal, tienen la variabilidad. En investigación, su finalidad es utilizar datos obtenidos de una muestra, para realizar inferencias válidas para una población por medio de recolección, recopilación e interpretación de datos. También es considerada una técnica especial apta para el estudio cuantitativo de los fenómenos de masa. Por ejemplo, mediante un histórico de datos, se puede generar un modelo estadístico de la red en buen funcionamiento. Cuando nuevas mediciones se desvíen del mismo, podría ser indicativo de una fuga.

**Redes neuronales artificiales:** Las redes neuronales, son modelos computacionales que han sido inspirados en el funcionamiento de la red neurológica de un cerebro biológico, donde cada unidad neuronal se conecta a otras y los enlaces se pueden aplicar en su efecto sobre el estado de activación de unidades neuronales conectadas. El objetivo es modelar libremente la forma en que el cerebro humano resuelve problemas. En su versión de clasificadores, pueden ser entrenados mediante datos, para determinar si hay fugas o no.

**Algoritmos genéticos:** Son métodos adaptativos en una serie de pasos organizados, que describen un proceso que se debe de seguir para ajustar un modelo que lleve a la solución de un problema específico. Son llamados así, porque se inspiran en la evolución biológica y su base genético-molecular, haciendo evolucionar a una población de individuos, sometidos a acciones aleatorias, como lo son mutaciones y recombinaciones genéticas (evolución biológica), más una selección bajo algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos que sobreviven, que son los más adaptados, y los menos aptos que se descartan. Permiten el ajuste de modelos cuando se ha determinado una función de coste sobre la bondad del modelo de ajuste.

La importancia de los métodos de evaluación no destructiva, se ve reflejada, entre otras cosas, en maximizar la localización de existencia de fugas y minimizar el porcentaje de error de la localización de la fuga. Lo anterior ya que, una vez localizada, lo que sigue es la reparación de esta, acción que requiere de determinadas obras que requieren tiempo, un recurso económico en función de la magnitud de la fuga, caos y ruido en la zona, ya que las acciones a realizar no suelen ser cómodas en el día a día de las personas. De alguna manera, interpretar que las técnicas o métodos de evaluación no destructiva parten de una definición general hacia una específica, es difícil de asimilar, ya que se observa una diferencia importante: los modelos que llevan a cabo simulaciones "computacionales" conllevan mucho trabajo de oficina, mientras el uso de instrumentos "físicos" implica también trabajo físico, en la red para determinar las fugas; así, la diferencia se hace notar en los dos capítulos siguientes.

Las diferentes técnicas existentes nos dan la opción de combinar métodos, de generar un protocolo combinado de trabajo, dando por resultado una herramienta más robusta. Hasta este punto, nuestras miras van en ese sentido, aunque falta mucho trayecto de estudio en este sentido, tenemos claro que la opción existe y es viable.

## ***2.4. Evolución de la tecnología y adaptación de los seres humanos a ésta***

Hay tres puntos importantes que quiero resaltar por el impacto que representan:

- La evolución de la(s) tecnologías, en la última década y su crecimiento exponencial
- La adaptación del ser humano a dichas tecnologías
- Las consecuencias de la facilidad de adquisición de información

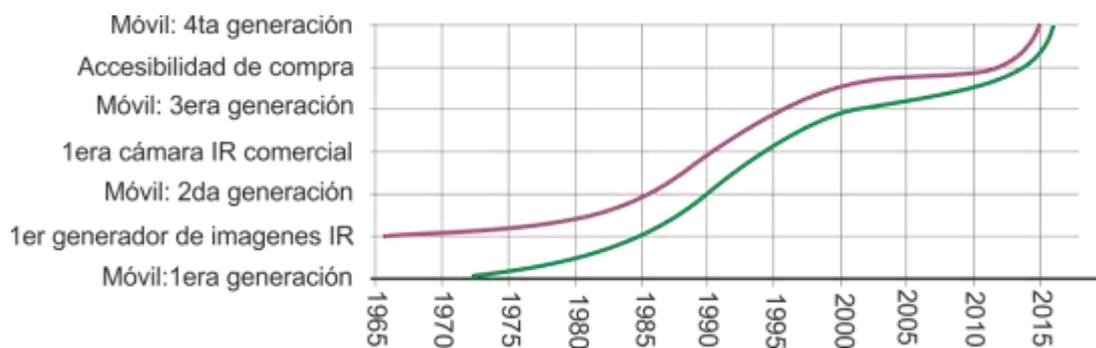
Existen diferentes áreas tecnológicas que se relacionan entre sí; mas, sin embargo, cada una de ellas se desarrolla de forma independiente, con una velocidad propia. En ocasiones, esta velocidad está ligada a la demanda del producto a título; de hecho, se ha demostrado que existe una estrecha relación entre el avance de una tecnología y la demanda de la misma, que al ser consumida, genera recursos para invertir en más investigación, creando un bucle de crecimiento. Por citar un ejemplo, tenemos a la telefonía móvil, que a pesar de que el primer modelo surgió en los 70's, su comercio tiene apenas 30 años, donde sus diferentes variables de "interés", como peso, costo y utilidad han evolucionado de manera tal, que la facilidad de adquirir un dispositivo de estos está en aumento para la población. El móvil tiene una tecnología en avance exponencial requerido y deseado por la mayoría de la población, pues no solo ofrece las características del móvil en sí; tiene adheridas diferentes posibilidades de uso, claro que depende del modelo del móvil; pero la tendencia va en ese sentido, en una corriente tecnológica y social. La posibilidad de que una "app" (una aplicación de software que se instala en dispositivos portátiles como teléfonos móviles o tabletas, para ayudar al usuario en una labor concreta, sea está, profesional o de ocio) realice una acción de interés para el usuario, dé una localización o aporte imágenes, hace que se invierta en su investigación, desarrollándose más deprisa que otros dispositivos. Durante la etapa de investigación de esta tesis, se vislumbró la posibilidad de aprovechar esta herramienta como apoyo, en el envío y análisis de imágenes IR, ya que la app de FLIR para móvil, funciona bien, más requiere equipo más sofisticado.

La adaptación del ser humano a estas tecnologías también ha dejado en claro la posibilidad de la facilidad de trabajo con ellas (unas técnicas más que otras). Más aun así, basta la familiarización con ellas, para trabajar con ellas de forma fluida, adquirir información y compartirla. Esta ha sido una de las preocupaciones de los seres humanos, ya sea por la necesidad de comunicación o para resolver problemas a pequeña y gran escala; en el presente, compartir información se ha vuelto de suma importancia, ya sea por cuestiones de trabajo, de investigación o de esparcimiento. La facilidad que está resultando adquirir y compartir ficheros (imágenes, audio, archivos digitales), ya sea de forma más personal (por unidades USB) o por servicios de red (como correo electrónico, la nube y sus diferentes servicios de alojamiento), hacen de la tecnología un instrumento deseable para su uso. Más así como los beneficios que posee, el riesgo existe también, la facilidad de adquisición de información, la adquisición excesiva de ésta, y la necesidad de analizarla que podría tornarse un problema debido a la cantidad o al mal filtro de ésta; he aquí que la adquisición de información se vuelve una responsabilidad.

He citado el ejemplo del móvil, ya que dentro del mantenimiento de las redes de distribución de agua, para la detección de fugas en nuestro día a día, el móvil ha sido herramienta de apoyo para los técnicos, utilizada para comunicarse por medio de una llamada, y para el envío de datos de ubicación, archivos y documentos. En nuestros días, la posibilidad de usarlo para adquirir imágenes en nuestro trabajo ha sido contemplada; para adquirir IRs por medio de un móvil, hace falta un dispositivo propio de FLIR, que implica

un costo, por lo que, simplemente se hicieron pruebas con la *app* y las imágenes obtenidas con la cámara, con resultados favorables; así, nos quedamos con esa experiencia sin entrar a más detalle, ya que, a pesar de todas las ventajas que representa, se encuentra en segunda posición es decir, la forma de obtención de imágenes es secundario. Además, el dispositivo tiene un costo económico, que no era posible cubrir; sin embargo, existen ya vínculos de *app*'s con termografía por parte de la casa FLIR que permiten la interacción por medio de las imágenes, las cuales pueden ser enviadas al móvil, tableta, ordenador o cualquier dispositivo que soporte la aplicación y ser enviada y recibida por los mismos dispositivos, utilizando los servicios de red, incluso mensajes multimedia o alguna red social.

La relación usuario – tecnología, se ha estrechado depositando en el dispositivo de telefonía móvil, la responsabilidad de llevar a cabo tareas que antes no lo hacían (morales y psicológicas), más no dejan de tener un valor simbólico de pertenencia de clase, además de la utilidad que se le pueda dar en investigación. El móvil que existe desde hace solo 30 años, se puede comparar con la tecnología IR, surgida desde 1960, pero el auge comercial se sitúa a partir del 70. La Figura 2.4, muestra la comparativa de evolución, entre el móvil y la cámara de infrarrojos, hasta hoy en día, por ello serían una excelente mancuerna de análisis para el mantenimiento de redes de abastecimiento; en la figura se puede ver el avance la comparación del avance tecnológico entre estas tecnologías.



**Figura 2.4 Comparativa desarrollo tecnológico entre móviles y cámaras termográficas**

La figura muestra una comparativa del desarrollo de la tecnología. En ambos casos es un crecimiento respecto al tiempo, con la diferencia de que dicho crecimiento se ve reflejado en las propias variables del instrumento. Curiosamente, otra vez, en ambos casos, el tamaño, peso, capacidad y costo son variables que se repiten, sin embargo con una diferencia notoria: el propósito de uso, quedando reflejado esto en la magnitud de desarrollo en el tiempo de forma notoria en un corto periodo de tiempo (entre 1985 y 1990, hubo un desarrollo importante en la tecnología infrarroja). Una de las variables más importantes es el costo que tienen los dispositivos: en el inicio de su comercialización, un móvil costaba casi 4000 dólares, mientras una cámara termográfica rondaba los 20000 euros o más; ahora un móvil se puede conseguir por menos de 300 euros y una cámara termográfica por menos de 3000 euros; y, aun así, existen gamas en ambos.

Las fugas en las redes de distribución de agua generan pérdidas, reducen la eficiencia de la red y ocasionan una derrama económica a los organismos operadores. El tema de detección de fugas no es tan simple: a menos que sea visible, su localización no suele tenerse con exactitud, desconociendo también la magnitud; es por ello que las fugas no reparadas son mayoritariamente las no visibles. La posibilidad de identificarlas resulta ser muy atractiva,

aún más si la detección es sencilla; aquí es donde juega un papel importante la tecnología, al tener la posibilidad de echar mano de ella para mitigar las pérdidas de agua. Bastará familiarizarnos con ella, para darnos cuenta que tiene el potencial y lo que requeriremos para echarla a andar.



### **3. EL PROBLEMA DE FUGAS DE AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN**

#### ***3.1. Crecimiento de la población, la demanda de agua y la carencia de concienciación***

Es un derecho de los seres humanos que les sean cubiertas las necesidades fisiológicas. La Constitución Española de 1978 [4], en su artículo 47 reconoce el derecho a la vivienda. En el derecho a la vivienda hay que valorar una serie de aspectos. En primer lugar, estamos ante un derecho social en sentido estricto, es decir, se trata de un derecho que no se configura como subjetivo y que, en consecuencia, no confiere a sus titulares una acción ejercitable en el orden a la obtención directa de una vivienda "digna y adecuada".

Consecuencia de lo anterior, y al igual que los derechos reconocidos en el Capítulo III del Título I, "De los principios rectores de la política social y económica", el art. 47 actúa como un mandato a los poderes públicos en cuanto que estos están obligados a definir y ejecutar las políticas necesarias para hacer efectivo aquel derecho, configurado como un principio rector o directriz constitucional que tiene que informar la actuación de aquellos poderes (STC 152/ 1988, de 20 de julio, FJ 2).

El segundo aspecto del derecho reconocido por el art. 47 se centra en su regulación específica, que presenta una complejidad verdaderamente extraordinaria por la confluencia de dos factores, el objeto regulado y la pluralidad de fuentes normativas.

La necesidad de precisar minuciosamente el derecho a la vivienda deriva de la superación del concepto de la vivienda únicamente como objeto de la propiedad privada para pasar a ser considerado uno de los elementos básicos para la existencia humana; ello ha llevado a la necesidad de regular no solo la vivienda en cuanto edificación (inmueble) sino también la vivienda en cuanto conjunto de bienes que constituyen "el derecho a disfrutar de una vivienda digna y adecuada". El disfrute, como objeto directo del derecho, incluye la regulación del conjunto de elementos que, junto al inmueble, permiten hacer efectiva la consideración de la vivienda como digna y adecuada (urbanización, servicios, seguridad, condiciones higiénicas, etc.), siendo este el elemento clave del derecho, con independencia del título en virtud del cual se disfrute la vivienda (propiedad o arrendamiento). La consecuencia es doble. Por una parte, el tratamiento de la vivienda como función pública y no como objeto exclusivo del derecho privado; por otra parte, la consideración de que del art. 47 se deriva la necesidad de abordar una política social en materia de vivienda como fórmula para que importantes sectores de la población, con recursos económicos limitados, puedan acceder a una vivienda digna.

Es por ello que el desarrollo normativo del art. 47 puede contemplarse en la doble óptica que enmarca la compleja materia que integra el derecho urbanístico, por una parte, y en cuanto objeto de protección específica de las Administraciones.

Hay que hacer notar que la legislación sobre la vivienda tiene una especial complejidad que deriva del enorme número de normas que la componen, de los cambios permanentes a los que dichas normas están sometidas y del número de fuentes normativas que inciden especialmente en la regulación del derecho urbanístico dada la pluralidad de los entes

públicos competentes en la materia. La obligación que el art. 47 impone a los poderes públicos se precisa en el art. 148.1.3ª CE al establecer que las Comunidades Autónomas podrán asumir como competencia exclusiva "la ordenación del territorio, urbanismo y vivienda", competencia que ha sido efectivamente incluida en todos los Estatutos de Autonomía.

Por ello, junto a la normativa autonómica habrá que considerar la existencia de un derecho estatal sobre la materia, así como la normativa municipal que derive de la articulación de las competencias de gestión y ejecución urbana que la legislación sobre régimen local, especialmente la Ley Reguladora de las Bases del Régimen Local de 1985, atribuye a los Ayuntamientos.

He aquí que, por ley, debemos ser provistos de los servicios denominados básicos, electricidad, gas y agua. Sin embargo debemos ser responsables de cubrir el costo del recurso utilizado. Los asentamientos humanos regulados están provistos con los servicios básicos, más la población va en aumento y con ello, el surgimiento de nuevos núcleos familiares, que se traduce en la necesidad tácita de un nuevo sitio para vivir, que implica, a su vez, el crecimiento de las poblaciones. Las necesidades de la población aumentan y la demanda de estos servicios también. Lo anterior es una verdad visible y, con ello, aumenta también la demanda de los recursos naturales y artificiales, que repercuten en la necesidad de explotación eficiente de los recursos. El agua es uno de ellos; es necesaria para producir alimentos, de forma directa e indirecta, necesaria para la generación de energía y para el consumo humano. Esto nos empuja a una insuficiencia de recursos derivados de la necesidad de consumo, con lo que se puede crear un desbalance entre las demandas del recurso y el recurso existente por sí mismo. En el caso del agua, puede causar daños irreparables.

La necesidad de más agua, su creciente demanda y extracción conlleva de manera obvia a la necesidad de ampliar las redes de agua potable. Aunado a esto, la edad de las redes también repercute, ya que las redes existentes envejecen y su funcionamiento se deteriora al aumentar la probabilidad de fugas; así mismo, una gestión incorrecta de la red de abastecimiento y un mal funcionamiento son factores que comprometen el rendimiento de la red.

No es únicamente la edad de la tubería la que determina el bajo rendimiento de la red de agua potable y la incorrecta gestión de los abastecimientos; influye también el desconocimiento del sistema de abastecimiento de agua, la falta de información acerca de la red, así como la ausencia de información real de la configuración de la red. Esto último se refiere a: planos e información incompleta, como son distribución de los diámetros de tubería, la edad de la misma, los materiales de los que está compuesta la red y su ubicación, información sobre el funcionamiento de válvulas, bombas y otros accesorios. Aún así, con esa carencia de información que pareciera por igual en todas las comunidades, no impide que algunos gestores del abastecimiento de agua dan un mejor servicio que otros, pese a las inconveniencias que presente la población. Esto tiene relación con algunas variables, como lo son el tamaño de la población, la antigüedad de la red en sí, la tecnología con la que cuentan los organismos o empresas especializadas, mejores equipos, técnicos más capacitados elementos que en alguna medida afectan el costo del servicio. Mientras que, por ley, el agua es un recurso sin costo, no así lo son, la infraestructura y el mantenimiento para la entrega de esta.

Cerca de 1200 millones de personas viven en áreas donde el agua escasea físicamente (The United Nations World Water Development Report 2015; UN-Water y FAO, 2007) [5]. El acceso limitado al agua por parte de los pobres puede ser fruto no solo de presiones económicas, sino también de presiones sociopolíticas y ambientales, de gobernanza y capacidades humanas débiles, y de una falta de infraestructuras (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007) [6]. En México, por citar un ejemplo, uno de los factores que peor influyen en los problemas relacionados con el agua es su distribución. La carencia de información y los cambios de personal en los ayuntamientos entorpecen el buen funcionamiento, gestión y pago del servicio, cuando en ocasiones basta con especificaciones técnicas para la implementación de redes de distribución de agua potable en zonas rurales o citadinas.

### 3.2. Caracterización de los sistemas de distribución de agua potable

Una red de distribución de agua es el conjunto de tuberías y elementos de maniobra y control que permite el suministro de agua a los consumidores. Está constituida por una variedad de elementos, siendo las tuberías el elemento principal que transporta el agua. El resto de los elementos son secundarios y solo ayudan en la distribución, regulando, controlando y midiendo. La red de distribución comienza a la salida de la planta de tratamiento de agua y termina en el punto de conexión (llave de registro) con la instalación interior de suministro.

Las redes de distribución de agua tienen una estructura según su función y tienen una relación directa con la serie decreciente de los diámetros con el fin de ajustarse a la distribución de consumos. Su estructura se muestra en la Figura 3.1 de forma generalizada, ya que existen más tipos de redes. Lo importante en una red es que ha de tener capacidad suficiente para suministrar, distribuir, reducir pérdidas y hacer frente a situaciones imprevistas.

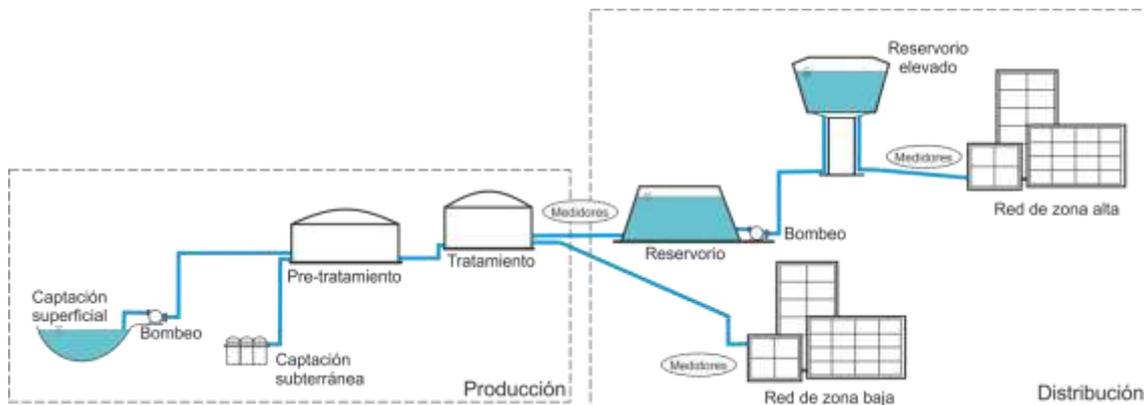
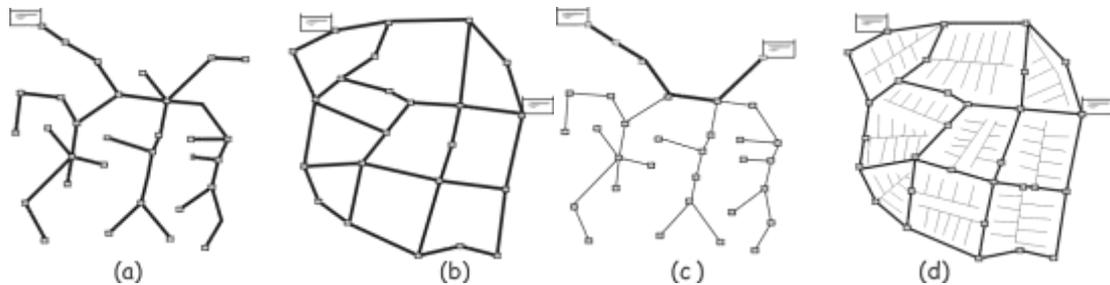


Figura 3.1 Niveles en que se clasifica una red de distribución de agua

Desde el punto de vista topológico, una red se puede definir como ramificada o mallada, sea bien por su ubicación o por función. Una red ramificada se caracteriza, por una forma arborescente, cuyas líneas se subdividen formando ramificaciones. Las propiedades topológicas de una red ramificada consisten básicamente en que no poseen mallas y que dos puntos de consumo cualesquiera únicamente pueden ser conectados mediante un único trayecto. Las redes malladas se caracterizan por la existencia de mallas; una malla es un trayecto cerrado que tiene su origen y final en un mismo punto; en una red mallada pura puede definirse un conjunto de mallas. La configuración de red mallada pura no es muy habitual,

siendo la morfología más común la que se denomina red mixta, que combina subsistemas de topologías malladas puras y ramificadas (ver Figura 3.2).



**Figura 3.2** Ejemplos de red ramificada (a), mallada (b), mixta (c, d)

### **3.2.1. Características generales.**

Toda la red de distribución de agua está formada, dicho de manera meramente orientativa y dependiendo de su rango, en:

- Tuberías
- Depósitos
- Bombas
- Elementos singulares
- Complementos

**Tuberías.** Elementos de sección transversal interior, uniforme en forma de sección circular y que, en sentido longitudinal, generalmente son rectos. Se definen por su diámetro, material y tipo de junta. Dependiendo de su comportamiento bajo carga, se distinguen los tipos siguientes: tubo flexible, tubo rígido, tubo semirrígido. En su composición se consideran como elementos de las tuberías las uniones, que son dispositivos que permiten enlazar de forma estanca dos elementos consecutivos de la tubería. Estas pueden ser uniones flexibles, uniones rígidas, uniones autotrabadas o resistentes a la tracción, uniones no autotrabadas o no resistentes a la tracción.

**Depósitos.** Los depósitos dentro de una red de distribución tienen las funciones de almacenamiento y de regulación de caudales y presiones. La capacidad de los depósitos de una red de distribución viene definida por la posición de equilibrio entre el tiempo de abastecimiento cubierto, el tiempo medio de estancia en la red y el aspecto económico.

**Bombas.** Elemento necesario para dar presión a la red o elevar el agua al depósito.

**Elementos singulares.** Elementos distintos a los tubos, piezas especiales, válvulas, codos, té, uniones o elementos complementarios de la red, pero que forman parte también de la tubería (i.e., tornillos, contra-bridas, collarines de toma, etc.). También las piezas especiales, como los intercalados entre los tubos, permiten realizar cambios de dirección o de diámetro, derivaciones, empalmes, y las válvulas que, instaladas entre los tubos, permiten cortar o regular el caudal y la presión.

**Complementos** Es cualquier estructura, fundamentalmente, pozos, arquetas, cámaras de válvulas, macizos de anclaje, etc. que, intercalada en la red, permite y facilita su explotación.

Podemos clasificar a las distintas conducciones que forman parte de la red de distribución de la forma siguiente:

- Red de transporte
- Red arterial
- Red secundaria
- Acometida

**Red de transporte:** Está constituida por las conducciones que transportan el agua desde la planta de tratamiento, depósitos de regulación o estaciones de bombeo, alimentando a la red arterial. Generalmente, la conforman los conductos de mayor diámetro y no se permite que desde la misma se realicen acometidas para los suministros, bocas de riego y tomas contra incendios.

**Red arterial:** Está constituida por las conducciones que enlazan diferentes sectores de la zona abastecida. Al igual que en la red de transporte, tampoco se permite realizar desde la red arterial acometidas para los suministros, bocas de riego y tomas contra incendios.

**Red secundaria:** Está formada por las conducciones que se conectan a la red arterial y de las que se derivan, en su caso, las acometidas para los suministros, bocas de riego y tomas contra incendios.

**Acometida:** Está formada por las conducciones que unen la red secundaria con la instalación interior del inmueble que se pretende abastecer.

### ***3.3. Problemas de las redes de agua potable***

Las redes de distribución de agua tienen problemas tales como la incorrecta gestión de la red y su mal funcionamiento; pero el problema principal son las fugas de agua. Las fugas representan inversión económica y tiempo, y traen consigo problemas de funcionamiento. De todas las fugas de agua existentes, las más perjudiciales son las que no se ven y, por tanto, se desconoce su ubicación en la mayor parte de los casos. Las fugas de gran tamaño afloran y son rápidamente reparadas; en un pequeño porcentaje, las fugas son visibles directamente, o se hacen visibles a partir de síntomas como podrían ser manchas de humedad superficiales, inundación de sótanos, inestabilidad del terreno, etc. La visibilidad de tales síntomas no quiere decir que se determine el punto preciso de la fuga, pues puede tratarse de pistas poco precisas en cuanto a la ubicación. Como herramienta auxiliar en la determinación de fugas en la red se dispone de diferentes métodos que permiten estimar el volumen de agua que se pierde, por medio de un balance hídrico: cuadrando entradas a la red y cantidad de agua provista registrada. Esto incluso puede delimitar de forma imprecisa el área donde pueden estar ubicadas las fugas de agua. Es evidente el gran interés que supone poder ubicar la fuga de forma precisa, rápida y por supuesto, económica, con el objetivo de repararla a la mayor brevedad. Por citar un ejemplo: una fuga del tamaño de un lápiz a presión de  $2 \text{ kg/cm}^2$ , llega a dejar perder  $40 \text{ m}^3/\text{día}$ . Esta cantidad podría permanecer oculta por semanas, meses e incluso años.

Dicho lo anterior, las consecuencias de una fuga son: la pérdida del recurso como tal, la pérdida económica que se genera debido al mal funcionamiento de la red de agua potable y,

en ocasiones, consecuencias destructivas. Por citar algunos ejemplos tenemos lo ocurrido en Ibiza en abril de 2016 [7], donde la rotura de una vieja tubería de pluviales abrió un socavón de cerca de un metro de profundidad, debido a que el agua que se fue filtrando a través de un agujero abierto en la tubería, acabó por remover la tierra situada entre el tubo y el asfalto, de forma que este acabó cediendo y abrió el socavón de unos 50 cm de diámetro; o en Madrid en enero de 2017 [8], una fuga de agua que ha causado un socavón al hundirse un trozo de la calzada; cuyo incidente ha sido provocado por el fallo de una tubería de 150 milímetros de diámetro que se ha roto de forma "fortuita" y ha provocado el hundimiento de 6 metros de calzada unos 45 centímetros. Más notas de prensa como estas se pueden encontrar, con mayor o menor magnitud de daño.

Colocando en contexto algunas de las problemáticas internacionales, tenemos que un cuarto del agua captada por la Compañía de Saneamiento del Estado de São Paulo (SABESP) en la Grande São Paulo se pierde en el trayecto entre la represa y los contenedores de agua de las casas y los edificios. La tasa es de 25% de pérdida. En ciudades de Japón y de Alemania, las pérdidas son cerca del 11%. En los Estados Unidos, la meta es de 16%. De los exactos 24.7% de pérdidas alcanzados en 2013, aproximadamente 60% de esa tasa es por vaciamientos en la red de la compañía de agua. Los 40% restantes son fruto del robo de agua.

En México se pierde aproximadamente un 40% del agua potable por fugas en redes, el 75% de esta cifra se va al drenaje, el resto se evapora y se filtra en el manto freático, según datos de reportes técnicos del IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua).

En España se pierde aproximadamente un 23%, calcula según datos obtenidos de estudios hechos por ASAGUA (Asociación española de empresas de tecnología de agua). Las fugas más importantes en el país obedecen a la antigüedad y defectos de los materiales de la red, como tuberías, conexiones o válvulas o a fallos en su instalación, según ASAGUA. En concreto, el 38% de la red de distribución de agua tiene una antigüedad de más de 30 años; el 27%, entre 15 y 30 años; y el 35%, menos de 15 años. En este sentido, subrayan, desde dicha asociación, que las inversiones en redes de distribución han descendido en los últimos años: mientras que en 2007 se invertían 700 millones de euros, en 2010 se pasó a 374 millones de euros. Y en dicho periodo, las pérdidas de agua se incrementaron del 24% al 25.9%.

Las exigencias del crecimiento sustentable que presentan las empresas del sector de aguas son un desafío para la producción y distribución eficiente de agua, planteando nuevas soluciones y estrategias en la operación de los sistemas de agua. Las pérdidas de agua en los sistemas de abastecimiento de agua son un problema que afecta a las empresas (distribuidores) y a los usuarios a nivel mundial ya que, a pesar de los avances tecnológicos, las pérdidas anuales de agua de los sistemas de distribución alcanzan el 38.8 %. Pueden afectar de diversas formas: la pérdida del recurso en sí, la reducción de eficiencia en las redes de agua potable y la pérdida económica ligada a lo anterior; aunado a esto no se le puede atribuir toda la responsabilidad a las fugas de agua en la red, existen otro tipo de pérdidas de agua que a continuación se describen.

### **3.3.1. Uso excesivo / Irresponsabilidad**

El uso excesivo del agua es una realidad incómoda. El fácil acceso al recurso, la falta de conciencia de que es un recurso no renovable, el descuido o la simple creencia de derecho del uso por el pago del bien, son factores que incrementan este tipo de pérdida.

Pueden llegar a ser frecuentes situaciones como las siguientes: dejar el grifo abierto al realizar actividades en el hogar, excederse en el uso de agua, no detectar a tiempo pérdidas en las instalaciones sanitarias del hogar. De este modo, por descuido, se pierde gran cantidad de agua, incrementando las facturas y dejando sin el recurso a más personas que lo necesitan. Olvidamos que como usuarios tenemos beneficios y obligaciones por lo que ser responsables tanto del pago del recurso como de la revisión del buen funcionamiento de las instalaciones del hogar, disminuiría las pérdidas de esta índole. Sucede que la población juega también un papel importante en el cuidado del agua: la educación es una especie de medida preventiva, pues en las sociedades se suele dar por hecho que el problema del agua lo resolverá el organismo en cuestión de aguas. En la Figura 3.3, se identifica la acción preventiva a realizar por el país para manejar esta parte del problema.



Figura 3.3 Relación uso del agua vs desarrollo del País

Hay una frase coloquial que citaré al respecto: tomar agua nos da vida, tomar conciencia nos dará agua, un juego de palabras que hace sentido en este caso.

### 3.3.2. Clandestinidad

El uso clandestino del agua se refiere al hecho de no reportar su consumo, por parte del usuario. Es decir, el recurso se obtiene por una conexión a la red sin medidor y sin que el sistema operador sepa de su existencia. Por tanto, el consumo de agua no puede ser medido, tampoco cobrado, y no se lleva a cabo el pago correspondiente por el agua consumida, cosa que perjudica: al funcionamiento de la red, al sistema operador de aguas e, indirectamente, a los usuarios, pues el pago de la factura del agua no corresponde al pago del agua como tal, sino a la infraestructura para hacer llegar el recurso a los usuarios, adecuándolo para su consumo. Si el organismo detecta algún fallo en el mantenimiento de la red, implica trabajo; pero se debe diferenciar la irresponsabilidad del daño intencional. La Figura 3.4, muestra la parte responsable de los usuarios que no es propiamente una fuga, más sí una pérdida.

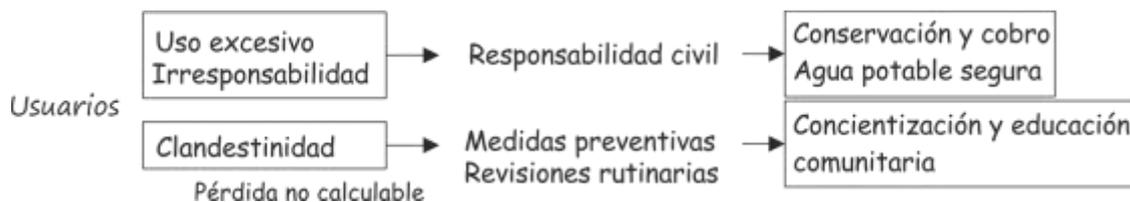


Figura 3.4 Pérdidas de agua por usuarios

Este tipo de pérdida afecta notoriamente ya que difícilmente es detectable a menos que se hagan sondeos regulares. En países como México o algunos de sud-América es una práctica

que afecta notoriamente a las colonias, sobre todo de las periferias de las ciudades más desarrolladas.

### **3.3.3. Fugas**

**Fugas como pérdidas físicas.** Las pérdidas de agua son los volúmenes de agua que se escapan en una etapa cualquiera del sistema de agua potable. Se manifiestan como fugas en las juntas de interconexión entre tuberías y elementos accesorios (piezas especiales, válvulas, ventosas, medidores, grifos), y fugas por fisuras, roturas, filtraciones y goteos en las diversas unidades del sistema. Estas fugas pueden ser visibles y son, en apariencia, de fácil detección, debido al rastro de agua que generan por su afluencia a la superficie, que pueden ser reparadas. Sin embargo, tenemos que las fugas en el caso más desfavorable sean no visibles y por tanto una pérdida más complicada de localizar y de mitigar.

Las causas por las que se genera una fuga son función de varios factores. Se destacan entre ellos:

- Las causadas por defectos en el ensamble, defectos en uniones, sellos imperfectos, defectos en soldaduras, empaques mal colocados, por instalaciones defectuosas.
- Presiones internas, que son aquellas a que están sometidas las tuberías internamente, presentando tres situaciones distintas en cuanto a magnitud. Presiones dinámicas: ocurren en condiciones normales de escurrimiento del agua; presiones estáticas: son de mayor magnitud que las dinámicas y ocurren en condiciones de interrupción del escurrimiento del agua; sobrepresiones: son aquellas generadas cuando ocurren cambios bruscos en las condiciones del escurrimiento del agua, provocados por corte de energía, o cierres rápidos de válvulas. Son las llamadas presiones de golpe de ariete, que muchas veces llegan a sobrepasar en varias veces a las presiones normales de trabajo (dinámicas).
- Calidad de materiales y procesos constructivos, factores definidos en el diseño y especificados en función de la presión a la que estarán sometidas las tuberías, piezas especiales y elementos estructurales. El empleo de material y procesos constructivos inadecuados y la falta de control de calidad hacen que los sistemas se tornen más vulnerables a las roturas, filtraciones, corrosiones o incrustaciones, generando una mayor probabilidad de pérdidas. El estado de conservación de cada tipo de material es función del tiempo de servicio y de los procedimientos de mantenimiento utilizados, en ocasiones algún defecto que haya pasado inadvertido, por los controles de calidad.
- Factores externos como lo son raíces y/o piedras del terreno que entran en la tubería. Las micro fisuras en tuberías de asbesto-cemento generan humedad en el terreno, atrayendo raíces de árboles que con su crecimiento provocan roturas. Los cambios de humedad propios en el suelo. Las que piedras ingresan dentro de la tubería y pueden provocar daños. Los movimientos de tierra, hundimientos, heladas. Las intervenciones externas en el casco urbano, para instalación y reparación de servicios públicos (gas, aguas pluviales, alcantarillado, teléfono) que generen daño a las tuberías. En ocasiones esto es generado por la inexistencia o deficiencia de un catastro técnico, asociados a negligencias técnicas y constructivas. Las presiones generadas por el tráfico de vehículos y sobrecarga del relleno sobre las tuberías, o la utilización de procesos o materiales inadecuados, daños causados por excavaciones, roturas debidas al tráfico, filtración de sustancias corrosivas o la conductividad del suelo que decanta en corrosión.

- El tipo de suelo también influye si presenta compuestos agresivos para los materiales empleados en las tuberías o en las piezas utilizadas, la permeabilidad del suelo puede ser también un factor que provoque desplazamientos en la tubería. También los efectos de movimientos sísmicos sobre determinados tipos de suelo y de tubería pueden provocar roturas. En la Figura 3.5 se muestra a modo de resumen general recuadros con elementos relacionados con las fugas, causas y sitios donde pueden ocurrir, variables y consecuencias en torno al tema fuga.



*Método y aparato de detección de fuga.*

*Dependencia con el tipo de fuga*

**Figura 3.5 Elementos involucrados en las fugas de agua en redes de distribución**

**Fugas como pérdidas operacionales.** Estas ocurren cuando el volumen de agua se pierde por rebalse o desagües en una etapa cualquiera del sistema, como consecuencia de fallas en su control operacional que bien podrían ser evitadas.

**Consumos operacionales:** Son los volúmenes utilizados en una función operacional como el lavado de unidades, desagüe o expulsión de aire en tuberías, a pesar de no ser facturada, representa una pérdida inevitable para el funcionamiento del sistema.

**Pérdidas económicas:** Son los volúmenes de agua consumidos por los usuarios pero que no son registrados o estimados por la empresa y, por lo tanto, no son facturados y constituyen una pérdida de ingreso para la empresa.

**Fugas como pérdidas por errores de medición.** Los medidores de agua potable presentan errores asociados al registro de volúmenes, los cuales son función, principalmente, de la

estructura de consumo, del tipo de medidor utilizado, calidad del agua y volumen acumulado en el transcurso del tiempo. Las pérdidas por errores de medición pueden deberse a la insensibilidad debido a la tendencia sistemática que presentan estos instrumentos a subvalorar la medición cuando los caudales de consumo son inferiores a su límite de sensibilidad: al sub-contaje e imprecisión en los micromedidores, debido a su descalibración natural provocada por el tiempo de uso; a la falta de limpieza o de sustitución de las piezas y las pérdidas por ausencia de medición en caso de ausencia de micromedidores, o cuando estos se encuentran detenidos. Es decir, en todos los casos, un volumen consumido no registrado correspondiente a la diferencia entre los volúmenes que son realmente consumidos y aquellos estimados por la empresa para efectos de facturación.

**Fugas como pérdidas por consumo fraudulento.** Corresponde a los consumos de agua a través de conexiones clandestinas y que no son medidos o estimados por la empresa. Pueden ocurrir a lo largo de las tuberías y de los elementos accesorios (piezas especiales, válvulas, ventosas o grifos) de las etapas de producción y distribución. Los más comunes se producen en esta última etapa, donde se caracterizan como: medidor invertido, arranques conectados clandestinamente y *bypass* del medidor.

**Fugas como consumos de utilidad pública.** Cuando la empresa permite la extracción gratuita de agua desde los grifos para: extinción de incendios, regadío de áreas verdes, lavado de calles y entretenimiento.

Los métodos de detección de fugas son variados siendo los de uso más frecuente:

- Detección de fugas por caída de presión
- Detección por medio de distritos hidrométricos
- Detección de fugas por medios acústicos
- Detección de fugas por medio de GPR

La responsabilidad del organismo operador culmina en las acometidas de los domicilios particulares, con lo que le corresponde únicamente el mantenimiento de la red de agua potable, aminorando sus pérdidas.

El tamaño de la fuga y la forma de la rotura (grieta, fisura, poro, perforación, rotura, etc.) son diferentes, desconocidas y no uniformes, lo que imposibilita determinar, tamaño, geometría, excepto bajo una condición controlada de laboratorio. ¿Cómo definir el tamaño de la fuga?

Aunado a todo lo anterior existe un problema surgido que no es muy evidente pero que afecta de forma determinante: la reserva de agua subterránea se está reduciendo a un ritmo muy acelerado, debido al consumo de agua de la población. Como ya se ha expuesto, si la población aumenta, la demanda también y, por ende, la extracción, generando en ocasiones una sobreexplotación con efectos negativos, acrecentando el fenómeno de salinización que existe en las zonas costeras, que hace que tengamos también agua con un deterioro en su calidad, más un deterioro en la calidad de su servicio. La sobreexplotación también lleva efectos negativos, los más importantes asociados son:

- Desaparición de manantiales, vegetación nativa, humedales, lagos, gasto base de ríos y ecosistemas locales.
- Reducción del gasto de los pozos y afectación en su vida útil.
- Deterioro de la calidad del agua subterránea (intrusión salina).

- Abatimiento del nivel del agua subterránea, lo que ha inducido el incremento de los costos de extracción debido a mayores consumos de energía eléctrica.
- Asentamiento y agrietamiento del terreno.
- Disminución de la rentabilidad de la actividad agrícola.

### ***3.4. Enfoque del problema y planteamiento de la solución***

Nuestro problema se reduce a la invisibilidad de las tuberías y de las fugas. Esto implica la determinación de la existencia de las fugas, la ubicación, la cuantificación y, por supuesto, su erradicación. Este último punto incide en la reparación física de la tubería, que es independiente de los puntos anteriores. La complejidad del problema aumenta con la carencia de información sobre las redes de distribución de agua, la distribución de las tuberías, diámetros, y el funcionamiento de la red. Así como existen sistemas súper automatizados que permiten saber en qué momento trabaja cada sector, existen redes de las que apenas se tiene información, operan porque tenían años operando y se mantienen en funcionamiento. Para plantear la solución, se consideran muchas opciones de funcionamiento; desde una red de abastecimiento de agua a la cual debe acudir el técnico a capturar información durante su funcionamiento, hasta la red automatizada que reporta los resultados de forma casi inmediata, es decir hace transmisión en tiempo real. Así, una primera etapa, o acercamiento a la obtención de la solución por medio de termografía se establece en la presente tesis, estableciendo procedimientos necesarios para la identificación de infraestructura enterrada. Esto es, de las tuberías, como elemento principal de estudio, y algunos otros componentes, como elementos secundarios; la segunda etapa correspondería a la identificación de fugas y la determinación de su magnitud.

Algunas justificantes de la aplicación de estos procesos son:

- Influencias de los usos de la red en la termografía; es decir si tiene temperatura
- Necesidad de sectorización, para su estudio
- Cómo hacer el cálculo de estela de calor, en caso que se presente
- Extensión del sitio en estudio (relacionado con tiempo de toma, sector, condiciones climatológicas), también la localización, msnm, habitantes, exposición de red de agua, validez de diagnóstico.

Otro de los propósitos secundarios de la tesis, es proponer una rutina de mantenimiento que se pueda llevar a cabo, para completar o cotejar la información disponible del sistema de abastecimiento de agua y de evitar daños (o fugas) en las tuberías. Así mismo, y, en la medida de lo posible, disminuir tiempos muertos (de no servicio), así como reducir costes asociados a fallos. Por citar un ejemplo, en Suecia, los operadores llevan a cabo rutinas en algunos distritos de agua termal utilizando la termografía como una medida preventiva. Se dispone de rutinas de mantenimiento establecidas, por lo que algunos operadores prefieren llevar a cabo estas revisiones de rutina en primavera para poder visualizar las incidencias acaecidas en invierno, cuando la carga es elevada, debido a la demanda. Dado el clima de la zona es más sencillo arreglar la tubería en verano, y realizar otro chequeo preventivo en otoño, para reducir los desperfectos para el siguiente invierno, cuando la demanda vuelve a ser mayor, aunque estas rutinas están enfocadas a las tuberías localizadas sobre plano, es decir, que se conoce su ubicación a priori.

Puesto que nuestro objetivo es hacer rutinas de mantenimiento de la red sin la variante térmica, las opciones en tiempo de arreglo de desperfectos son mayores. La Figura 3.6 expone la estrategia de trabajo que proponemos.

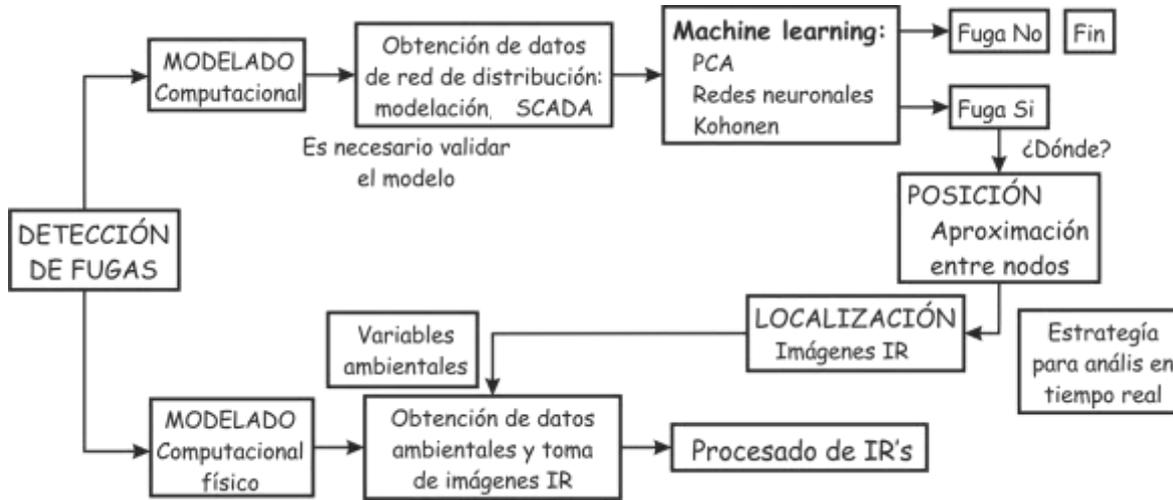


Figura 3.6 Estrategia planteada para la identificación de fugas

### 3.5. Objetivos generales y específicos

Una fuga se desarrolla en etapas, cuando no existe, cuando comienza y se desarrolla, y cuando lleva un tiempo desarrollada, es decir, cuando se "integra" con el material de su alrededor, humedeciendo el material y llevándolo al equilibrio con el sistema (la red de distribución de agua, el ciclo hidrológico y el intercambio térmico) lo que hace que sea más complicada la visualización local si la fuga no es obvia. La etapa de la fuga en que se capturen las imágenes será cuestión de azar, donde la última etapa hará más difícil la identificación de la fuga al estar integrada la fuga en el entorno. Pondremos énfasis en que los cambios de temperatura son los que favorecerán la visualización de la estructura en las imágenes adquiridas por la cámara termográfica, siendo favorables los contrastes para ello.

**Generales.** Como un objetivo muy general, se desea elaborar una herramienta que sirva de auxiliar en el mantenimiento del buen funcionamiento de las redes de distribución de agua, que sirva para complementar información (si es que existe faltante) identificando tuberías además de la localización de fugas, para su posterior mitigación. Los frentes que atacan los diferentes procesos de la presente tesis son varios, con la posibilidad de ser aplicados como metodología o como herramientas independientes. Haciendo uso de termografía, sus imágenes y *machine learning classifiers*. Esta metodología será útil, bien sea simplemente con fines de catastro o para el mantenimiento de la red de abastecimiento.

**Específicos.** Como objetivos específicos, se trata conocer y profundizar en las técnicas existentes para el análisis con imágenes termográficas, en primera instancia, y, posteriormente, de establecer protocolos para el análisis de imágenes de infrarrojos y termogramas, su interpretación y aplicación con buenos rangos de visualización.

Construir un proceso que contemple identificar las relaciones entre las variables ambientales que intervienen en la imagen, ya que además de proveer calidad a las imágenes, son las que marcan los rangos de visualización de los elementos en la imagen. La temperatura varía

cada año de forma estadística por se puede trabajar con datos en el tiempo de su comportamiento, con el propósito de mejorar la visibilidad de los elementos en la imagen.

Por medio de datos obtenidos de la red de distribución de agua identificar zonas que posiblemente alberguen fugas, y dichas zonas posteriormente puedan ser aisladas y estudiadas por medio.

Visualizar, ajustar y procesar imágenes de infrarrojos obtenidas con la cámara termográfica, y sus respectivos termogramas para visualizar zonas que se desee estudiar aislando de forma automática. Estos objetivos, en apariencia sencillos, nos permitirán enfocar el trabajo en un futuro para nuevas aplicaciones, por medio de la combinación de tecnologías.

Para una futura línea de estudio se busca validar el uso de la cámara para una zona específica por medio del NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*, por sus siglas en inglés), este objetivo surgía a raíz del estudio de las imágenes en una etapa avanzada que resulta ser de mucho interés para lo que hacemos, y se menciona en el capítulo 6.

Anteriormente se ha trabajado realizando un análisis a una muestra de imágenes para la visualización e identificación de tuberías enterradas y elementos que se encuentran en la composición de la imagen termográfica. Con una metodología clara y sencilla, aplicada exclusivamente para esas imágenes, involucró la elaboración de un algoritmo en MATLAB para el proceso de las imágenes, trabajando realmente los termogramas como matrices, considerando la información cualitativa y cuantitativa ligada a la imagen. Así, existía una base que servirá de apoyo para cumplir los objetivos.



## **PARTE II: Las herramientas**



## 4. TERMOGRAFÍA COMO END

La termografía, como se mencionó en el capítulo anterior, se encuentra entre las técnicas de ensayo no destructivo, tanto para defectos superficiales como volumétricos. Por lo anterior, y por todas las ventajas que se describen en este capítulo, es que apostamos por ella, al tener potencial para cumplir nuestro objetivo. Para entender la termografía y familiarizarnos en la forma que la aplicaremos, esta parte es muy descriptiva.

### 4.1. La termografía, su historia y evolución

El primer principio de la termodinámica enuncia, “la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”, siendo la energía la capacidad de llevar a cabo un trabajo y el calor una transferencia de energía. Esta definición se conoce como una de las leyes fundamentales de la Física. Todo sistema al pasar de un estado a otro, produce manifestaciones de alguna transformación de la energía por medio de fenómenos físicos o químicos, ya que la energía puede presentarse de diversas formas: cinética, potencial, eléctrica, mecánica, química. Es ley que al producir cierta cantidad de energía de una clase, se consume una cantidad igual de otra clase o clases.

La energía puede servir como indicador, basándose en valores “normales” o “establecidos”. Si tomamos la temperatura como ejemplo, sabemos que un motor se desempeña de forma adecuada a cierta temperatura mientras que se puede estropear si trabaja a una temperatura excesiva; que el ser humano sano tiene una temperatura promedio y si esta se ve aumentada o disminuida por alguna razón ya sea externa o interna, el ser humano corre peligro; que la nevera debe tener cierta temperatura para la conservación de los alimentos, un cambio en esta puede congelar o estropear los alimentos. En los fluidos la temperatura afecta sus propiedades; así se puede deducir una relación entre los elementos que están en el medio ambiente, quedando como incógnita cómo hacerlo.

Un método de control térmico es aquel en que se utiliza un dispositivo para la detección de calor a fin de medir las variaciones de temperatura de algún componente, estructura, sistema o proceso físico. La termografía es uno de estos métodos: es la técnica de teledetección, realizado a través de la adquisición de imágenes del campo de infrarrojos, que permite medir la energía de los mismos emitida por los objetos a temperaturas diferentes del cero absoluto. Se refieren a la temperatura de la superficie del propio cuerpo o zona y tales, temperaturas se miden a distancia sin necesidad de contacto físico, mediante la captación de radiación infrarroja del espectro electromagnético, por medio de una cámara de infrarrojos. La conversión de la energía emitida concluye con la conversión de ésta en video o imagen, por medio de la cámara de infrarrojos; tanto el video como las imágenes son útiles en diversos ámbitos: el industrial, en siderúrgicas y eléctricas, en ingeniería civil, y en el campo de prevención y diagnóstico médico. Las imágenes suelen representar la escena como un mapa de temperaturas que nos permite apreciar aspectos que no son visibles a simple vista.

Los sistemas de infrarrojos surgen al estudiar fenómenos descubiertos cerca de hace 200 años. A manera de resumen se presentan enlistados en eventos y sus fechas:

- En 1738, Sir Frederick William Herschel, nacido en Hanover, Alemania, descubrió los rayos infrarrojos.

- En 1840, John Herschel produjo la primera imagen de infrarrojos que llamó evaporografía, al evaporar alcohol de una superficie carbón-recubierto, produciendo una imagen visible, el primer termograma.
- En 1873, el escocés James Clerk Maxwell unificó los fenómenos eléctricos y magnéticos en una única fuerza, estableciendo el electromagnetismo.
- Kirchhoff, sostuvo que un cuerpo que puede absorber perfectamente energía electromagnética es un cuerpo que también puede emitirla. Así, un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la radiación que le llega, a todas las longitudes de onda y la radiación que emite es únicamente función de la temperatura y de la frecuencia de onda. Nuestra situación “ideal” es estableciendo la “Ley de Kirchhoff” que nos dice que la emisión y la absorción están balanceadas.
- El 14 de diciembre de 1900, Max Planck da una plática donde sostiene que hay que cambiar la visión que se tenía hasta el momento de la interacción de la materia con la radiación (aquí nace la Física cuántica) y establece la distribución espectral de un cuerpo negro mediante la denominada Ley de Planck.
- A mediados de 1900, Lord Rayleigh y Sir James Jeans presentaron un cálculo clásico de la densidad de energía para el cuerpo negro, que intenta explicar su comportamiento, pero para altas frecuencias el cuerpo emitiría energía infinita.
- Wien, buscó un resultado para frecuencias altas y encontró otra emisión de energía infinita en infrarrojo, estableciendo la denominada “Ley de desplazamiento de Wien” que establece que hay una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura.
- Planck interpoló entre las fórmulas de Rayleigh-Jeans y la de Wien, estableciendo la “Ley de Planck” que describe la distribución espectral y el máximo de la curva del cuerpo negro. Agregó una constante universal.
- En 1946, se desarrolló el primer escáner de infrarrojos en línea con fines militares, de modo que al colocar varias líneas juntas se logró crear la primer imagen bidimensional y se requería una hora para la producción de un imagen termográfica, es decir, un termograma.
- En 1954, el sistema pudo crear una imagen termográfica que podía ser directamente obtenida al agregar un escáner; aún así se demoraba 45 minutos obtener la imagen.
- En 1960, el tiempo redujo a 5 minutos.
- En 1966, se produjo el primer generador de imágenes en tiempo real, con 20 imágenes por segundo.
- En los años 70, 80 y 90 del siglo pasado se produce la introducción de la alta resolución de los conjuntos de plano focal (AAP) y AAP no refrigerado.
- Fue en 1960 que *Texas Instruments*, diseñó un sistema que permitía mirar a otros ángulos, principalmente hacia adelante con un par de espejos móviles para crear un patrón trama llamado FLIR por sus siglas en inglés (*Forward Looking Infrared System*), cuyo acrónimo aún existe, aún para aquellos sistemas que no son construidos como el inicial. Este diseño fue el inicio de un módulo común de diseño, donde únicamente una persona podía ver la imagen producida.
- A mediados de 1975, aparece el sistema denominado electro-optically multiplexed (EOMUX), sistema que permitía dirigir la imagen a un monitor donde podía ser vista por más personas.

- A principios de 1980, se desarrolló el denominado *electronically multiplexed system* (EMUX), que mejora la fiabilidad y corrige algunos defectos de imagen.
- En la década de los 90 aparece la primera cámara termográfica para comercialización.

Es a principios de esa década cuando comenzó a utilizarse para estudios diversos, en gran medida de diagnóstico médicos; hay artículos que datan del año 1982 con estudios de termo diagnóstico de mama, por ejemplo.

#### ***4.2. Espectro electromagnético***

Termografía es el término con el que se designa a los diferentes métodos, para identificar y analizar los patrones de calor emitidos por un cuerpo o un objeto, relacionados con su temperatura. La termografía infrarroja visualiza la distribución espacial de la temperatura en los objetos, mostrando la energía térmica que emite un objeto haciéndola visible por medio de imágenes que se adquiere con la cámara termográfica. Es una técnica que permite ver la temperatura de la superficie con precisión sin tener ningún contacto con ella. Las mediciones de la radiación infrarroja se convierten en mediciones de temperatura midiendo la radiación emitida en la porción infrarroja del espectro electromagnético desde la superficie del objeto, y convirtiendo estas mediciones en señales eléctricas.

Cuanto más alta sea la temperatura, mayor la energía emitida. La representación visible de la imagen se conoce como termograma, que es, básicamente, un mapa de temperaturas de la escena. Los instrumentos que miden infrarrojos miden la intensidad de la radiación y, desde ella, evalúan la temperatura superficial, haciéndola visible por medio de los termogramas obtenidos con la cámara.

Fue por 1860, que Maxwell publicó su teoría matemática sobre el electromagnetismo. Ésta, precedía la existencia de ondas llamadas "electromagnéticas" que se propagaban a la misma velocidad que la luz y que solo se diferenciaban entre sí en su frecuencia o lo que es lo mismo en su longitud de onda  $\lambda$ . Las ondas de distinta longitud de onda  $\lambda$ , poseen diferentes propiedades y son generadas por procesos físicos diferentes. Las longitudes de onda varían en una amplia gama, desde los rayos X (cuya longitud de onda es menor que la distancia entre los átomos) hasta las ondas de radio (cuya longitud puede llegar a ser de varios kilómetros). Todas estas ondas se desplazan en el vacío, a la velocidad de la luz.

La expresión "espectro electromagnético" proviene de la palabra "espectro" que refiere a toda una gama de longitudes de ondas y la palabra "electromagnético" significa que las ondas de las que hablamos (luz, rayos infrarrojos, radio, etc.) están compuestas de campos vibratorios eléctricos y magnéticos. La gama de longitudes de onda que corresponde a la luz visible se llama espectro visible. La Figura 4.1, muestra el espectro electromagnético, la longitud de onda, el tipo de radiación, la frecuencia y la temperatura entre otros; la energía en una onda electromagnética es proporcional a su frecuencia. Esto explica por qué los rayos ultravioleta, rayos X y rayos gamma son perjudiciales para los seres vivos, al tener una frecuencia mayor. Ya que son otras formas comunes de radiación electromagnética que implica que tienen asociada una energía muy alta, la cual puede producir alteraciones en células, e incluso en el ADN.

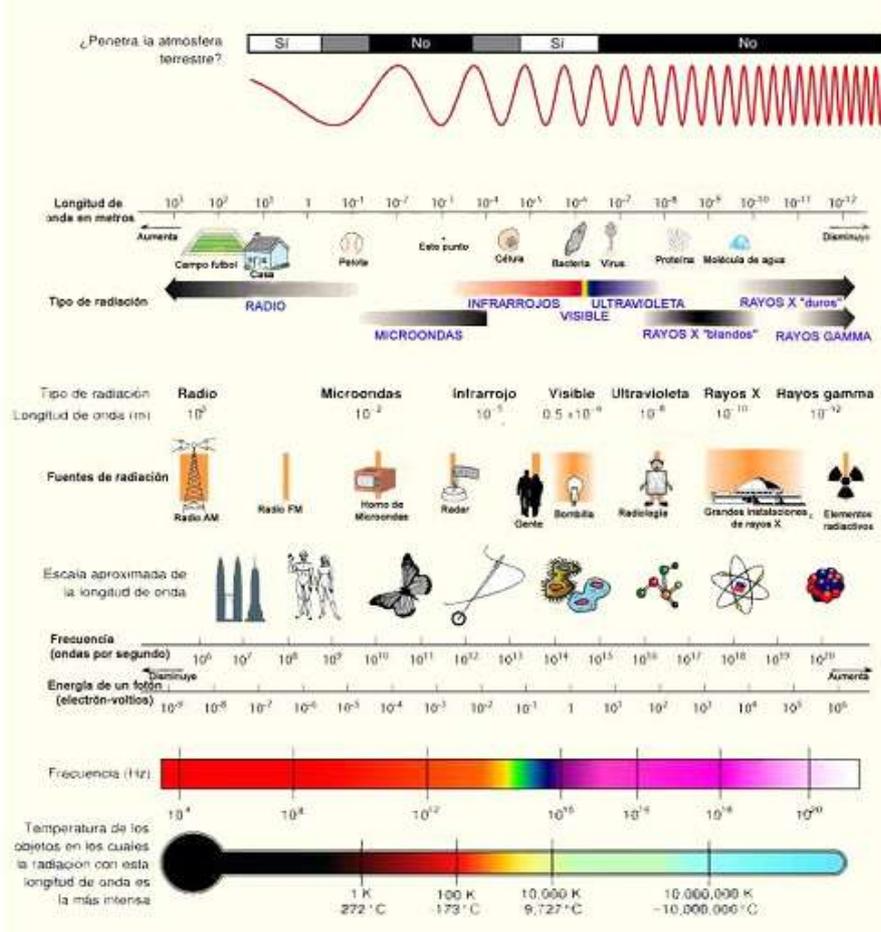


Figura 4.1 El espectro electromagnético, una representación múltiple

**La energía infrarroja:** es una parte del espectro electromagnético de comportamiento similar a la luz visible. Este tipo de energía viaja a través del espacio a la velocidad de la luz y puede ser reflejada, refractada, absorbida y emitida. La longitud de onda de la energía infrarroja está entre 0.7 y 1000  $\mu\text{m}$  (micrómetros). Mientras **la radiación infrarroja** es un tipo de radiación electromagnética y térmica, de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menos que de las microondas.

**La luz infrarroja (IR):** es radiación electromagnética con una longitud de onda mayor; esta es emitida y absorbida por las moléculas cuando cambian su movimiento rotacional-vibracional.

**La tecnología por infrarrojos (IR):** en continuo avance, permite cubrir una gran gama de necesidades de mantenimiento y seguridad en la industria, permitiendo reducir pérdidas por paros de producción, daños en equipo e incluso pérdidas humanas. También, cada vez está más al alcance, permitiendo confiabilidad en los métodos aplicados.

La cantidad de radiación de un objeto es función de la temperatura de éste. Si un cuerpo está más caliente que su entorno, emite más radiación y tiende a enfriarse; existe una condición en la que la velocidad de absorción y emisión son iguales por lo que normalmente llegará al equilibrio.

### 4.3. Principios físicos de la termodinámica

Todo en el planeta contiene energía térmica; en consecuencia, todo tiene una temperatura específica. El calor se transmite de un elemento a otro como energía, siempre viajando de un objeto caliente a uno más frío. La temperatura se asocia al equilibrio térmico, definiendo el estado térmico de un objeto, en relación a otros. Es decir, un cuerpo que esté más caliente, intercambia energía con su entorno, enfriándose, debido a que existe una condición en la que la velocidad de absorción y emisión son iguales por lo que normalmente llegará al equilibrio.

El calor es transmitido por medio de tres principios: conducción; convección y radiación. Gráficamente representados en la Figura 4.2.

El proceso de **conducción** es sencillo. La fuente de calor directamente excita los átomos (aumentando sus vibraciones internas). Estos átomos chocan con aquellos que tienen a sus costados y transfieren parte de la energía a estos. Después, estos átomos, chocan a su vez con aquellos que tienen a los costados y estos pasan de nuevo en un poco de energía. Así, la energía térmica del movimiento se transmite de un átomo a otro. La rapidez con que se mueve la energía, depende de la conductividad térmica del material. Los metales tienen alta conductividad térmica y los aisladores tienen una baja conductividad térmica, es decir, la conductividad depende del material.

El proceso de **convección** es la transferencia de calor de un lugar a otro por el movimiento de un fluido, principalmente aire, agua, gas. Un horno de aire caliente y un sistema de calefacción de agua caliente son ejemplos. Ahora bien, si dicho fluido caliente es forzado a moverse, por cualquiera que sea el medio, una bomba o un soplador, el proceso se llama convección forzada.

El término de **radiación** es la energía emitida de manera continua por un cuerpo debido a su temperatura. La energía de calor es la emitida desde la superficie de material de cualquier cuerpo. Esta energía se denomina radiante y es transportada por las ondas electromagnéticas, que viajan en el vacío a la velocidad de  $3 \cdot 10^8$  m/s. Las ondas de radio, las radiaciones infrarrojas, la luz visible, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, constituyen las distintas regiones del espectro electromagnético.

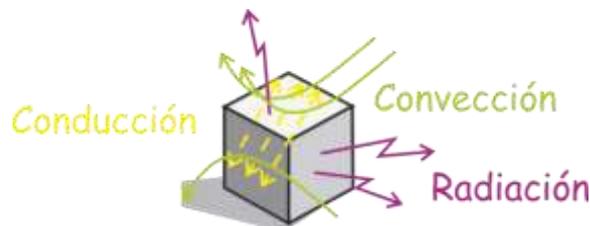


Figura 4.2 Principios de transmisión de calor

Todos los cuerpos emiten **radiación electromagnética**, cuya intensidad depende de la temperatura y la longitud de onda; la mayor fuente de calor es el sol, que proporciona calor a la tierra en forma diurna. La cantidad de calor depende de la cobertura de nubes y componentes atmosféricos. El aumento de temperatura se relaciona con la velocidad del viento y la radiación de retorno. Un sistema que genera imágenes térmicas, puede detectar la temperatura resultante creada por el sol. Otras fuentes de calor son la combustión, las reacciones químicas, las plantas nucleares, el calor que se transforma en energía mecánica y viceversa, la energía mecánica que se vuelve calor, por mencionar algunas.

#### 4.3.1. Fundamentos de la termografía

A fin de comprender la termografía y la obtención de una buena imagen termográfica, es necesario explicar algunos conceptos. La radiación registrada por una cámara termográfica se compone de la radiación emitida, reflejada y transmitida, proveniente de los objetos presentes en el campo de visión de la cámara. Cada objeto radia energía en función de su temperatura. Esta energía emitida es una manifestación externa del estado de energía de dicho cuerpo detectado por medio de la cámara y usado para determinar la temperatura del cuerpo. Es necesario hablar de la ley de Kirchhoff, una de las leyes fundamentales relativa a la radiación, que establece que si una superficie es golpeada por una onda electromagnética, una parte del haz de radiación será enviado de regreso a la fuente, otra pasará a través del cuerpo y la parte restante será absorbida por el cuerpo. Esto no es más que el principio de funcionamiento de la cámara termográfica.

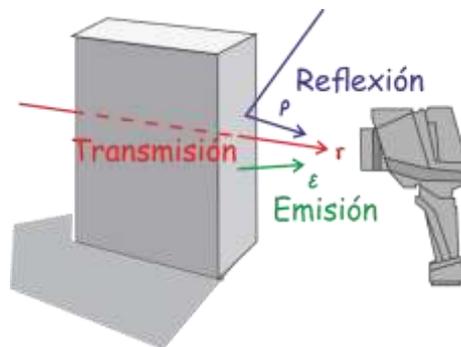


Figura 4.3 Esquema de radiación de calor percibido por la cámara de infrarrojos

**Absorción** o **absorción espectral**, también llamado **espectro de absorción** es la proporción o la fracción de la radiación térmica incidente que un material absorbe dentro de un rango de frecuencias. Es, en cierto modo, lo opuesto de la emisividad.

**Emisividad** o **emisividad espectral**, también llamada **emitancia**, es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura; describe la eficiencia de un material a la hora de emitir la energía infrarroja comparado con un emisor perfecto de energía infrarroja a su misma temperatura. Depende de las propiedades del material del que este compuesto el objeto, de las características de la superficie y de la temperatura del objeto. La emisividad total se obtiene por integración sobre todo el espectro electromagnético y todo el espacio. Cuanto más pequeño sea el valor de la emisividad, mejor aislante por reflexión será dicha superficie.

La **reflexión** define cuán reflectante es un material cuando de reflectar la energía infrarroja se trata, es decir la temperatura que se refleja en el objeto. Depende de las propiedades de la superficie, la temperatura y el tipo del material. En general las superficies lisas y brillantes reflejan de forma más intensa que las rugosas y mate del mismo material.

La **transmisión** es la capacidad de un material a dejar pasar la radiación infrarroja, es decir, transmitirla. La mayoría de los materiales no dejan pasar la radiación infrarroja, por lo que la transmisividad de la mayoría de los materiales es prácticamente 0 y se puede despreciar. Puede ser directa o difusa, directa cuando la luz penetra en el cuerpo, sin ser dispersada o difusa cuando la luz es dispersada por las irregularidades en la superficie.

Sobre la superficie de un cuerpo incide constantemente energía radiante, tanto desde el interior como desde el exterior; la que incide desde el exterior procede de los objetos que rodean al cuerpo. Cuando la energía radiante incide sobre la superficie una parte se refleja y la otra parte se transmite.

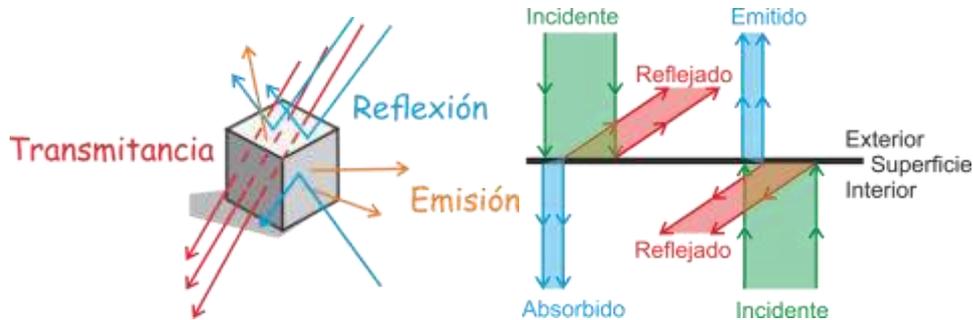


Figura 4.4 Fracciones de energía incidente

Las fracciones de energía incidente (Figura 3.4) que se reflejan, transmiten o absorben, se definen por coeficientes específicos:

$$\begin{aligned} \rho &= E_r / E && \text{Coeficiente de reflexión} \\ \tau &= E_t / E && \text{Coeficiente de transmisión} \\ \alpha &= E_a / E && \text{Coeficiente de absorción} \end{aligned}$$

Por consiguiente, es un hecho que  $E_r + E_t + E_a = E$ ; por ello, los coeficientes están ligados a la relación:  $\rho + \tau + \alpha = 1$ .

Estos coeficientes son asignados en función de la longitud de onda, de la temperatura y de la naturaleza de la superficie del cuerpo y toman valores entre 0 y 1. Los objetos se suponen opacos a la radiación térmica en la aplicación de la termografía lo que simplifica la relación:

$$\rho + \alpha = 1$$

Tomando en cuenta también que la emisividad ( $\epsilon$ ) de un objeto es igual a la absorción la relación toma la forma:

$$\rho + \epsilon = 1$$

La superficie de un **cuerpo negro** es un caso límite, un objeto teórico, en el que toda la energía incidente desde el exterior es absorbida, y toda la energía incidente desde el interior es emitida. Es decir  $\alpha = 1$ ,  $\tau = 0$  y  $\rho = 0$ . En la naturaleza no existe un cuerpo negro, incluso el negro del humo refleja el 1% de la energía incidente. Sin embargo, un cuerpo negro se puede sustituir con gran aproximación por una cavidad con una pequeña abertura. La energía radiante incidente a través de la abertura es absorbida por las paredes en múltiples reflexiones y solamente una mínima proporción escapa (se refleja) a través de la abertura. Podemos, por tanto, decir que toda la energía incidente es absorbida. Para fines prácticos, un cuerpo negro es aquel cuya emisividad es igual a la unidad (ver Figura 4.5).

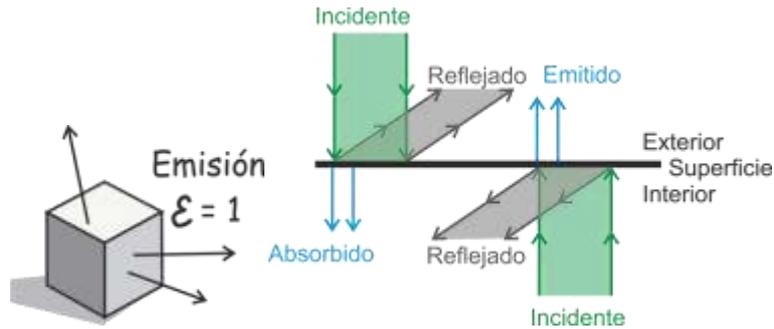


Figura 4.5 Un cuerpo negro

El coeficiente de emisividad ( $\epsilon$ ) es un número adimensional que relaciona la habilidad de un objeto real para irradiar energía térmica, con la habilidad de irradiar si éste fuera cuerpo negro. La cantidad de energía radiada por un cuerpo negro por unidad de superficie conocida como energía radiante de un cuerpo negro, se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$M = \epsilon \sigma T^4$$

donde  $M$  es la energía radiante de un cuerpo,  $\epsilon$ , la emisividad con valor entre (0 y 1) y  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ) y  $T$  la temperatura absoluta del objeto.

Un **cuerpo gris** es aquel, que tiene una emisividad espectral menor que uno, pero constante a todas las longitudes de onda. Los cuerpos naturales varían dicha longitud de onda, por lo que se les conoce como radiadores selectivos.

Otra ley importante es la de Wien, apoyada por la curva de Planck; la ley establece que:

$$\lambda_{\text{máx}} = b / T,$$

donde  $T$  es la temperatura del cuerpo negro, y  $b$  es la constante de proporcionalidad de Wien (2898), que no es más que la longitud de onda expresada en metros. La curva de Planck revela que a cualquier temperatura, el cuerpo irradia energía en una amplia gama de longitudes de onda.

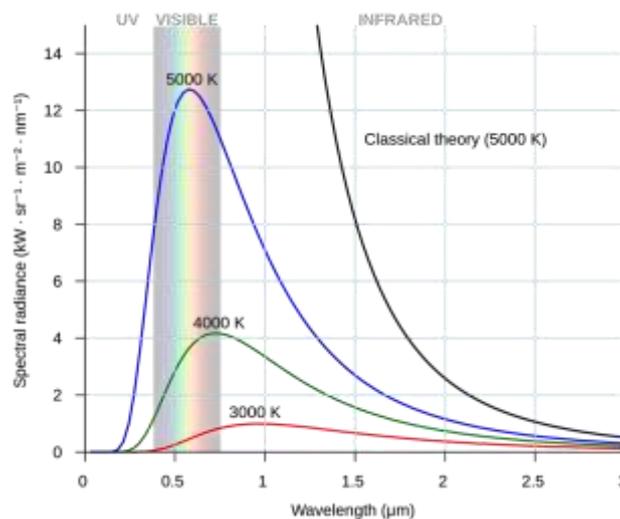


Figura 4.6 Curva de Planck

Representa que la intensidad de energía electromagnética emitida a las diversas longitudes de onda (a una temperatura fija), la del cuerpo negro inclusive, tiene un pico que se desplaza hacia las otras frecuencias al aumentar la temperatura la misma. La ley de Wien expresa el concepto de que un objeto, cuanto más caliente está, más corta es la longitud de onda a la que se emite radiación como se observa en la Figura 4.6. Los valores de la emisividad de un cuerpo pueden tomar un valor entre 0 y 1, dependen de la longitud de onda y del ángulo de observación, y es la razón de la densidad de flujo radiante del emisor perfecto a la misma temperatura; es la energía total radiada en todas las direcciones, desde una unidad de área y por unidad de tiempo ( $W/m^2$ ). Un objeto con una buena absorción, también tendrá una buena emisión. Algunos valores representativos de la emisividad para diferentes materiales se muestran en la Tabla 4.1, extracto obtenido de [9] y la Tabla 4.2 de Testo SE & Co KGaA.

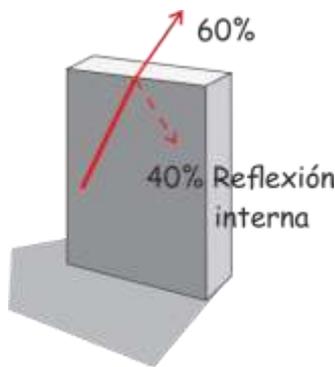


Figura 4.7 Ejemplificación del funcionamiento de la emisividad

Tabla 4.1 Algunas emisividades para diferentes materiales

Material	Emisividad (8-12 micras)	Condiciones (°C)	Material	Emisividad	Condiciones (°C)
Agua de mar	0.98-0.99		Acero brillante	0.18	20
Agua destilada	0.96		Acero oxidado	0.85	200-600
caucho	0.95	20	Acero galvanizado	0.28	20
Arena	0.91	25	Aluminio brillante	0.05	50-100
Nieve	0.80	0	Aluminio oxidado	0.20-0.30	50-100
Piel humana	0.98	37	Asfalto	0.90	50
Suelo humedo	0.95		Cemento	0.90	25
Suelo seco	0.92		Cobre	0.015-0,025	200, 700
Vegetación	0.91		Cobre oxidado	0.73	130
Hielo	0.98	0	Ladrillo rojo	0.93	
Papel	0.70-0.90	20	Latón brillante	0.10	50-100
Marmol pulido	0.93	20	Latón oxidado	0.61	200-600
Tela	0.85		Bronce pulido	0.1	50
Grafito	0.85		Hierro pulido	0.21	200
Madera	0.91	70			

Tabla 4.2. Valores representativos de emisividad

Material (temperatura del material)	Emisividad	Material (temperatura del material)	Emisividad
Acero laminado en frío (93 °C)	0,75-0,85	Goma dura (23 °C)	0,94
Acero oxidado (200 °C)	0,79	Granito (20 °C)	0,45
Acero superficie tratada térmicamente (200 °C)	0,52		
Algodón (20 °C)	0,77	Hielo liso (0 °C)	0,97
Aluminio laminado sin tratamiento (170 °C)	0,04	Hierro con costra de fundición (100 °C)	0,8
Aluminio muy pulido (100 °C)	0,09	Hierro con costra de laminación (20 °C)	0,77
Aluminio, muy oxidado (93 °C)	0,2	Hierro de fundición oxidado (200 °C)	0,64
Aluminio, no oxidado (100 °C)	0,03	Hierro, esmerilado (20 °C)	0,24
Aluminio, no oxidado (25 °C)	0,02	Hormigón (25 °C)	0,93
Arcilla (70 °C)	0,91		
		Ladrillo, mortero, revoque (20 °C)	0,93
Caucho, blando, gris (23 °C)	0,89	Latón oxidado (200 °C)	0,61
Cinc oxidado	0,1		
Cobre ligeramente deslustrado (20 °C)	0,04	Madera (70 °C)	0,94
Cobre oxidado (130 °C)	0,76	Mampostería (40 °C)	0,93
Cobre, laminado (40 °C)	0,64	Mármol blanco (40 °C)	0,95
Cobre, pulido (40 °C)	0,03		
Corcho (20 °C)	0,7	Papel (20 °C)	0,97
Cristal (90 °C)	0,94	Piedra arenisca o gres (40 °C)	0,67
Cromo (40 °C)	0,08	Pintura azul sobre lámina de aluminio (40 °C)	0,78
Cromo pulido (150 °C)	0,06	Pintura blanca (90 °C)	0,95
Cuerpo refrigerante anodizado negro (50 °C)	0,98	Pintura de transformadores (70 °C)	0,94
		Pintura negra mate (80 °C)	0,97
		Pintura, amarilla, 2 capas sobre lámina de aluminio (40 °C)	0,79
		Pinturas al óleo (cualquier color) (90 °C)	0,92-0,96
		Plásticos: PE, PP, PVC (20 °C)	0,94
		Plomo (40 °C)	0,43
		Plomo oxidado (40 °C)	0,43
		Plomo, gris oxidado (40 °C)	0,28
		Porcelana (20 °C)	0,92
		Yeso (20 °C)	0,9

Fuente: TESTO infrared

#### 4.4. El calor y su interacción con el medio

El calor es la transferencia de energía de un objeto a otro, medido por medio de su temperatura; siempre fluirá de un objeto más caliente a uno más frío. Una vez que el calor deja de fluir, no es posible recuperar el calor que se ha perdido, y debe ser reemplazado. El calor es creado cuando la energía de un cuerpo negro es liberada, el calor es una energía que no es tangible, solo percibimos su temperatura en el objeto. La temperatura se mide con instrumentos de contacto o no contacto; los primeros que se basan en el calor emitido y los de no contacto que se basan en la radiación emitida por del objeto.

En la Tierra, el sol constantemente emite calor; sin éste, la superficie de la Tierra, de manera eventual, se enfriaría hasta llegar a la temperatura del espacio exterior, muy cerca del cero absoluto. La cantidad de calor y de frío en el ambiente, dependen de las propiedades de la atmósfera y de las nubes que le cubren. Estas mismas propiedades minimizan las variaciones de la temperatura en la superficie de la Tierra.

La representación en imágenes del calor, se hace representando sus variaciones por medio de "mapas de temperaturas". Estos mapas se obtienen por medio de instrumentos de no contacto como las cámaras termográficas y se clasifican como una de las tecnologías no destructivas. La toma de imágenes de infrarrojos y su análisis permiten detectar anomalías invisibles al ojo humano, lo que permite prevenir errores y fallos que puedan suponer grandes pérdidas económicas, sobre todo en la industria. Así la termografía se convierte en una herramienta útil de exploración para determinar la situación cualitativa de un objeto, instrumento o zona y como mantenimiento predictivo al hacer las exploraciones como monitoreo programado para determinar los mismos. Finalmente, se la puede emplear como una herramienta preventiva, una vez estimado el tiempo necesario entre monitoreo y monitoreo, para evaluación.

Al usar cámaras de visión artificial o cámaras de infrarrojos, se pueden generar dos tipos de imágenes: las imágenes termográficas o de infrarrojos (IR), también llamadas termogramas y las imágenes térmicas. Las primeras proporcionan una medida exacta del valor de temperatura real de los objetos. Son un mapa de la temperatura de los objetos y, normalmente, son datos en bruto que se han de procesar y no se pueden visualizar directamente. Un termograma correlaciona la intensidad de la imagen o el color con la cantidad de radiación infrarroja recibida desde un objeto. La cantidad de radiación recibida, junto con otros parámetros, es usada para calcular la temperatura de la superficie del objeto objetivo. Cuanto más alta sea la temperatura del objeto mayor será la radiación IR emitida; así los rayos infrarrojos nos permiten ver lo que los ojos no. Las segundas, las imágenes térmicas, son más bien cualitativas. Son imágenes que representan, para la escena captada, las diferencias de temperaturas existentes, pero sin ser capaces de determinar la temperatura exacta de un punto concreto de la misma. Con las imágenes térmicas se pueden ver los estados de los elementos de un sistema y usar la información para mantenimiento preventivo, observando qué zonas acumulan mayor temperatura.

#### **4.4.1. Influencia de variables ambientales en las imágenes termográficas**

**Variables que intervienen en las imágenes.** La atmósfera está compuesta por numerosos gases y aerosoles, que absorben y dispersan la radiación mientras esta viaja hacia la Tierra. Esto afecta la transmisibilidad y genera reducción en la radiación, porque los mismos constituyentes de la atmósfera también radian energía, la cual se acumula.

El aire que respiramos está compuesto básicamente por dos elementos: el nitrógeno y el oxígeno en una proporción muy aproximada de 4 a 1. En concreto, el nitrógeno ocupa el 78,084% del volumen del aire mientras que el oxígeno ocupa el 20,946%. También están presentes otros componentes en proporciones menores. El nitrógeno es una sustancia inerte que no reacciona con facilidad. De hecho, el nitrógeno reduce los efectos del oxígeno, un elemento muy activo.

El oxígeno, en cambio, es muy reactivo y es, por ejemplo, el responsable de los procesos de oxidación. Las combustiones, una forma rápida de oxidación, son posibles gracias a la presencia de oxígeno. También la respiración de los seres vivos, animales y plantas es una forma de oxidación y es posible gracias a la contribución de este elemento.

El resto del total, casi un 1%, está constituida por una serie de gases, el más importante de los cuales, cuantitativamente, es el argón. En proporciones mucho más pequeñas encontramos algunos otros gases como el neón, el criptón, y el xenón. También hay pequeñas proporciones de hidrógeno y óxido nitroso. Otros gases se encuentran en cantidades variables.

El vapor del agua puede variar desde un 0% en zonas desérticas, hasta un 4%. Se encuentra concentrado en las partes bajas y su proporción disminuye en altura. Es también el responsable de la formación de nubes, interviene en muchos fenómenos meteorológicos y tiene una importancia capital en el intercambio energético, entre la atmósfera y la superficie terrestre a causa de sus cambios de estado y de la absorción de ciertas radiaciones. La Tierra es el único planeta que tiene una atmósfera donde el agua se puede encontrar en sus tres estados: sólido, líquido y gaseoso. Su importancia, en cuanto al desarrollo y mantenimiento de la vida en el planeta, es fundamental.

La alta humedad reduce la transmitancia térmica, al casarse el crecimiento de partículas de aerosol, en particular, con la niebla salina en entornos marítimos. Aunque la atmósfera

puede ser bastante clara visualmente, el rendimiento del sistema puede degradarse considerablemente a causa de la absorción molecular por el vapor de agua. Los aerosoles, que son las partículas en suspensión, incluyen el polvo, la suciedad, el carbono, organismos diminutos, sal marina, gotas de agua, partículas de agua (neblina o niebla), humos contaminantes, Las concentraciones relativas de los constituyentes atmosféricos pueden ser notoriamente diferentes en función del sitio donde se encuentran. Por citar un ejemplo, el follaje denso y las concentraciones de monóxido de carbono y dióxido de carbono por proveniente de los escapes de los vehículos. Las áreas urbanas tienden a tener una mayor producción de monóxido de carbono. Los contaminantes varían de acuerdo a los lugares de población y de los núcleos industriales. Mientras que los gases absorben la radiación, los aerosoles la absorben y dispersan. La dispersión es bastante dominante en el rango visible y es el principal contribuyente de la trayectoria de la radiancia. La gama meteorológica es una medida de esta dispersión

El vapor de calor o humedad absoluta, es un absorbente principal en la región infrarroja. Desafortunadamente, la transmitancia no está linealmente relacionada con la humedad absoluta. La humedad absoluta no es normalmente una cantidad medida, pero se calcula a partir de observaciones meteorológicas estándar. Aunque la humedad absoluta no posee una extinción específica, puede ser utilizada como una guía. La concentración de vapor de agua puede variar desde unas pocas décimas, como  $3 \text{ g} / \text{m}^3$  en el desierto a  $40$  a  $50 \text{ g} / \text{m}^3$  en una selva tropical o cerca de la superficie del mar. Cuando aumenta la humedad absoluta, la transmitancia disminuye. Los cambios de humedad absoluta tanto diarios como estacionales, por tanto, repercuten en la temperatura del objeto, que a su vez se verá reflejado en la forma visual de los mapas de temperaturas. De primera mano, parecerían no ser de importancia, mas podrían representar cambios que llamasen la atención durante un mantenimiento en un sistema de agua potable dada la repetitividad de tomas de una región determinada.

Las imágenes termográficas tienen algunos parámetros de rendimiento que se involucran en la calidad de la imagen, por lo que, en ocasiones, se tornan un problema. Características sistemáticas, la experiencia del observador, el contenido de la escena, la transmisibilidad de la atmosfera, los ajustes del monitor y variedad de factores se perciben y afectan la calidad de imagen. Como se observa en la Figura 4.8, son varios los contribuyentes que afectan la foto tomada. Así, la pobreza de información en la imagen no puede ser discernida únicamente por la imagen, ni por la cámara, ni mucho menos por el observador, por ende, tampoco la calidad de esta puede ser determinada.

Una imagen termográfica, por sí misma, posee mucha información respecto al ambiente. Para extraer alguna información de utilidad, el problema con este tipo de tecnología, al basarse en la temperatura, es que no se puede discriminar tanta información generada. Es decir, distinguir un objeto que tenemos en la imagen de manera intuitiva, resulta un tanto difícil si no contamos con algo como un patrón de comparación. Por ejemplo, si tenemos una imagen para cotejar, se puede fácilmente identificar lo que tenemos en dicha imagen, pero si hay elementos que no podemos cotejar con experiencia previa, entonces lo único que tenemos es un gradiente de temperaturas, algo análogo a un plano de curvas de nivel y, por ende, será complicado interpretarlo.



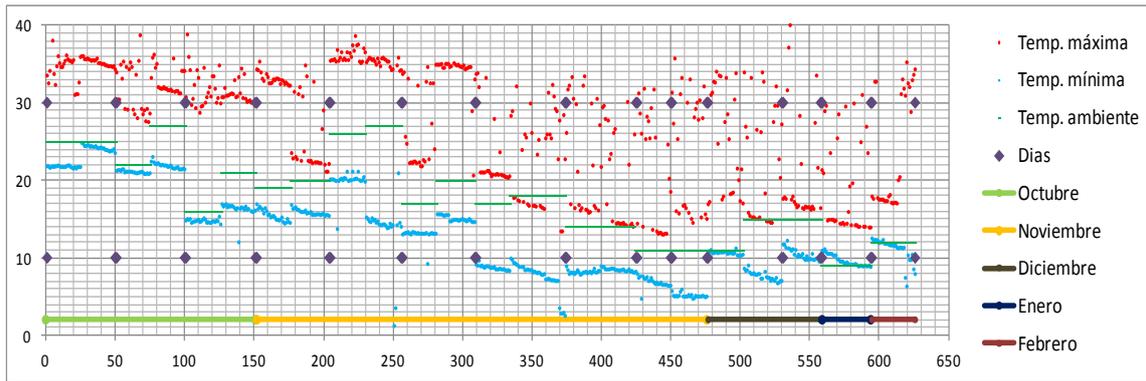
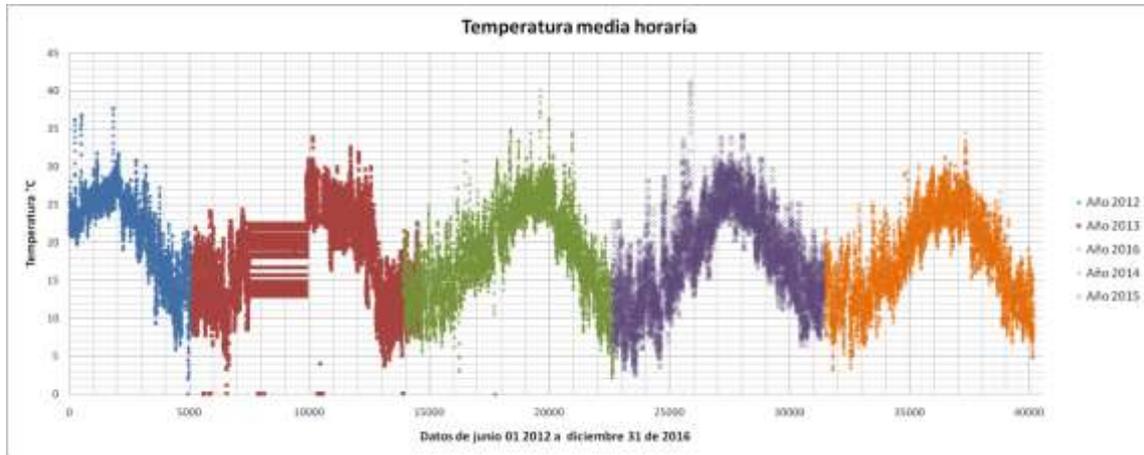


Figura 4.10 Comportamiento de la temperatura en las imágenes del T.I.

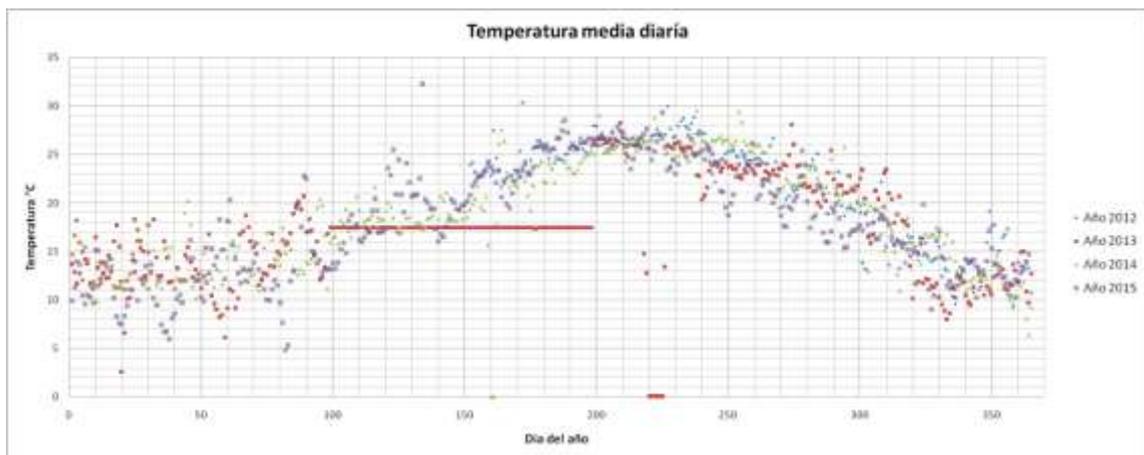
**Visualización de variables cualitativas y cuantitativas.** Las imágenes tomadas para medir la temperatura pueden ser cualitativas o cuantitativas. Las mediciones cualitativas comparan la firma térmica de un componente a la de un componente idéntico (o al menos similar), bajo las mismas (o al menos similares) condiciones de funcionamiento. Es decir la "salud" del objeto (o anomalía) es evaluada por las variaciones de intensidad entre los dos objetos similares sin asignar valores de temperatura. Ésta es útil para muchas actividades de control de calidad y de procesos, pues tenemos una línea de base o termograma "de oro". Todos los termogramas futuros, se comparan con el termograma "de oro". Cualquier diferencia térmica puede sugerir un problema; las mediciones cualitativas son adecuadas para aquellas aplicaciones donde no se requiere la temperatura precisa. Estos incluyen la vigilancia, localización de objetos enterrados, inspecciones de techo, inspecciones de edificios, y los estudios geológicos. También se utiliza para encontrar fugas de vacío, fugas de aire, tubo de bloqueo, y el nivel de líquido en un tanque de almacenamiento. Las mediciones cuantitativas proporcionan la verdadera temperatura del objeto. Se requieren valores precisos para la mayoría de actividades de mantenimiento predictivo monitoreo de condición; así, cuando la temperatura está fuera de los rangos establecidos, suele ser necesaria alguna reparación.

El manejo de datos toma tiempo. Para observar el comportamiento de la temperatura de la ciudad de Valencia, España, por ser donde llevamos a cabo el estudio, el dato se obtuvo por DATA UPV [11], datos históricos de la observación meteorológica de la ciudad, recursos ofrecidos por la Universitat Politècnica de València. Son datos en formato CSV, que contienen: velocidad del viento (m/s), dirección del viento (grados), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa (%), presión (mb), precipitación ( $\text{l/m}^2$ ), tomados de forma horaria durante el periodo de junio de 2012 a enero de 2015, provenientes de la AEMET y GVA. En la actualidad, se cuenta con datos hasta el 2016 y la base seguirá creciendo para futuras referencias. Tomó tiempo manipular la información; se adecuó la base de datos con EXCEL, para poder trabajarla con KNIME y obtener datos específicos relevantes, pues la información, a pesar de muy completa, no era consistente en su presentación por lo que se tuvo que adecuar para que fuese útil. El objetivo era observar comportamientos, tendencias y eventos atípicos, de la temperatura; en general, dichos comportamientos se observan en las gráficas de las figuras mostradas. La Figura 4.11, contiene toda la muestra de temperaturas tomadas de forma horaria, por lo que por cada número del eje horizontal se tienen 24 datos de temperatura en el eje vertical. Posteriormente se compilaron para comparar el comportamiento anual; en la Figura 4.12 se consideró la temperatura media diaria, mientras que en la Figura 4.13 la temperatura media semanal, y en la Figura 4.14 la temperatura media mensual. Para comparar la menor cantidad de datos, lo propio sería que una vez

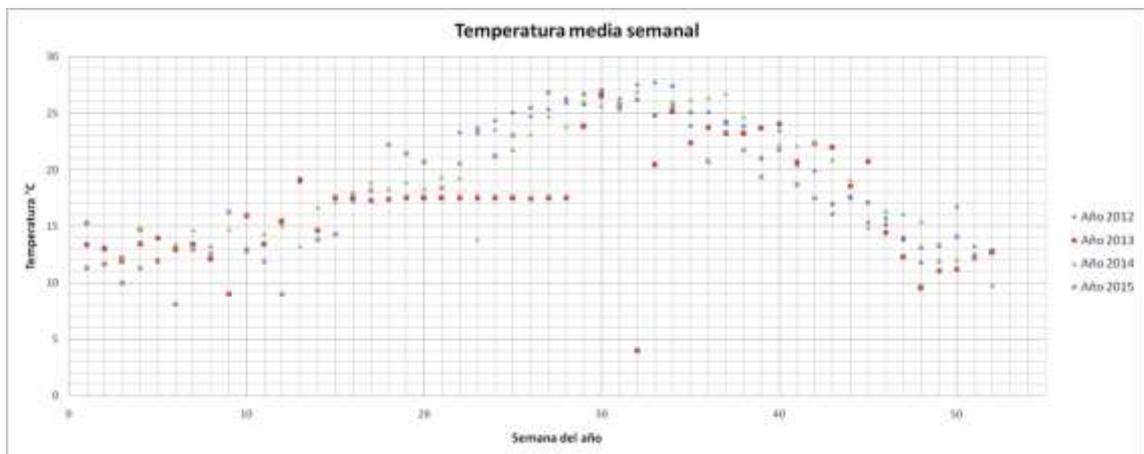
determinada la hora de la toma de las imágenes, se observara la variación de la temperatura con el paso de los años.



**Figura 4.11 Temperaturas horarias por día Valencia, España**



**Figura 4.12 Temperatura media por día Valencia, España**



**Figura 4.13 Temperatura media mensual Valencia, España**

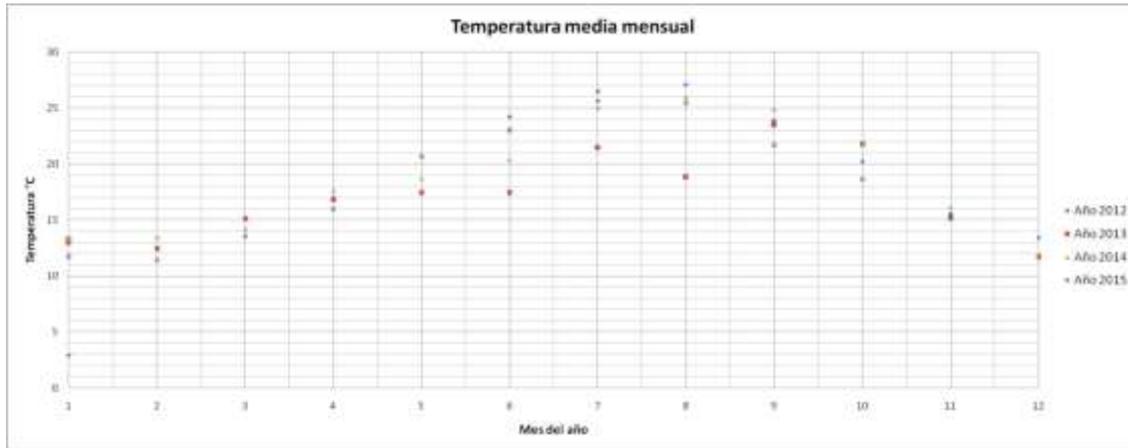


Figura 4.14 Temperatura media mensual Valencia, España

La temperatura ambiental es una de las variables que influye más en nuestros procesos. Estas gráficas, que muestran el comportamiento de los últimos años, ayudan a reflejar la variación de la temperatura que nos servirá en el cálculo de la variable de corrección que se agregue en el algoritmo de visualización de imágenes termográficas, debido a la hora de toma, día, mes y estación del año. Dejándonos la buena experiencia de que cada vez se hace más conciencia de la captura y conservación de variables como estas, para su estudio, la gráfica específica para obtener los factores de corrección se muestran en el siguiente apartado. Anteriormente, se habían considerado en un estudio previo [10]; en dicho trabajo únicamente se consideraban las variables relacionándolas con la visibilidad de la tubería, manipulando las imágenes para obtener dichos factores, que ahora se busca sean "generales". Una de las conclusiones de dicho estudio es que no es adecuado llevar a cabo toma de imágenes en días de mucho calor, ya que las temperaturas altas saturan la imagen.

#### 4.5. Imágenes: tipos y diferencias

Una imagen termográfica como tal es muy similar a una imagen tomada por una cámara digital. La cámara termográfica genera imágenes con extensión .jpg con características propias de los infrarrojos. A grandes rasgos, aunque a simple vista parecen iguales, una imagen común y una imagen IR tienen diferencias. Una imagen es una representación visual que manifiesta la apariencia visual de un objeto real o imaginario.

La imagen, como campo de estudio, tiene muchas vertientes que dependen de la línea temática, y provee mucha información, por medio de sí misma. Tiene como funciones características la función representativa, la simbólica y la semántica. La primera de ellas es aquella que se refiere a los casos en los que la imagen quiere decir lo que está reproduciendo. La segunda se refiere a la imagen con un significado o concepto añadido por las personas. La última se produce cuando la propia imagen es la que actúa como signo, ya que la conexión entre dicha imagen y su sentido es completamente arbitraria.

Las imágenes se pueden clasificar de acuerdo a su materialidad, basándose en múltiples criterios; éstas pueden tener diferentes extensiones en función de sus características. Las más populares hoy en día son quizá la .jpg, .raw, .png, .psd. Las imágenes, en un principio se buscaba que contaran con una extensión "estándar", pero al ser producidas por un software específico o con un fin propio adquirirían una extensión propia. Las utilizadas para nuestra investigación, son obtenidas por una cámara termográfica, imágenes que poseen

características propias, que proveen información para fines específicos y que pueden ser utilizadas con diferentes softwares después de un tratado o conversión de la imagen.

Algunas breves descripciones de los tipos de archivo de imágenes se describen brevemente:

- **JPG:** el más popular, cuenta con compresión mínima sin pérdida de calidad y su poco tamaño.
- **RAW:** aporta toda la información en el momento de la toma, facilita la manipulación sin pérdida de calidad en un post procesado.
- **PSD:** nativo de photoshop. Guarda los datos de la imagen con la que se está trabajando.
- **BMP:** mapa de bits, crado para MS DOS y Windows por Microsoft, son principalmente imágenes del sistema operativo, es un formato muy pesado y es menos usado hoy en día.
- **TIFF:** es un archivo estándar compatible con Windows, Linux, Mac, etc. Tiene alta calidad, es pesado; pertenece a Adobe.
- **XCF:** nativo de Gimp.
- **GIF:** como imagen tiene poca calidad, fue creado para logotipos, imágenes vectoriales, acepta transparencia y animaciones, ocupa muy poco.
- **PNG:** aporta más calidad, mantiene transparencia, no acepta animaciones y aporta más calidad que el GIF en imágenes.
- **EPS:** guarda archivos de imagen y vectoriales, en imprentas es muy usado a la par del TIFF.
- **PCX:** nativo de paintbrush, que es reconocido por pocos programas si el ordenador tiene instalado dicho programa, perteneciente a Windows.
- **PICT:** nativo de Mac, para trasferencia de archivos de imagen entre programas.
- **DGN:** nativo de adobe, tiene similitud con el RAW, tiene mayor flexibilidad para trabajar con cualquier sistema, utiliza compresión efectiva sin pérdida de calidad.
- **WMP:** nativo de Windows, fue ideado para sustituir al JPG, con la misma calidad pero mitad de espacio ocupado.
- **PSD:** nativo de photoshop, permite trabajar con archivos muy grandes, guarda imágenes HDR, de 32 bits por canal, trabajable por Photoshop CS o superior.
- **JP2:** se diseñó para sustituir al JPG, con mayor compresión y adaptación que permite conservar detalles en áreas seleccionadas, tiende a emborronar demasiado la imagen y elimina pequeños detalles y texturas; dadas los “contras” no ha llegado a cumplir su fin.

Un pixel es la cantidad más pequeña en una imagen y, permite asignar el tamaño a la imagen, de puntos de color por pulgada. Las imágenes están formadas por estos pixeles que se representan por minúsculos rectángulos de color que, al observarse todos en conjunto, proporcionan la representación total de la imagen. Éstas se denominan imágenes en mapa de bits; para dar color a las imágenes se tienen el modelo de color RGB, por sus siglas en inglés *Red, Green, Blue*; es decir, la composición del color en términos de intensidad de los colores primarios de la luz pueden representar un color mediante su mezcla. El modelo RGB no define por sí mismo lo que significa exactamente rojo, verde o azul, por lo que los mismos valores RGB pueden mostrar colores notablemente diferentes en distintos dispositivos que usen estos modelos de color. Existe también el modelo CMYK, por sus

siglas en inglés *Cyan*, *Magenta*, *Yellow* y *Key*; este es un modelo de color sustractivo utilizado en la impresión de colores, más moderna y precisa que el modelo RGB. Permite presentar una gama de colores más amplia y tiene mejor adaptación en los medios industriales, sin embargo ha sido el establecimiento del modelo de color RGB, el que permitió que sistemas que capturan imágenes (cámaras digitales de fotografía y video, escáneres etc.) hayan sido creados. Las imágenes bajo el modelo RGB, habitualmente cuentan con extensión JPG, para visualización e impresión; sus canales pueden ser separados, y alberga 256 diferentes tonalidades en cada canal que al combinar los diferentes valores permite un total de 16.777,216 millones de diferentes tonalidades como resultado. Cada imagen tiene un tamaño de 8 bits por píxel. En la Figura 4.15, se tiene la representación del espacio tridimensional RGB. Cuando observamos una imagen en la pantalla del ordenador, ésta siempre se nos representa en mapa de bits independientemente del tipo de imagen que se trate, pues el monitor muestra todos los contenidos mediante píxeles. Sin embargo, las diferencias resultarán decisivas cuando recuperemos la imagen asignándosele una extensión en cualquier medio de reproducción.

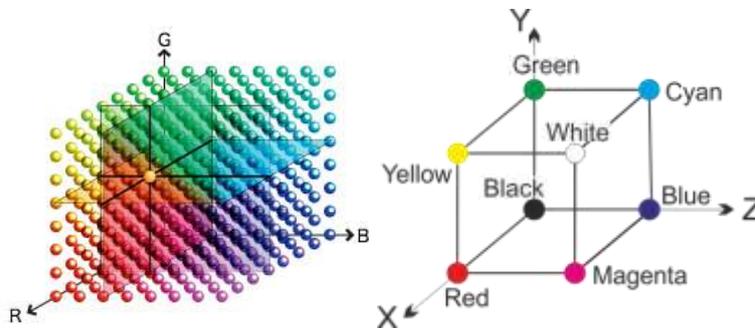


Figura 4.15 Representación del espacio tridimensional RGB

La cámara termográfica como dispositivo forma imágenes luminosas, visibles por el ojo humano a partir de las emisiones de infrarrojos de la escena detectada. Los colores de las imágenes termográficas se conocen como falsos colores o pseudocolores, ya que no son los que corresponden a la radiación infrarroja. Su función es la de representar las temperaturas como las diferentes alturas del relieve de un mapa (se muestra un ejemplo en la Figura 4.16). La cámara capta la radiación que emiten los objetos y convierte los datos en una imagen con la distribución superficial de temperaturas del objeto observado.



Figura 4.16 Paletas de izquierda a derecha: *Inverted grey*, *iron*, *medical*, *rain*, *greyred*.

Las imágenes termográficas generadas por la cámara FLIR que se usa en la investigación, se generan con el modelo de color RGB. El sistema de codificación de imagen es el JPG, tienen un tamaño de  $600 \times 480$  píxeles, con resolución de 72 ppp sus tres canales. Tienen una profundidad de 24 bits y un tamaño de archivo variable entre 500 kb - 1,5 mb, el cual es adecuado para generar muchas imágenes durante las tomas. La posibilidad de trabajarlas imágenes con un programa comercial radica en los valores de temperatura. Es decir, principalmente, en el mapa de temperaturas, más que en la escena en sí; recordemos que los colores de una imagen termográfica son denominados pseudocolores, que pueden ser

modificados asignando diferentes paletas de colores prediseñadas para visualizar un contraste mayor en las imágenes sin afectar los valores de la temperatura.

En la buena práctica de la termografía las escalas con más colores son las mejores para ver desperfectos, cosas no visibles a simple vista, áreas y cambios de temperatura, de una forma más clara. En el estudio de imágenes producidas con cámara termográfica, la combinación de la numeración de los canales dará una combinación de colores que identificará al pixel asignando un valor de temperatura que es independiente de la combinación de colores de los canales. Sin embargo esa combinación no es fija, y puede variar dependiendo de la escala elegida para la presentación de la imagen, más en referencia a la escala térmica sí que habrá relación.

#### 4.5.1. Representación numérica de las imágenes termográficas

Las imágenes termográficas al ser mapas de temperatura, pueden ser representadas también con valores numéricos. Además de las imágenes "comunes" obtenidas por la cámara (imágenes con extensión .jpg), una tabla de iguales dimensiones en pixeles que la imagen, puede ser generada por medio del software, propio de la compañía que fabrica las cámaras. Cada pixel, tendrá un dato numérico equivalente a la temperatura en ese punto; son archivos generados como archivos delimitados por comas (.cvs), que permiten que los datos se trabajen con otros software, como cualquier archivo de este tipo.

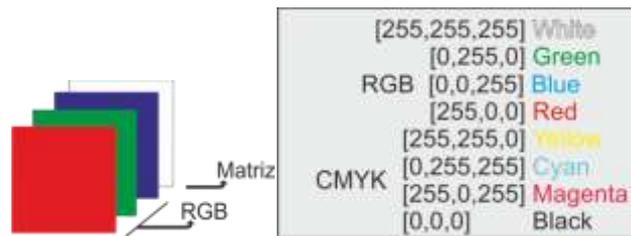


Figura 4.17 Representación de los canales RGB y los valores de la tonalidad

Estas tablas, con datos en forma de matriz pueden ser graficadas, presentarse como un mapa de temperaturas análogo a las curvas de nivel, o bien, si se asigna una escala de color a la temperatura, cada temperatura tendrá un color asignado, dando una imagen análoga a la que genera la cámara. La diferencia será casi imperceptible, un cambio de tonalidad en el color y únicamente un nivel (equivalente a un canal), a diferencia de la otra, que tiene sus tres canales RGB (tres niveles que se combinan para dar tonalidad de color). El archivo se torna polivalente, permitiendo trabajar en otras interfaces, conservando la extensión del programa con el que sean manipulados los datos. Es decir puede convertirse en libro de EXCEL, en archivo de texto o en matriz de MATLAB, por ejemplo. En las Figura 4.18, y Figura 4.19, se muestra la misma imagen en diferentes representaciones.

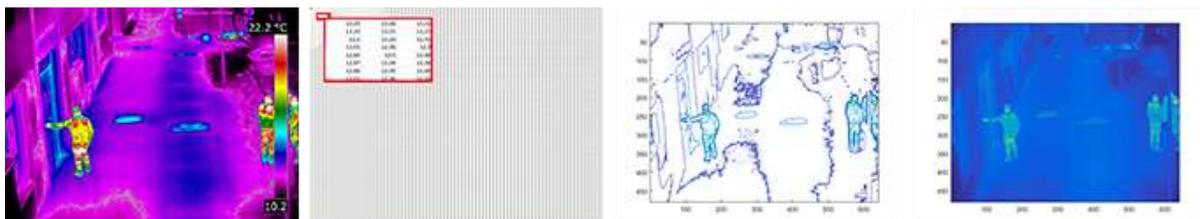


Figura 4.18 Imágenes obtenida por la cámara, archivo .cvs, mapa de temperaturas.



Figura 4.19 Escala predeterminada de la IR (FLIR systems)

#### 4.6. Aplicaciones de la termografía

En 1969, Hudson, es su libro: *Infrared System Engineering*, enlistó más de 100 aplicaciones, dividiéndolas en 4 categorías principales: militar, industrial, médica y científica, categorías mostradas en la Tabla 3.3. Cada categoría la dividió a su vez en las siguientes categorías: (1) búsqueda, seguimiento y rango, (2) radiometría, (3) espectro radiométrico, (4) imágenes térmicas, (5) flujo reflejado y (6) fuente de cooperación. Hoy en día, las dos categorías amplias serían el uso militar y el comercial.

Tabla 4.3 Aplicaciones representativas de los sistemas de imágenes térmicas según Hudson

Community	Applications	
Military	Reconnaissance, target acquisition, fire control, and navigation	
Commercial	Civil	Law enforcement, firefighting, and building integrity
	Environmental	Earth resources, pollution control, and energy conservation
	Industrial	Predictive maintenance, manufacturing, and nondestructive testing
	Medical	Mammography, soft tissue injury, and arterial constriction

La clasificación representativa hecha por Hudson nos da una visión general de las áreas en las que se puede usar la termografía debido a la amplitud de las significativas aplicaciones en las diferentes áreas como lo son la agropecuaria, la medicina, la electricidad, la construcción etc. En el campo de la ingeniería ha sido utilizada para diferentes objetivos, como lo son la evaluación de materiales y de evaluación de sistemas de riego, por citar algunos ejemplos. En medicina cada vez son más las evaluaciones de salud que se hacen con una cámara termográfica. Una cámara térmica (o cámara TIR) no es una herramienta convencional ni de uso común. Sus características específicas hacen que su coste sea bastante elevado. Las cámaras infrarrojas se han convertido en sistemas similares a las cámaras de vídeo, son sencillas de usar y producen imágenes de muy alta resolución en tiempo real.

En todo el mundo son muchas las industrias que han descubierto en la termografía infrarroja las ventajas que puede aportar en sus programas de mantenimiento preventivo, dejando esta tecnología sin límites. Hablando acerca de las imágenes por infrarrojos, se puede observar que las aplicaciones de la termografía en el mantenimiento preventivo no tienen límites.

Las publicaciones donde tiene intervención la termografía apuntan a que ésta **es una herramienta muy útil y en apariencia, fácil de usar para la detección y comprobación de fugas en tuberías y conducciones**, incluso, cuando éstas se encuentran bajo el suelo o en las paredes. Ejemplos típicos son la detección de fugas en calefacciones de suelo radiante o en sistemas de calefacción comunitaria. Sabemos que determinar la localización de una fuga, evitaría obras de excavación innecesarias, ahorrando costes de mantenimiento. He ahí que nos aventuramos en la investigación más a fondo del tema.

El *boom* de los drones, las ventajas de los dispositivos portátiles y la facilidad de portar información, son elementos positivos en el uso de la termografía. Hasta ahora, diversas aplicaciones en combinación sea un dron o un instrumento acústico, se han usado. Es de hacer que se continúan teniendo los mismos objetivos, más la posibilidad de obtener imágenes más nítidas, que contengan mejor la zona de estudio, que sean obtenidas en espacios inaccesibles al ser humano, etc. representan ya una ventaja y avance en materia del uso de la termografía.

#### ***4.7. La Termografía como END***

Hay un interés en aumento, respecto a utilizar la termografía como END, debido a su facilidad para captar grandes áreas en imágenes sin contacto. Ya que la técnica está basada en diferencias de temperatura, pueden ser susceptibles al ruido térmico, emisibilidad o variaciones de calor desiguales (como se explicó en el capítulo tres).

Hay 3 niveles de medición termográfica:

- Medición de la diferencia de la señal eléctrica, que procede de la cámara correspondiendo a los dos estados del sistema observado (medición relativa); esta variación es débil y, por tanto, proporcional a la variación correspondiente de la temperatura.
- Medición de la diferencia de temperatura entre dos estados del sistema observado (medición diferencial).
- Medición de la temperatura T (medición absoluta).

Hay dos principales tipos de termografía:

- La termografía pasiva, es la que no requiere estimulación de calentamiento o enfriamiento externo para tener una radiación de calor y obtener un resultado. Así el objeto en estudio produce un patrón de temperaturas típico de su proceso que produce calor, y cualquier diferencia como un patrón típico de temperaturas, sugiere una anomalía o un comportamiento inusual
- La termografía activa, es lo contrario a la pasiva, ya que requiere un aporte de energía al sistema en estudio, es decir, requiere una estimulación externa para obtener diferencias de temperatura significantes que sugieran presencia de comportamientos inusuales o anomalías.

En aplicaciones tipo END, la medición absoluta se encuentra en la termografía pasiva (por ejemplo: detección de puntos calientes). En cambio, la termografía activa generalmente no necesita más que de mediciones relativas.

Algunas aplicaciones de interés: Detección de anomalías térmicas como resultado de:

- Diferencias en la resistencia térmica
- El uso de ciclos de calor del ambiente
- Las diferencias en el estado físico
- Problemas de flujo de fluidos
- La fricción
- Condiciones exotérmicas o endotérmicas no homogéneas
- Medición de temperaturas en el campo

La termografía es una técnica multifacética para la evaluación; algunas de las técnicas que se pueden mencionar son las siguientes:

- QIRT: Quantitative Infrared Thermography
- END: Evaluation No Destructive
- FPA: Focal Plane Array
- NETD: Noise Equivalent Temperature Difference
- IFOV: Instantaneous Field of View

En estas técnicas, los instrumentos y los procesos de tratamiento de las imágenes deben estar calibrados, porque las interpretaciones de las imágenes están basadas sobre los modelos realistas, conduciendo a identificaciones cuantitativas de parámetros.

La termografía es un método END primario. Se le denomina primario porque trabaja haciendo una comparación de un objeto en el tiempo (es el más simple de sus usos), es decir: conociendo las características de buen estado o funcionamiento del objeto en estudio y notando los cambios generados por el paso del tiempo, en el estudio realizado con la cámara; se puede tornar más complejo si se agregan más técnicas o se usa equipo sofisticado, como bien puede ser el análisis de la imagen en sus numéricas además de la mera evaluación cualitativa.

Podemos citar algunas de las ventajas de las cámaras de infrarrojos:

- Son tan fáciles de usar, como una cámara de vídeo.
- Los rayos infrarrojos nos permiten ver lo que los ojos no.
- Toma de imágenes a cualquier hora del día, sin distinción.
- La representación básica de las imágenes IR tiene diferentes escalas de colores.
- Son relativamente ligeras.
- Dan una imagen completa de la situación.
- Realizan inspecciones con los sistemas funcionando bajo carga.
- Identifican y localizan el problema.
- Miden temperaturas.
- Almacenan información.
- Indican exactamente las medidas a tomar.
- Encuentran el problema antes de que éste se produzca.
- Ahorran tiempo y dinero.

Podemos citar algunas de las desventajas de las cámaras de infrarrojos, o limitaciones más que desventajas:

- Son relativamente costosas.
- Se requiere una capacitación para un mejor uso y entendimiento de resultados.
- Hay que considerar las variables atmosféricas en el uso de la cámara.
- El tipo de día o las nubes, influyen en las imágenes.
- Su tecnología avanza rápido, requiriendo más capacitación.

Las ventajas y desventajas de las imágenes termográficas van ligadas también al tipo de trabajo que se lleva a cabo, ya que las mediciones pueden ser cualitativas y cuantitativas.

En general, la principal **ventaja** consiste en que las imágenes termográficas proporcionan información que no es visible al ojo humano a simple vista. Las imágenes pueden ser tomadas a cualquier hora del día, puede haber luz o no durante la toma de las imágenes. Las imágenes podrían ser tomadas por personal que no sea altamente cualificado, la cámara es fácil de transportar y requiere poco espacio para ser montada. Además, permite identificar el mal funcionamiento en aparatos o dispositivos que utilicen energía, se pueden revisar infraestructuras y seres vivos, y es, por tanto, una buena opción como un método de información no destructivo ni invasivo.

Como **desventaja** podemos mencionar que al representar cambios de temperatura, quizá en ambientes con elevada temperatura será complicado discernir pequeñas diferencias. Adicionalmente, es obvio que hay que disponer del equipo (la cámara), que es un dispositivo costoso si se pretende adquirir para usos limitados.

Al detectar anomalías invisibles al ojo humano, existe una posibilidad de prevenir errores y fallos que puedan suponer grandes pérdidas económicas. Por tanto, la termografía se convierte en una herramienta que tiene la posibilidad de ser útil en los tres campos siguientes: (1) como herramienta de exploración para determinar la situación cualitativa de un sitio; (2) como mantenimiento predictivo al hacer monitoreo programado para determinar la situación de un sitio, la infraestructura o dispositivo; y finalmente (3) como una herramienta preventiva, una vez estimado el tiempo necesario entre monitoreo y monitoreo para evaluación.

La termografía ha demostrado tener cualidades para hacerse una herramienta END útil [12]. Sin embargo es preciso considerar las características propias de la cámara y de los componentes de inspección que se usen: el modelo de cámara termográfica, las características del medio y los programas a utilizar para el procesado de datos, además de si existirá un proceso o tecnología adicional para hacer más robustos los resultados obtenidos. No olvidemos que la cámara de infrarrojos mide y toma imágenes de la radiación infrarroja emitida por un objeto; la radiación es, además de una función de la temperatura de la superficie de un objeto, una función de la emisividad. Existe también la radiación originada en el entorno del objeto, la radiación procedente del objeto, la radiación reflejada, que se ve influida por la absorción de la atmósfera, y otras variables. En resumen la tecnología de infrarrojos tiene ventajas, aplicables como END, más tiene muchas variables que se relacionan.

Con el avance tecnológico, el acceso a equipos más sofisticados es más simple y efectivo; en los sistemas de distribución de agua potable, una de las preocupaciones es la localización y mitigación de fugas de agua que no son visibles; para ello diversas técnicas, métodos y

herramientas han sido utilizadas para dichos efectos, algunos de los métodos denominados como evaluación no destructiva, son el GPR [13], el ultrasonido [14], los sensores [15] que han mostrado eficiencia, la termografía es nueva en el área de detección de fugas pero menos nueva como método END que ha arrojado ya resultados en diversos campos de la investigación, principalmente en medicina donde permite determinar por medio de imágenes algunas características en los pacientes. Es una técnica no invasiva que trabaja a nivel superficial, que permite trabajar cierta profundidad, no es necesario el contacto directo y no se compromete a nivel estructural, se considera una técnica segura, rápida y portátil. Hay que resaltar los beneficios, posibilidades y fallos del sistema.

Se puede mejorar la END termográfica por medio de tratamiento de imágenes que tienen influencia sobre las características de las cámaras. Por ejemplo el NETD, también conocido como sensibilidad térmica de la cámara, es una variable propia de cada modelo en particular, del cual depende la detección de los defectos utiliza por un lado la sumatoria temporal, es decir una imagen media de una serie de imágenes sucesivas; por otra parte, usa la sumatoria espacial que consiste en hacer una imagen media cuyos píxeles son medias aritméticas de los píxeles adyacentes. Después, se pueden observar las distribuciones comparativas. Sin embargo, a veces, su efecto benéfico va acompañado de una disminución de la frecuencia efectiva de las imágenes.

Así, la termografía tiene potencial para convertirse en una herramienta END, más su desempeño se puede acotar a tres elementos: (1) la capacidad de detección intrínseca del método usado (o sus combinaciones); (2) el factor relacionado con la aplicación, en particular para condiciones ambientales alrededor del objeto en estudio; y, por último, (3) el factor humano que es importante para la correcta manipulación de la cámara e interpretación de resultados.

Para la década de los 90 se comercializó la primera cámara termográfica y a partir de entonces surgieron múltiples aplicaciones y estudios sobre termografía. De 193 documentos encontrados durante la investigación del tema de termografía como ensayo no destructivo, una diversidad de aplicaciones se hizo visible. A manera de resumen se realizó un diagrama (Figura 4.20), donde en el eje de las abscisas se tiene la escala de tiempo en el eje de las ordenadas la clasificación de los temas de estudio basadas en Hudson, incluyendo la investigación de la tecnología en sí. La muestra es representativa, y se puede observar que la información crece en forma exponencial con el tiempo. A grandes rasgos, se puede hacer notar la recurrencia del uso de la termografía como END, como herramienta de mantenimiento y de predicción con un auge en aumento a partir del año 2005, a solo 15 años de la comercialización de la cámara termográfica.

Una imagen infrarroja permite visualizar y verificar instantáneamente el desempeño térmico de un objeto o bien de una zona. Así, con la cámara, es posible visualizar los problemas y cuantificar de alguna manera la precisión de la temperatura como un elemento de contacto.

En [16] el propósito del uso de la termografía era estudiar la separación de la capa límite laminar sobre cuerpos aerodinámicos (burbujas). En [17] se enfocaba en analizar el rendimiento de un deportista de alto rendimiento. En [18] se muestra una revisión sobre la detección de objetos enterrados identificados con termografía. En [19] se muestra una revisión de la termografía infrarroja para supervisión de condiciones, incluyendo obra civil, componentes eléctricos, maquinaria, inspección por corrosión, monitoreo de soldaduras y sus aplicaciones en la industria nuclear. En [20] es utilizada como END pasiva para

localizar minas enterradas por medio del intercambio de calor del terreno donde yacen, a base de experimentación

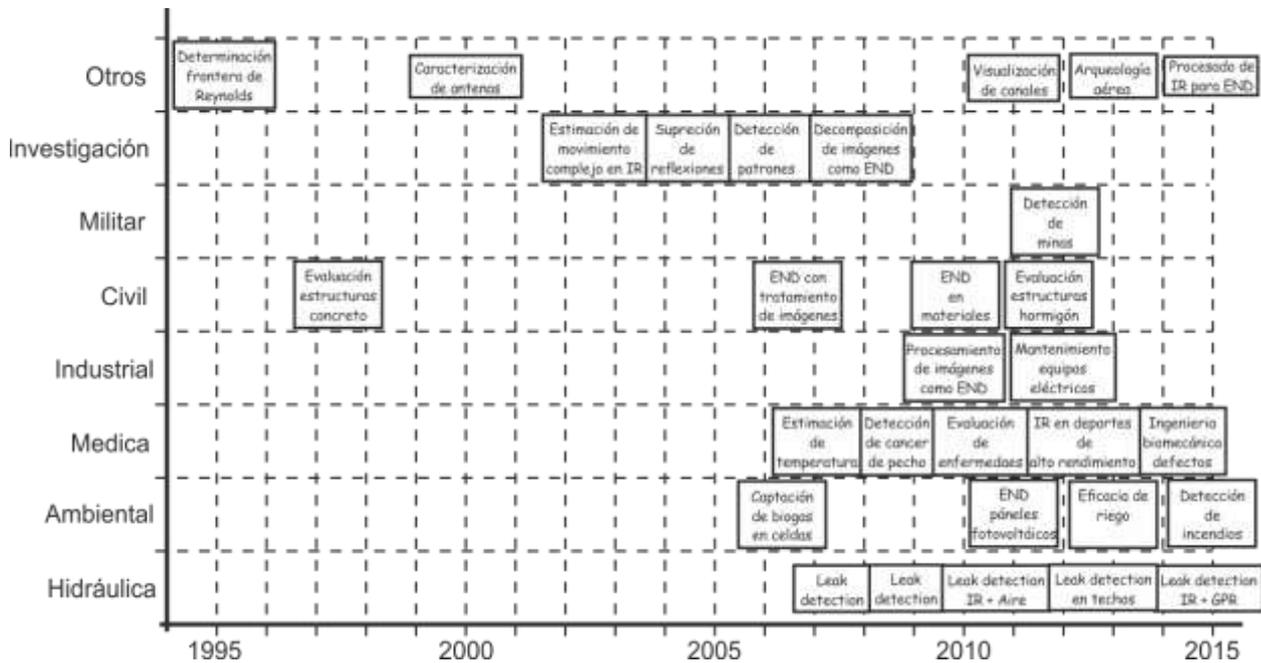


Figura 4.20 Cronología de artículos búsqueda con palabras claves.

La termografía tiene muchas aplicaciones, combinadas con la tecnología que se desarrolla en nuestra época, se está convirtiendo en una herramienta tanto científica como con otros usos, de seguridad, de esparcimiento etc.

#### 4.7.1. Toma de imágenes de calidad y sus variables para análisis de fugas

Para tener imágenes de calidad, en primera instancia acudimos a los datos técnicos de la cámara, serie y modelo. Para nuestra cámara FLIR SC620, obtuvimos la distancia mínima de enfoque, el tipo de enfoque, el zoom, la mejora digital disponible, el tipo de ajuste de imagen, el rango de temperatura de objeto, las correcciones de emisividad, el tiempo entre toma y toma de imagen y los datos ambientales. En los datos técnicos existen más variables que no eran necesarias al ser descriptivas de las características que no cambian.

Referente a las variables atmosféricas, la toma de imágenes es mejor por la mañana muy temprano o por la tarde donde son más notorios los cambios de temperatura, pues es cuando la imagen, nos puede generar más contraste y mostrar más objetos que no serán visibles si se satura la imagen. Referente a las variables de la cámara, se tomó en cuenta la distancia mínima de enfoque, que una imagen desenfocada aporta menos información o información confusa, no se usaba zoom, más bien se estableció el sitio de colocación de la cámara que no fue modificado, se asignó el rango de temperatura de -40 a +120°C, programando un tamaño de imagen que fuese adecuado para trabajar.

El resto del proceso para la obtención de imágenes de calidad, se limitaba a la manipulación de la cámara, al ingreso de las variables de trabajo en la cámara para su proceso interno y en el enfoque a la zona de estudio. Se determinó que la cámara permaneciera estática mientras llevaba a cabo la toma, además que el tiempo de toma de la cámara permitiera que la zona de estudio se "equilibrara" y generara muestra de imágenes nítidas y con un contraste aceptable. El tamaño de imagen elegido fue de 640 × 480 píxeles, el tamaño medio que

aporta datos y tiene un tamaño de archivo aceptable y al inicio de cada toma se capturaban las variables climatológicas del día.



**Figura 4.21** Imagen obtenida por una cámara termográfica, escala de color *Iron*

La medida de la temperatura en detalles pequeños pierde mucha precisión con resoluciones bajas, debido a que un píxel grande también recoge radiación proveniente del entorno. Al promediar la radiación total, la lectura de la temperatura será falsa. Por citar un ejemplo, para una imagen tomada con 3 resoluciones distintas ( $120 \times 160$ ,  $340 \times 240$ ,  $640 \times 480$  píxeles IR), una lectura que ofrece cada resolución pasa de  $98,8 \text{ °C}$  ( $120 \times 120$ ), y  $123,9 \text{ °C}$  ( $320 \times 240$ ) al valor más válido de  $182,2 \text{ °C}$  ( $640 \times 480$ ).

Las variaciones de la temperatura y de los píxeles se pueden relacionar por medio de una ecuación estricta de igualdad, donde se colocan las variables correspondientes de los canales RGB en igualdad con una única temperatura con dos decimales. Sin embargo podría no representar mucha variación, más si mucho trabajo de pre-proceso, ya que esta relación solo sería válida para esa imagen, ya que al cambiar los colores, lo haría también la configuración.

## 5. ANÁLISIS CON ORDENADOR COMO END

### 5.1. Modelos científicos

La posibilidad de obtención de información de nuestra época, permite trabajar con modelos científicos. Un modelo científico es una representación abstracta (conceptual, gráfica o visual) física de fenómenos, sistemas o procesos a fin de analizar, controlar y/o predecir los mismos. Permite determinar un resultado final, a partir de unos datos de entrada. Esto es una descripción muy general de los modelos, sin olvidar que tanto la palabra como el concepto son polivalentes.

El concepto modelo ha evolucionado, desde los primeros modelos acuñados hace años, más su concepto continúa siendo el mismo: representar un fenómeno (la mayoría de las veces formal). En últimos años, se ha presentado una tendencia al uso de modelos y la diversidad de técnicas ha ampliado el abanico de procesados computarizados.

Un modelo es utilizado a fin de analizar, describir, explicar, simular -en general, explorar, controlar y predecir- esos fenómenos o procesos. Cuentan con reglas de representación del *input* y el *output* que permiten construir el modelo partiendo de una realidad física, definiendo un conjunto de datos de entrada "*input*" a partir de los cuales el modelo proporcionará los datos de salida del proceso, el resultado "*output*".

La estructura interna dependerá del tipo de modelo, que permite definir la correspondencia entre el *input* y el *output*. El modelo es determinista si al *input*, le corresponde el mismo *output* y no determinista si al mismo input le pueden corresponder diferentes *outputs*.

Tanto las reglas de presentación, como el funcionamiento interno del modelo, únicamente tendrán sentido en un determinado ámbito científico. En situaciones ajenas al ámbito puede no existir una representación adecuada de los datos o resultados irreales al no tener una estructura interna válida para ese tipo de situación fuera del ámbito normal del modelo.

Los tipos de modelos se clasifican por la estructura interna más que por detalles formales del ingreso de datos. Los modelos se clasifican en:

- Modelos físicos; representación a escala del objeto de estudio
- Modelos matemáticos; representación de fenómenos o relaciones entre ellos a través de una formulación matemática, se clasifican en:
  - Modelos deterministas; se asume que los datos usados y los fenómenos estudiados son conocidos, fórmulas exactas y resultados precisos.
  - Modelos estocásticos y probabilísticos; no hay datos conocidos, implica que el resultado es una probabilidad y existe incertidumbre.
  - Modelos numéricos; La realidad física y condiciones iniciales se representan teóricamente, típicamente expresadas en forma matemática, los resultados reflejan efectos en el comportamiento, permiten comprensión del fenómeno en estudio.
- Modelos gráficos; Son la representación de datos numéricos por medio de recursos gráficos.

- Modelos análogos; regidos por formulaciones matemáticas idénticas, que se basan en analogías que se observan desde el punto de vista de comportamiento de sistemas físicos.
- Modelos conceptuales; son mapas de conceptos y sus relaciones, incluyendo suposiciones acerca de la naturaleza tanto de los fenómenos que esos conceptos representan como sus relaciones con alto nivel de abstracción.

La representación puede ser como sigue:

- De tipo conceptual, por una descripción cualitativa bien organizada que permite la medición de sus factores.
- De tipo matemático, como una representación numérica por aspectos lógicos y estructurados con aspectos matemáticos. Este tipo de modelos adquieren el lenguaje matemático, puede incluir graficas e imágenes, representando un modelo gráfico.
- De tipo físico, cuando una realidad se reproduce con un sistema simplificado, un modelo a escala o un prototipo que guarde cierta relación con la realidad a modelar. Estos modelos representan el fenómeno estudiado utilizando relaciones físicas a escala con el prototipo para hacerlo manejable, con números adimensionales principalmente, muy utilizado en la hidráulica para evaluar comportamientos y diseñar elementos hidráulicos.

## ***5.2. Modelaciones con ordenador***

Un modelo matemático es uno de los tipos de modelos científicos. Emplean algún tipo de formulismo o descripción matemática para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables de las operaciones. Esto con objeto de estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

Su éxito o fracaso depende de la precisión con la que se construya esta representación numérica, la fidelidad con la que se concreten hechos y situaciones naturales en forma de variables relacionadas entre sí.

Un modelo matemático consta al menos de tres conjuntos básicos de elementos:

- Variables de decisión: son incógnitas que deben ser determinadas a partir de la solución del modelo.
- Parámetros: representan los valores conocidos del sistema o bien que se pueden controlar.
- Restricciones: son relaciones entre las variables de decisión y magnitudes que dan sentido a la solución del problema y las acotan a valores factibles.

El proceso para elaborar un modelo matemático es el siguiente:

- Encontrar un problema del mundo real
- Formular un modelo matemático acerca del problema, se deben identificar las variables (dependientes e independientes) y estableciendo hipótesis lo suficientemente simples para tratarse de manera matemática.
- Aplicar los conocimientos matemáticos que se poseen para llegar a conclusiones **matemáticas**.

- Comparar los datos obtenidos como predicciones con datos reales. Si los datos no representan con fidelidad deseada la realidad, se reinicia el proceso.

El objetivo del modelo matemático es extender ampliamente el fenómeno y tal vez predecir su comportamiento en el futuro. El éxito o fracaso de éstos depende de la precisión con la que se construya esta representación numérica. La fidelidad con la que se concreten los hechos y situaciones naturales en forma de variables relacionadas entre sí.

Las clasificaciones de los modelos se hacen según diversos criterios:

a) De acuerdo a la fuente de la información en que se basa el modelo:

- Modelo heurístico: definiciones de las causas o los mecanismos naturales que originan el fenómeno en cuestión.
- Modelo empírico: enfocado en el estudio de los resultados de la experimentación.

b) Por el tipo de resultado pretendido:

- Modelos cualitativos: que pueden valerse de gráficos y buscan interpretar el comportamiento del gráfico.
- Modelos cuantitativos: necesitan dar con un número preciso, para lo cual se apoyan en fórmulas matemáticas de variada complejidad.

c) Según el objetivo del modelo:

- Modelo de simulación: que intenta adelantarse a un resultado en una determinada situación.

Básicamente, en un modelo matemático advertimos 3 fases: (1) la construcción, proceso en el que se convierte el objeto a lenguaje matemático; (2) el análisis o estudio del modelo confeccionado; y (3) la interpretación de dicho análisis, donde se aplican los resultados del estudio al objeto del cual se partió. Bajo este concepto se consolidarán las bondades de un modelo "matemático" como una técnica no destructiva análoga a la END.

La manera de evaluar el desempeño de un modelo es por medio de la calibración, que consiste en determinar las características físicas y operacionales de un sistema existente, que ingresados como datos al modelo computacional permitan obtener resultados realistas. Esto por medio de comparación entre los resultados de comportamiento del modelo con el comportamiento real, realizando ajustes a los parámetros del modelo y la revisión de los resultados reales hasta alcanzar la concordancia del modelo con la realidad.

### ***5.3. Análisis de datos con machine learning y redes neuronales***

Para el análisis de detección de fugas en redes de abastecimiento de agua se han aplicado desde hace décadas diferentes modelos científicos, cada uno con estructura propia y nombre propio. Con el paso del tiempo, nuevos modelos surgen con diferentes técnicas y algoritmos, cada uno con algo nuevo, algunos basados en elementos de la naturaleza y su comportamiento, algunos más potentes que otros, otros con nuevas versiones de las primeras en fin, una variedad muy amplia. Estos métodos, para un fin específico, por sí solos, dan resultados adecuados con los datos correctos, pero bien se pueden trabajar en conjunto alimentando con resultados de uno a otro o complementando procesos; algunos fueron mencionados en el capítulo 2. En esta subsección se profundizará un poco más acerca de los métodos con los que podríamos trabajar en el presente trabajo; hemos de recordar que se

centra en la detección de fugas, por ello necesitamos datos que alimenten los modelos y para ello se trabaja con un modelo hidráulico y se aplicarán algunas técnicas para llevar a cabo nuestro fin.

Algunos de los modelos que tienen potencial para ser utilizados son:

**Análisis de componentes principales; PCA** (por sus siglas en inglés, *Principal Component Analysis*): Son modelos que, técnicamente, buscan la proyección según la cual los datos queden mejor representados en términos de mínimos cuadrados. En estadística, es una técnica utilizada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos y convierte un conjunto de observaciones de variables posiblemente correlacionadas en un conjunto de valores de variables sin correlación lineal llamadas *componentes principales*. Realiza una cartografía lineal con el fin de seleccionar un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto de datos original. En este nuevo marco de coordenadas, el primer eje se selecciona en la dirección en la que se maximiza la varianza de datos; después, el segundo eje es seleccionado con la segunda dirección y así sucesivamente; véase la Figura 5.1. Con tal información, la idea es identificar los componentes principales (ejes) que mejor explican los datos, con el fin de reducir su dimensión

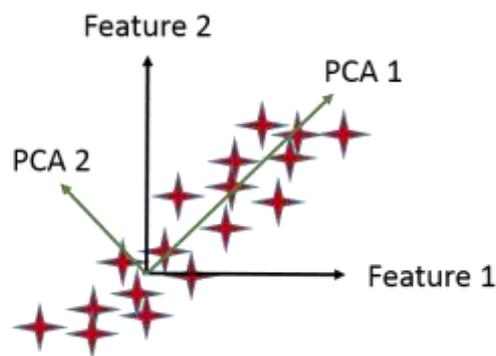


Figura 5.1 Análisis de componentes principales

PCA es una buena opción para construir un modelo estadístico de los datos del conjunto y a través de su análisis residual, es posible determinar si nuevos datos pertenecen al modelo aprendido. Se emplea sobre todo en el análisis exploratorio de datos y construcción de modelos predictivos.

El análisis de componentes principales ha sido empleado ya con éxito en la detección de fugas en sistemas de distribución de agua. En [21] los autores hacen un análisis de componentes principales multiregional para un sistema de agua potable de la ciudad de Chojnice, Polonia. En [22] se analiza la sensibilidad de PCA para la detección de fugas, estableciendo el tipo de datos que deben usarse. En [23] se emplea una extensión de PCA conocida como Kernel PCA (KPCA) que se puede considerar una extensión no-lineal que es probada en el sistema de agua potable de la ciudad de Chojnice, Polonia. Finalmente en [24] se proponen PCA para analizar las fugas en una red con incertidumbre en el patrón de demanda.

**Máquinas de vector de soporte; SVM** (por sus siglas en inglés, *Support Vector Machine*): Son modelos de aprendizaje supervisado, con algoritmos de aprendizaje asociados, que analizan datos para clasificación y análisis regresivos. El modelo representa a los puntos de muestra en el espacio, separando clases y clasificándolos.

Pertenece a la familia de clasificadores lineales. Dado un conjunto de datos, con dos clases diferentes, un SVM busca el hiperplano óptimo que separará ambas clases. Este hiperplano es óptimo en el sentido de que es un hiperplano con el máximo margen (*gap*) entre las clases que se están clasificando (ver Figura 5.2). Aunque es un clasificador lineal, es posible separar los datos no lineales a través del *kernel trick*.

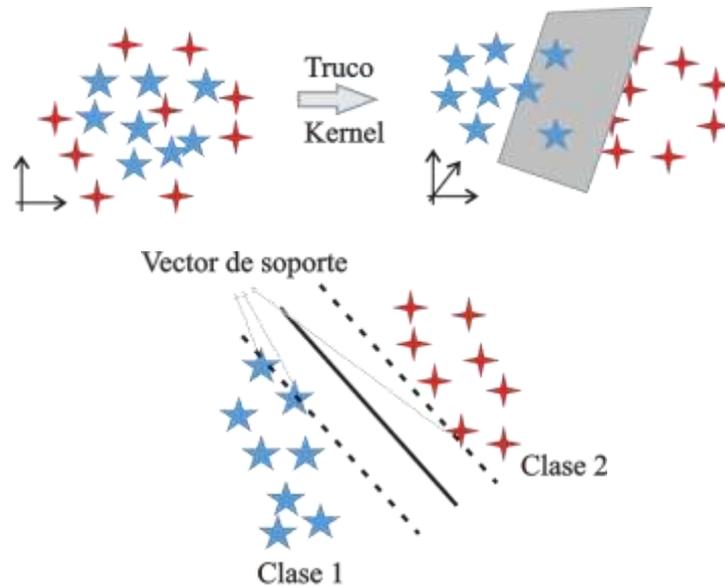


Figura 5.2 Super vector machine, utilizando el truco Kernel

SVM han sido empleados con anterioridad en la detección de fugas. En [25] se emplea un clasificador multiclase para la detección de fugas en la red de distribución de agua de la Universidad de Lille, Francia. En [26], técnicas de clusterización son empleadas junto con un clasificador multiclase, para detectar zonas de fuga en una red de distribución en China.

**Máquina de vector de relevancia, RVM** (por sus siglas en inglés, *Relevance Vector Machine*): Es una de las técnicas de *Machine Learning* que usa inferencia bayesiana para obtener soluciones parsimoniosas para regresiones y clasificación. Tiene algo de similitud al SVM que no usa bayesianas; sin embargo las RVM utilizan el sistema de inferencia bayesiano para simplificar su propia estructura. Como resultado, se utiliza un número menor de vector de soporte (los más relevante) para la clasificación. Su rendimiento es comparable al de SVM, pero con menos parámetros. Esto, típicamente, resulta en una mejora significativa en la velocidad de la predicción. Como contrapartida, el problema de optimización requerido para ajustar el RVM es no convexo. No se tiene registro de su uso en detección de fugas en redes de distribución de agua.

**Kohonen's network:** es un tipo básico de red neuronal artificial no supervisada y auto-organizada, también denominada SOM (*self-organizing map*), útil para visualizar vistas de baja dimensión de datos de alta dimensión, semejante a un escalado multidimensional. La capacidad de auto-organizarse, proporciona nuevas posibilidades; la adaptación a los datos de entrada anteriormente desconocidos. Parece ser la forma más natural de aprender que se utiliza en nuestros cerebros, donde no se definen patrones; adquirió el nombre debido a que el modelo fue descrito por primera vez por el profesor Teuvo Kohonen.

**Artificial Neuronal Network (ANN,** son sus siglas en inglés): es un tipo de red neuronal artificial inspirada en el comportamiento de las neuronas y sus conexiones; estas redes son

modelos artificiales que solucionan problemas difíciles de resolver mediante técnicas algorítmicas convencionales. Son simples, adaptativas e interconectadas entre sí, con capacidad de procesamiento en paralelo y cuyo objetivo es interactuar con su entorno de forma similar a las redes neuronales naturales; algunos tipos de redes: tipo PNN (*Probabilistic Neural Network* por sus siglas en inglés) y redes tipo GRNN (*General Regression Neuronal Network* por sus siglas en inglés).

Se han usado con anterioridad en redes de distribución. Por ejemplo, en [27] se les emplea con lógica borrosa para detectar escenarios con fallas en una red de distribución de agua.

#### ***5.4. Leak detection como evaluación no destructiva***

Los modelos científicos son ampliamente utilizados en diferentes áreas de estudio. Actualmente, los modelos hidráulicos de redes de abastecimiento de agua, son usados frecuentemente por empresas de agua de abastecimiento de agua, ayuntamientos y consultores. Se les emplea con objetivos diversos: para la evaluación de operación de la red, su planificación, diseño y el análisis de calidad de agua. Es importante cuidar aspectos en el modelo ya que para que un modelo sea útil, debe ser fiable (ya que cuanto más fiable es, más útil resulta). De aquí partimos para considerar un modelo científico como una técnica no destructiva, donde la calibración juega un papel muy importante en el buen funcionamiento del modelo.

La detección de fugas en tuberías se utiliza para determinar si y (en algunos casos) dónde se ha producido una fuga en sistemas que contienen líquidos y gases. Los modelos de inteligencia artificial tipo END, son los que buscan llevar a cabo la detección de fugas con la combinación de un modelo hidráulico con algún modelo de inteligencia artificial como pueden ser: Redes neuronales, algoritmos evolutivos, sistemas difusos o alguna técnica *machine learning*.

## **PARTE III: Resultados en el empleo de termografía**



## 6. CASOS DE ESTUDIO

### ***6.1. Interpretación de imágenes IR para identificación de tuberías y posibles fugas***

Ocurre a veces que el conocimiento de la red de abastecimiento de agua es limitado. Los sitios donde yace la tubería pueden conocerse o no (ya sea de datos de proyecto o planos). Pero la obtención de información es lenta requiriendo interpretaciones subjetivas o que, por razones diversas, no tenemos la certeza de la ubicación de algunas tuberías en nuestra red de abastecimiento; sobre todo, cuando la red ha aumentado su tamaño y su registro no se llevó a cabo correctamente. El tiempo de identificación de una estructura en materia de agua juega un papel importante, cuando una pérdida de recurso está en juego. Una imagen termográfica permite poder aislar regiones que contengan información de interés para nuestro objetivo como resultado de experiencia previa. También representa una metodología no invasiva, prometedora, debido a que tiene importantes aplicaciones en diversos campos. Estas ventajas que se pueden adherir a nuestros objetivos: la toma de imágenes se puede llevar a cabo cualquier día y a cualquier hora; las cámaras térmicas permiten áreas relativamente grandes para ser investigadas con eficacia en menos tiempo.

Hasta hace muy pocos años atrás, los métodos acústicos han sido los pioneros en la detección de fugas de agua en redes de distribución. Sin embargo, la llegada de los sensores cambia el panorama. La fuga puede ser detectada por los sensores, situados en puntos estratégicos de la red, mas tienen sus propias dificultades, y surgen problemas principalmente en las tuberías de plástico, que son las más utilizadas hoy en día, por lo que los métodos tradicionales no son adecuados, pues se pierde intensidad sonora debido al material, lo que genera complejidad a la hora de detectar esas fugas. La tecnología nos trajo más métodos y herramientas siendo de los mejores en ésta área el GPR; en [28] se tiene un caso de detección de fugas con GPR; pese a sus bondades no creemos que deba ser el único instrumento en el área por lo que nos adentramos en el estudio de la termografía como método de apoyo.

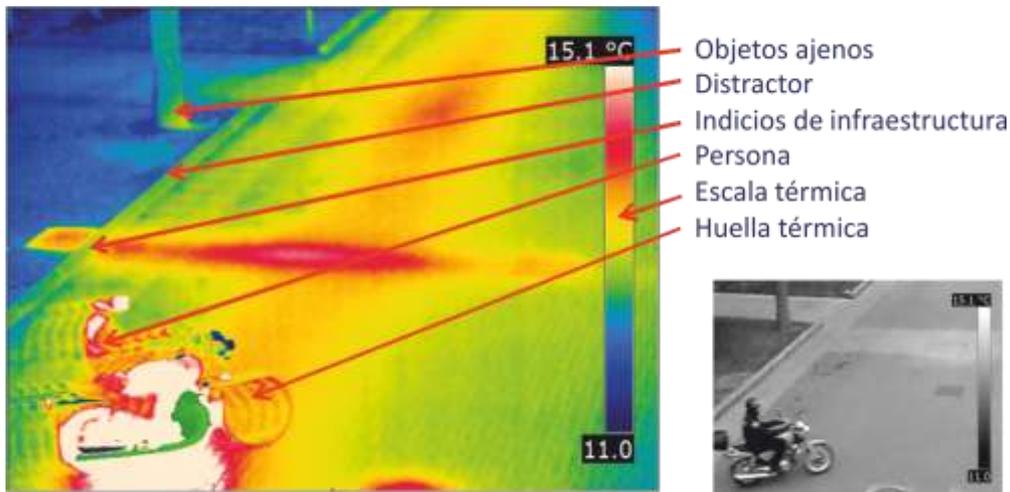
Uno de los análisis se llevó a cabo con el software provisto por el fabricante de la cámara y con software comercial; podremos trabajar "cualitativamente" lo cual nos limita en manipulación de variables y toma de decisiones. Se tendrá para trabajar, la imagen, sus tres canales y una plantilla de valores de temperatura.

#### ***6.1.1. Experimentos anteriores***

La cámara convierte la radiación infrarroja en imagen visible. La diferencia entre la luz visible y la radiación es el color: más obvio proviene de primera, mientras que la radiación solo irradia. He aquí que uno de los factores decisivos en la observación de objetos por medio de infrarrojos es la radiación.

Como parte de la etapa de investigación del programa de doctorado, se llevaba a cabo un trabajo previo de de investigación, denominado: "*Análisis multivariado de imágenes termográficas y sus datos relacionados para la localización de infraestructura enterrada. Estudio específico: Componentes de sistemas de abastecimiento de agua.*", donde se hizo un planteamiento acerca de la necesidad de localizar infraestructura enterrada cuando hay carencia de información. Es decir, se intentó completar esos vacíos que en ocasiones se tienen en los planos de las redes de distribución de agua o simplemente acabar con la

incerteza de la localización de una tubería. El objetivo siempre ha sido trabajar con termografía y las imágenes de infrarrojos que generan. Para ello se eligieron 4 sitios de estudio, donde la toma de imágenes se llevaría a cabo. Durante 5 meses, se compiló la información ambiental, proveniente de la agencia estatal de meteorología (AEMET) y la que aportaban las imágenes IR. En la Figura 6.1, de forma general, se mencionan los elementos más comunes que se pueden encontrar. Se tomaron como variables a considerar en la visualización la relación entre las mismas, además de variables climatológicas que influyen en la escena; su filtrado y clasificación se trabajó con un software de minería de datos profesional de código abierto llamado KNIME. Para este trabajo en cuestión se eligió únicamente uno de los 4 sitios para el análisis, dejando los otros tres para ser considerados en la presente tesis.



**Figura 6.1 Elementos que aparecen en una IR de formato .jpg**

En el estudio mencionado anteriormente, la hipótesis hablaba de la posibilidad de identificar infraestructura enterrada relacionada con redes de abastecimiento de agua. Específicamente, tuberías por medio de IRs tomadas durante un periodo de tiempo, bajo diferentes condiciones y procesadas con un algoritmo en MATLAB. El objetivo general fue el de localizar e identificar la tubería enterrada mientras que el objetivo específico fue establecer un protocolo para el uso de la termografía de una forma clara, simple, considerando las variables que intervienen en la calidad de la imagen aplicando un razonable rango de tolerancia para las variable identificadas; por ello, se estableció un proceso para la toma de imágenes y su posterior procesamiento, la secuencia de adquisición de las imágenes se ilustra en la Figura 6.2. Esta secuencia se estableció luego de las primeras pruebas de toma de imágenes IR, con base en la información requerida, más aún no se relacionaban las variables; he ahí que las tomas se llevaban a cabo dos veces por día, mañana y tarde.

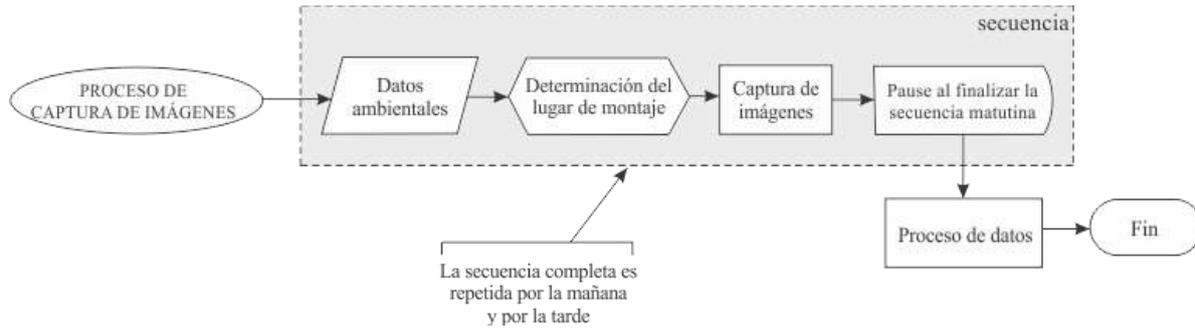


Figura 6.2 Secuencia de adquisición de datos

El procesamiento se llevaba a cabo por medio de ordenador en MATLAB. Una de las tareas no explícitas en la secuencia, pero necesaria en el proceso, consistía en un pre-proceso donde las imágenes tomadas se almacenaban en varios formatos. La imagen común (fotografía infrarroja), la imagen de infrarrojos con formato .jpg, en RGB y una matriz con los valores de temperaturas, que visualmente se representarían gráficamente, relacionando a la temperatura con una escala de color YMCK propia del software de procesamiento.

Los formatos eran necesarios, ya que la información que provee una imagen de infrarrojos, independiente del formato, es subjetiva, aunque en apariencia es completa. Más si se lleva a cabo una simple manipulación de la escala de temperatura o, en su escala de color, por medio de un software para análisis de imágenes de infrarrojos, los contenidos pueden hacerse más o menos visibles y conservar los cambios para esa imagen manteniendo su formato. En la Figura 6.4 se conserva la escala y se manipula la escala de colores, mientras que en la Figura 6.3 se tiene un ejemplo con una manipulación de los valores superior e inferior de las escalas. En ambos casos, se ven elementos constantes con una variación en la coloración y mayor notoriedad de elementos de una imagen a otra; este sencillo ejemplo marca la importancia de una revisión con variación en la escalada de temperatura en primera instancia, para visualizar los elementos pertenecientes a la imagen.

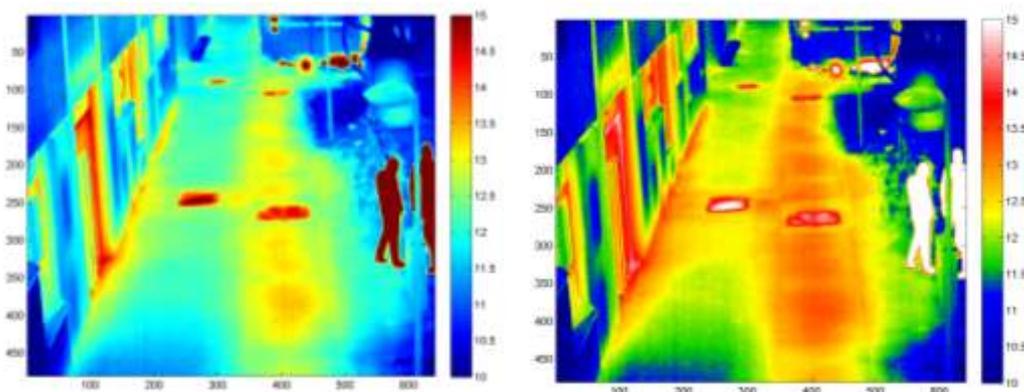


Figura 6.3 Imágenes con variación de color



Figura 6.4 Imágenes con variación de escala

Descrito en forma general, el pre-proceso, previo al proceso de datos en los scripts, en forma general consistía en los siguientes pasos:

1. Obtener imágenes IR de la cámara
2. Modificar la imágenes IR con el software de la cámara, para visualización
3. Obtener los termogramas de las IR
4. Graficar los termogramas
5. Obtener el rango de visualización de cada termograma

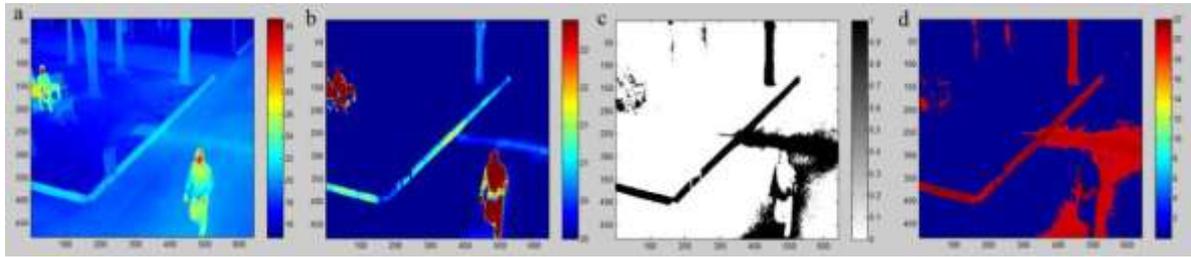
Se construyó una base de datos muy amplia con toda la información de temperaturas, imágenes, tipo de día, hora de toma y toda la información que se creía importante para nuestro trabajo. Con ella se establecieron relaciones entre variables, de las que se pudo obtener conclusiones válidas. Los rangos de observación se hacían de forma manual y se capturaban también en la base de datos, ya que al modificar la escala de temperatura (de visualización) la tubería era más visible. Así se pudo realizar un ajuste con los datos, estableciendo las regresiones que se usaron posteriormente. En la Figura 6.3, se pueden distinguir actividades que se requieren para trabajar con imágenes de infrarrojos y que son parte inherente del pre-proceso.



Figura6.5 Elementos involucrados en el pre-proceso con imágenes termográficas

El proceso de datos e imágenes consistió primero en analizar toda la información colectada y compilada y clasificar imágenes y variables en cuanto a la visualización del elemento buscado. La imagen se procesaba con los scripts de identificación hechos con anterioridad, de tal modo que aislara la tubería. Las variables identificadas que ayudaban con la visibilidad de la tubería se procesaron con minería de datos. Se aisló, para trabajar, una muestra representativa de 24 imágenes, del que denominamos sitio 1. En la muestra era

considerado el comportamiento natural de las temperaturas, que por el periodo de toma disminuían (transición de otoño a invierno).



**Figura 6.6** Procesado de IR para delimitar tuberías

MATLAB nos permitía tratar las imágenes con los datos reajustados con ecuaciones y los ajustados por medio de una red neuronal, para lograr el cometido. Los scripts, mejoraban la visualización y aislaban la tubería, como se ve en la Figura 6.6. Sin embargo no era automático: uno de los inconvenientes de este proceso fue el trabajo manual que hay que desarrollar, al llevar imagen por imagen el ajuste del rango de visualización, para alimentar al proceso de MATLAB. La capacitación, era otro inconveniente, la destreza del operador de la cámara es necesaria para la toma de imágenes, tanto para que la imagen sea clara como que los parámetros sean ingresados adecuadamente, ya que una cámara termográfica es un instrumento delicado; además las variables que influyen en la toma de las imágenes son naturalmente cambiantes y una mala IR complica el proceso.

La zona de estudio, donde se llevó a cabo la toma de imágenes, estaba localizada en la propia instalación de la UPV, donde teníamos conocimiento de la existencia del yacimiento de una tubería. El proceso incluía: identificar el área relevante, aplicar ajustes por métodos varios a los rangos impuestos, e identificar el contorno de la infraestructura. Aunque se procesó una muestra representando 5 meses de toma de imágenes, los resultados fueron diversos, sin homogeneidad. Llegamos a la conclusión de la importancia de la independencia del proceso de las imágenes considerando la necesidad de estudiar más a fondo el fenómeno de las variables ambientales. El tipo de día, la humedad y el viento, entorpecen la visibilidad, así como el calor extremo, que hace que la temperatura del paisaje sea más uniforme (recordemos que la transmisión de calor siempre se hace de un elemento más caliente a uno más frío hasta equilibrar, lo cual satura la imagen complicando la visualización). La huella térmica, también complicaba la definición del contorno de las IRs, al ser más anchas e irregulares, debido también a la transmisión de calor, lo que colaboraba en la no-uniformidad de los resultados del proceso de la muestra. Las conclusiones sobre la termografía fueron muy positivas y la elaboración de bases de datos, resultó ser importante. El método es útil, mas era necesario afinarlo, para que existiese interacción entre la persona que analiza las imágenes y los procesos.

Con esta información como base, que en verdad se presenta muy resumida, se restableció la secuencia de toma de imágenes y captura de datos para adaptarla a la nueva hipótesis de trabajo que es explicada en el siguiente apartado. Los cambios no fueron notorios, en lo que corresponde a la toma de IRs, más se simplifica y complementa con nuevos elementos en el proceso, incluyendo otra tecnología END, adecuada para nuestro propósito.

Decidimos tomar en consideración las imágenes tomadas con anterioridad para reafirmar las bondades de nuestro nuevo proceso y porque ese espacio de tiempo entre tomas ha tenido utilidad de aprendizaje, tanto en la manipulación de la cámara y sus variables, como en la

observación y tratamiento de imágenes. La termografía es un campo amplio, con muchas posibilidades de estudio y, durante el desarrollo de la investigación, surgían nuevas ideas que se sumaban a las que ya se tenían o que servían para modificar lo ya establecido. Algunas muy realistas, otras no tanto, todas de algún modo terminaron por aportar algo en el desarrollo de esta tesis. Lo anterior es el reflejo de todo este tiempo invertido de alguna forma en el trabajo en sus diferentes etapas.

## **6.2. Hipótesis de trabajo**

La hipótesis del trabajo anterior arrancaba con la identificación visual en las imágenes de tres zonas: (1) la zona de agentes externos identificados la mayoría de las veces por ser las temperaturas muy altas; (2) la zona de interés y (3) la zona de elementos adicionales, caracterizados por no pertenecer al paisaje original. Estas zonas se relacionan con la temperatura de la imagen, todo trabajado manualmente en una misma muestra. Por lo que, con esa base, decidimos replantear la hipótesis: **La visualización de fugas por medio de procesamiento de imágenes de infrarrojos tomadas en un ambiente controlado, que permitirá estudiar específicamente el fenómeno de las fugas de agua en tuberías;** además de incluir una variación histórica de temperatura añadida en el proceso. Esto permite la toma de imágenes bajo características predeterminadas, manipulables.

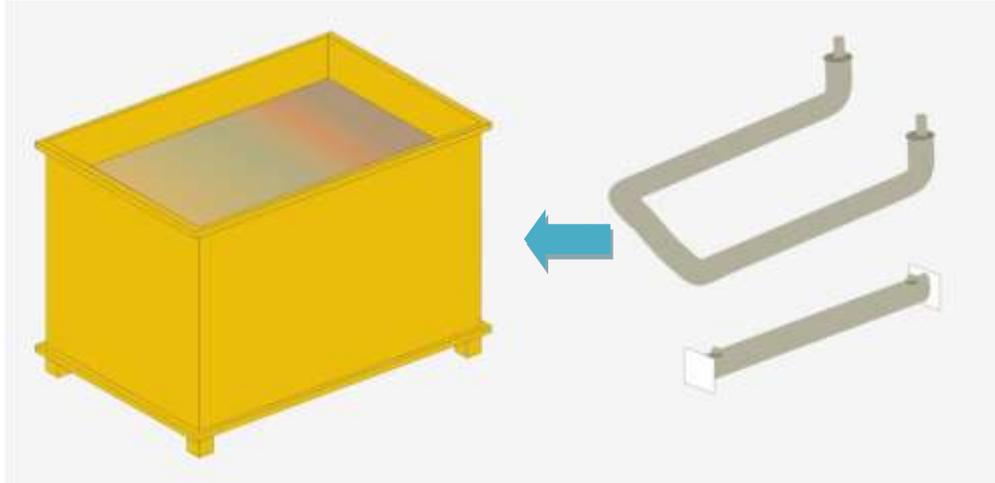
La termografía es una tecnología un tanto puntual y requiere usarse en el momento y en el sitio adecuado, por lo que se decidió, incluir también otras técnicas *machine learning*, para atacar el problema por otro frente, haciéndonos así de opciones para identificar las fugas.

Para probar la hipótesis, era necesario dividir el trabajo en partes independientes que tendrían un punto de convergencia. Se debe trabajar con el montaje del modelo, la toma de imágenes, la compilación de información, la realización de bases de datos, tratamiento de datos, establecimiento de relaciones, visualización y procesado de imágenes, elaboración de un modelo hidráulico etc. Al trabajar con más de un frente de trabajo tenemos la posibilidad de observar cómo trabajan las propuestas de forma aislada, comparar sus resultados y evaluar la bondad de la propuesta a realizar, para que se usen en conjunto o aisladas.

Propusimos trabajar con un modelo físico situado en el laboratorio de mecánica de fluidos del edificio 5C bajo, de la *Universitat Politècnica de València*, el cual serviría para colocar la tubería donde se simularía la fuga. Al ser un problema la localización de la fuga, el tener este modelo, permitió conocer las variables físicas y la toma de imágenes cada vez se modificase de algún modo; todas las variables ambientales se tomaron al capturar las imágenes de infrarrojos.

### **6.2.1. Modelo físico**

El modelo físico nos servirá para reproducir las condiciones de un tramo de tubería que podría pertenecer a una red de distribución de agua, bajo diferentes condiciones: trabajando a gravedad; sujeta a presión en un circuito cerrado por medio de una bomba en recirculación; sin fuga y con ésta. Es un modelo bastante simple en su configuración: su forma más básica (Figura 6.7) consta de una caja de madera de dimensiones de un metro por un metro con una profundidad de 70 centímetros, rellena de material terreo análogo al de una red de distribución de agua, dentro del cual se colocará la tubería con la que se trabajará, de acuerdo al tipo de escenario que se simulará.



**Figura 6.7 Modelo físico forma básica**

**Modelo trabajando a gravedad:** Se colocó dentro de la caja, un tramo de tubería recta de PVC, enterrada a una profundidad de 25 centímetros (tubería incluida) de la superficie. La tubería de 8 pulgadas de diámetro, tenía sellados ambos extremos con una placa de plástico y dos acoples colocados en la parte superior de está, uno a cada extremo, que cumplían dos funciones: funcionar como entrada y salida, además de hacer que la tubería se llenara por completo. El acople de entrada se conectaba a una probeta que proveía el agua a la tubería y le daba la carga hidráulica necesaria para tener un comportamiento constante que nos permitiera trabajar con comodidad. Como se puede observar en la Figura 6.8, el sistema era muy simple; el cálculo se realizó con MathCad, haciendo uso de la ecuación de la energía de Bernoulli en términos del caudal.



**Figura 6.8 Modelo físico con sistema a gravedad en su interior**

**Modelo trabajando en recirculación:** Se colocó dentro de la caja un tramo de tubería de PVC de 8 pulgadas de diámetro, en forma de "U" (Figura 6.9), para que trabajase como un circuito cerrado. Se configuró de tal forma que trabajase llena, adaptándosele dos acoples a la entrada y salida de la tubería para conectarla a una bomba de recirculación, teniendo así

un circuito cerrado de tubería donde se recircula el agua; este segmento de tubería imita un tramo de la red de distribución de agua.



**Figura 6.9** Tubería en "U"

La profundidad de colocación de la tubería en la caja requería ser controlada, por lo que se colocó una escala para identificar la profundidad fácilmente. A pesar de que el modelo es simple, la manipulación del modelo es compleja, ya que para la preparación de éste se debe llevar a cabo la manipulación de tubería. Esto implica el desplazamiento del material (aproximadamente medio metro cúbico), hacer las mediciones, colocar la cinta, y acomodar el material para la colocación de la tubería. Posteriormente, vino la etapa del montaje de la tubería, se niveló el material a la profundidad determinada para colocarla, se niveló y se cubrió con el material, dejando al descubierto las conexiones a la bomba de recirculación, ya que ésta debe tener posibilidad de movimiento. En la Figura 6.10, se muestra el tramo de tubería, parte del proceso de colocación de la escala, y el montaje inicial del modelo.



**Figura 6.10** Montaje del modelo

Este modelo resulta ser más representativo que el que trabaja a gravedad, y por ello nos centramos en este para el resto de la tesis. En resumen, el modelo utilizado consiste en una tubería enterrada en material pétreo conectada a una bomba de recirculación; la bomba que se utilizó es de recirculación marca KalkEx-Mobil, Figura 6.11, accionada a motor, la cual bombea en forma circular en dos sentidos. Su uso principal es para desincrustación rápida, más resultó adecuada por sus características (Tabla 6.1); la recirculación y hermeticidad que genera presión a la tubería, la cantidad de agua que debía agregarse a la bomba para que trabajara manteniendo un comportamiento constante en las tomas, se hizo a base de ensayos marcando el nivel en la bomba y dejándolo fijo.

Tabla 6.1 Características de la bomba de recirculación

Motor eléctrico	220 V-50Hz -1,2 A
Presión máxima	15 m (m. c. a.)
Caudal	2000 l/h aproximadamente
Capacidad	40 litros (mínimo de 20 litros para su funcionamiento)
Temperatura máxima de funcionamiento	30°C / 60°C
Potencia conectada	400 Watts
Conexión	3/4 de pulgada



Figura 6.11 Bomba de recirculación KalkEx-Mobil.

En ambos modelos, se tomaron imágenes bajo diferentes escenarios, ya que solo se contaba con esos dos tramos de tubería. Primero se trabajó con los que no consideraban la fuga, así que se mantenía la tubería íntegra, para la toma de imágenes del tramo de tubería sin fuga (ya que una vez que se decidiera trabajar con la fuga no había vuelta atrás). Para el escenario de fuga; se le hizo una perforación a la tubería que actuaría como pérdida. Es decir se simulaba una fractura que generaba la pérdida; en todos los casos, la tubería estaba enterrada en el material pétreo.

**Cámara de infrarrojos:** La cámara termográfica a utilizar es una cámara termográfica marca FLIR serie 600, modelo FLIR sc620 (Figura 6.12), con la que cuenta el grupo de investigación. Una cámara térmica (o cámara TIR) no es una herramienta convencional ni de uso común. Sus características específicas hacen que su coste sea bastante elevado. Para la toma de imágenes, se montaba en un trípode y se dejaba estática durante toda la toma.

Los datos técnicos de la cámara, se encuentran en el Anexo I, ya que la información al respecto es amplia, pues incluye características físicas, dimensiones, peso, así como algunas ventajas y desventajas que incluye el fabricante de la cámara. Entre las características más importantes se pueden enumerar: alcance, campo de visión, distancia focal, rango de temperatura, sensibilidad térmica, tipo de detector, rango espectral; los datos técnicos son necesarios ya que, al ser la primera etapa del proceso, la recopilación de información, saber a ciencia cierta cuál es el instrumento con el que trabajamos, resulta ser de importancia. Además, porque si en un futuro se debe reproducir el proceso, se puede buscar una cámara con características similares o se puede hacer la adaptación de las existentes.

El equipo de termografía se ajusta a las radiaciones que se reflejan de los distintos objetos que están alrededor del objeto principal, y también a la radiación que pudiera ser absorbida por la atmósfera o medio ambiente. Para lo anterior, se debe considerar que cuanto más cerca del visor infrarrojo esté el objeto, la radiación emitida será más aproximada a la real. La emitancia de objetos (emisividad), humedad relativa, temperatura atmosférica, la distancia al objeto, la sensación térmica, son factores que deben ser tomados en cuenta por el operador de cámara.



**Figura 6.12** Cámara FLIR SC620

### **6.2.2. Toma de imágenes**

Cada vez que se tomaban imágenes, el modelo debía ser adecuado para un objetivo, y debía ser "habilitado". Esto significa colocar la alimentación de agua, la probeta, en el caso a gravedad, o la bomba, en recirculación. El sitio donde se debía colocar la cámara se estudió con antelación y se determinó constante. La hora de la realización de los ensayos no era la misma; dependía de la disponibilidad de uso del laboratorio que hubiera para no interferir con otras actividades. La temperatura se mantenía "constante" lo que anulaba la hora de toma ideal, que es cuando existe un cambio de temperatura del día.



**Figura 6.13** Modelo físico y ángulo de toma de la cámara de infrarrojos

Una vez habilitado el modelo (llenar la bomba, conectarla a la tubería), se instalaba la cámara en el sitio marcado (ver Figura 6.13a); a la cámara se le asignó una inclinación con un ángulo de toma de  $45^\circ$  respecto de la horizontal de la superficie de tierra (ver Figura 6.13b). Esta inclinación se mantuvo en todas las tomas, permitía cubrir una buena parte de la zona del modelo donde yace la tubería, daba estabilidad a la cámara sin necesidad de un

aditamento, y el dato se conserva en caso de que en un futuro se requiera corregir a las imágenes por el fenómeno geométrico de proyección. Se ingresaban las variables del día en la cámara, se programaba la toma y se comenzaba el ciclo de toma de imágenes; el tiempo de toma también era variable bajo la teoría de independencia de imágenes para el análisis.

### **6.2.3. Obtención de datos de trabajo**

La obtención de datos para nuestro objetivo, así como el planteamiento los ensayos, llevan un tiempo en proceso.

En la Tabla 6.2, se muestran en forma resumida, las diferentes tomas de imágenes que se han hecho durante el proceso de investigación. Se exceptúa el caso utilizado en el desarrollo del trabajo de investigación denominado sitio 1, referido en el apartado de experimentos anteriores, subsección 6.1.1.

En la tabla se puede leer una breve descripción del sitio de estudio, en el caso del modelo si albergaba fuga o no, y del objetivo que se perseguía. Durante este tiempo, también las variables ambientales fueron capturadas para construir la base de datos.

**Tabla 6.2 Resumen de imágenes tomadas para investigación**

ID	Imágenes tomadas	Fecha	Sitio de estudio	Objetivo particular
T-1	18	15-oct-13	Varios dentro de la UPV.	Familiarizarse con el uso de la cámara.
St-3	59	01-oct-14 a 17-feb-14	Explanada de la UPV (Sitio 3 elegido de campo).	Identificar infraestructura.
St-4	52	10-ene-14	Pasillo de Industriales junto a locomotora de la UPV (Sitio 4 elegido de campo).	Identificar infraestructura.
St-2	672	18-oct-13 a 17-feb-14	Pasillo entre la farmacia, edificio 5C y la biblioteca de industriales de la UPV (Sitio 2 elegido de campo).	Identificar infraestructura.
Exp-1	8	17-ene-14	Explanada entre la biblioteca y el agora de la UPV.	Identificar infraestructura.
Mg-1	24	02-jul-15	Modelo de laboratorio: tubería a gravedad.	Preparación para toma de imágenes.
Mp-1	24	16-jul-15	Modelo de laboratorio: elementos enterrados.	Determinar la profundidad de colocación de la tubería.
Mgf-1	98	07-oct-15	Modelo de laboratorio: tubería a gravedad con fuga.	Identificar infraestructura y fuga.
Mgf-2	10	08-oct-15	Modelo de laboratorio: día después de la prueba.	Identificar infraestructura y fuga.
Mr-1	51	13-jun-16	Modelo de laboratorio: tubería en recirculación, superficie cubierta.	Preparación para toma de imágenes. Estudio de variables.
Mr-2	39	30-jun-16	Modelo de laboratorio: tubería en recirculación.	Visualizar comportamiento.
Mr-3	83	03-ago-16	Modelo de laboratorio: tubería en recirculación, contraste térmico.	Preparación para toma de imágenes. Estudio de variables.
Mr-4	25	04-ago-16	Modelo de laboratorio: tubería en recirculación.	Visualizar comportamiento.
Mr-4	60	16-ago-16	Modelo de laboratorio: tubería en recirculación, contraste térmico.	Visualizar comportamiento.
Mrf-1	15	23-ago-16	Modelo de laboratorio: tubería en recirculación con fuga.	Identificar infraestructura y fuga.
Mrf-2	15	10-sep-16	Modelo de laboratorio: tubería en recirculación con fuga.	Identificar infraestructura y fuga.

Con se puede observar, la cantidad de imágenes tomadas es alta para los 16 ensayos que se muestran (en torno de las 1339 imágenes). Analizar una imagen requiere tiempo, por ello se tomará una muestra representativa del 10% del total de imágenes tomadas de las cuales, solamente se presentará una en los resultados de la tesis. Bajo la hipótesis de esta tesis, un par de imágenes de infrarrojos analizadas deberían bastar, porque desde el punto de vista práctico y operacional, quien salga al campo a hacer la toma, cubrirá la zona en estudio y volverá para analizar las imágenes, todas en un periodo de tiempo, con una secuencia previamente marcada. El resto de imágenes pueden ser empleadas para validación y han sido tomadas para tener suficiente información que procesar.

Una cosa en común en todas las tomas es el proceso general de adquisición de datos, que se ilustró en la Figura 6.5. En la misma figura se pueden distinguir con claridad las actividades que se requieren para la adquisición de imágenes para ser procesadas. Esa estrategia, establecida anteriormente, consistía en cuatro puntos: obtención de información, compilación de información, proceso de datos, y establecimiento de relaciones de contorno, que también fueron modificadas para adaptar la nueva secuencia de adquisición de datos (Figura 6.14).

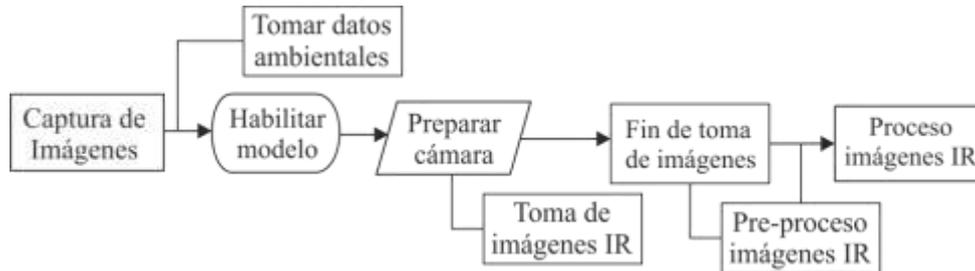


Figura 6.14 Nueva secuencia de adquisición de datos

La secuencia se observa simple, más es delicada. De arruinarse los puntos fuertes del proceso implican el comenzar de nuevo, tal como habilitar el modelo y preparar la cámara. También es verdad que son puntos que demoran, por la naturaleza del ensayo; tomar datos ambientales es simple: basta consultar la meteorología del día y plasmarlo en la base de datos.

**Variables ambientales:** Como se ha expresado anteriormente las variables ambientales juegan un papel fundamental en el proceso de visualización de las imágenes de infrarrojos, capturándose a la par que se lleva a cabo la toma de la imagen. La facilidad de poder obtener los datos ambientales, de los últimos 5 años, permitió establecer un factor de corrección, en las relaciones que se utilizan para analizar las imágenes termográficas.

El comportamiento de la temperatura tiene similitud año con año: funciona como un ciclo que inicia con el invierno y sus bajas temperaturas. Dicha estación del año se caracteriza por tener la mínima temperatura, que suele presentarse el primer mes del año. El ciclo se desarrolla con un aumento de temperaturas conforme avanza el año, pasa a primavera, llega el verano caracterizado por presentar la máxima temperatura. A partir de ese momento las temperaturas descienden, llega el otoño y continúan bajando hasta el invierno donde el ciclo termina al cerrar el año.

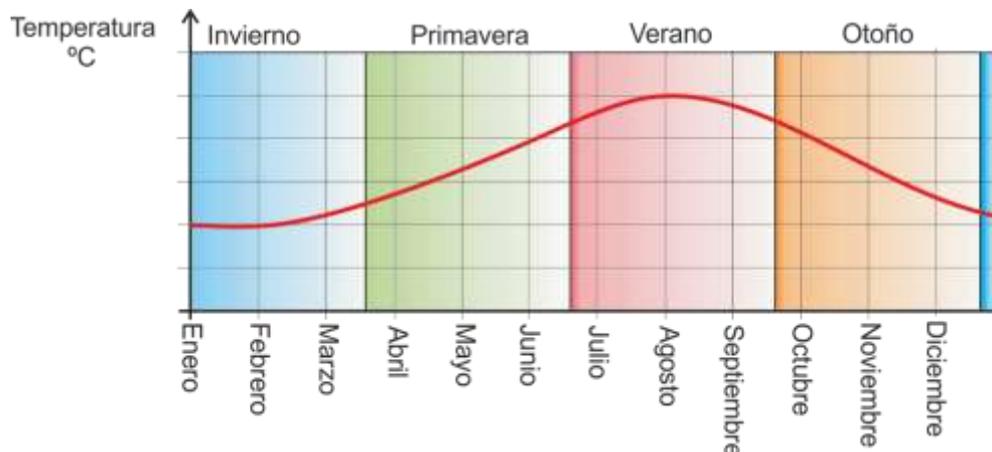
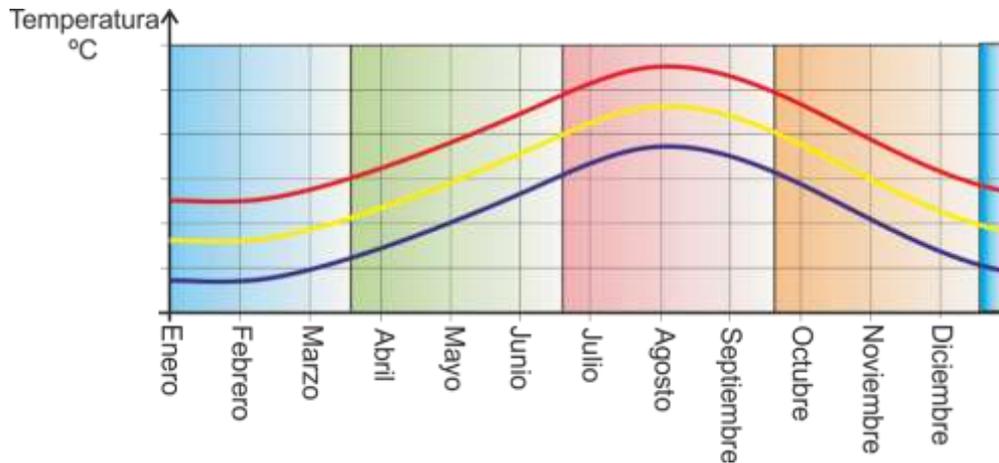


Figura 6.15 Comportamiento de la temperatura en el año

Las temperaturas diarias también tienen una variación en su comportamiento, que se asemeja al ciclo anual; cambian a lo largo del día, siendo más frías por la madrugada y más calientes a mitad del día. Al compilar estos comportamientos, se genera un gráfico (Figura 6.16) que contiene las temperaturas máximas, medias y mínimas en el año, que permite identificar las zonas que servirán para establecer las fronteras de trabajo del proceso de análisis de IRs.



**Figura 6.16 Comportamiento de las temperaturas en el año**

Las variables ambientales se trabajaron con minería de datos incluyendo una técnica que revela los aspectos cualitativos de los parámetros, llamado escalado multidimensional. Como resultado de esta técnica, se generó un mapa con la relación entre las variables adicionadas, que permite revelar, respecto de las variables del problema, proximidades abstractas, dimensionalidad y, por medio de clústeres, permite identificar conjuntos de datos relativamente aislados (mostrados en la Figura 6.17). El trabajo anterior permitió identificar las condiciones óptimas para llevar a cabo la captura de imágenes termográficas con las cuales puedan ser fácilmente visualizadas infraestructuras enterradas. El presente trabajo permitió obtener los bloques de temperatura y su comportamiento a lo largo del tiempo y cómo se repetían por ciclo, anual, mensual y por estación climatológica del año. Desde que son temporadas reincidentes de temperatura con una ligera variación, permiten trabajar con un ajuste, que representa la variación y evita la asignación manual de las tonalidades en la imagen para la observación de zonas de interés en ellas. Las variables más influyentes consideradas son ambientales; los datos de temperatura son horarios por lo que para una hora específica, de un día, de un mes, de un año dentro de la base de datos, puede ser cuantificado. La humedad interviene en la temperatura, por lo que se consideró parte de la temperatura; como variable secundaria, se puede hablar de la estación del año y del tipo de día (nublado, soleado, lluvioso, con viento, etcétera).

Contar con una base de datos, con la compilación de las variables, y la información de las imágenes termográficas, siempre permite acelerar los procesos de análisis. Esto es debido a que nos proporciona información que ayuda a interpretar la representación gráfica del comportamiento de la temperatura, pudiendo emparejar las imágenes con las variables, durante el periodo del trabajo de campo.

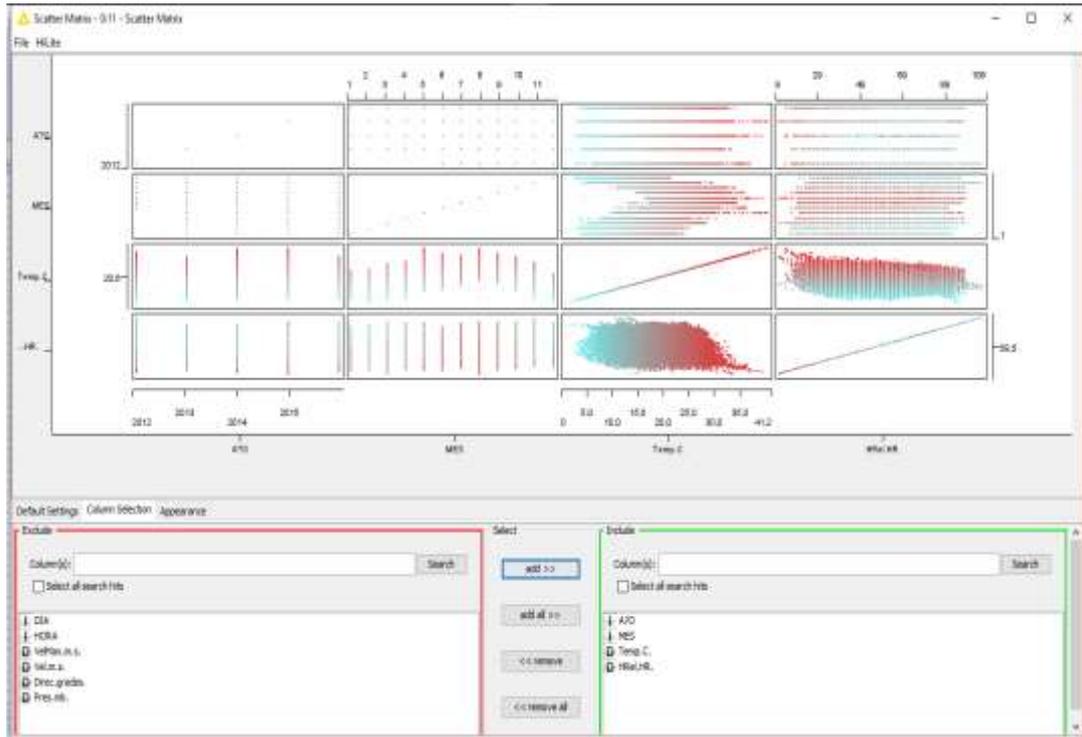


Figura 6.17 Relación de las variables de temperatura (KNIME)

Se utilizaron los valores medios mensuales de la muestra (Figura 6.18), estableciendo que actúen como límites: las temperaturas máximas serán el límite superior y las temperaturas mínimas serán el límite inferior. En conjunto, generan un bloque (Figura 6.19); a su vez, las temperaturas medias, establecen una línea divisoria entre las que se pueden considerar como temperaturas altas y temperaturas bajas, actuando como umbral de comportamiento.

Se tienen dos temperaturas medias por un ajuste en los datos, lo que es importante para no quitar importancia a la subida de temperatura del mes de mayo. Ésta zonificación será utilizada en el proceso de las IRs.

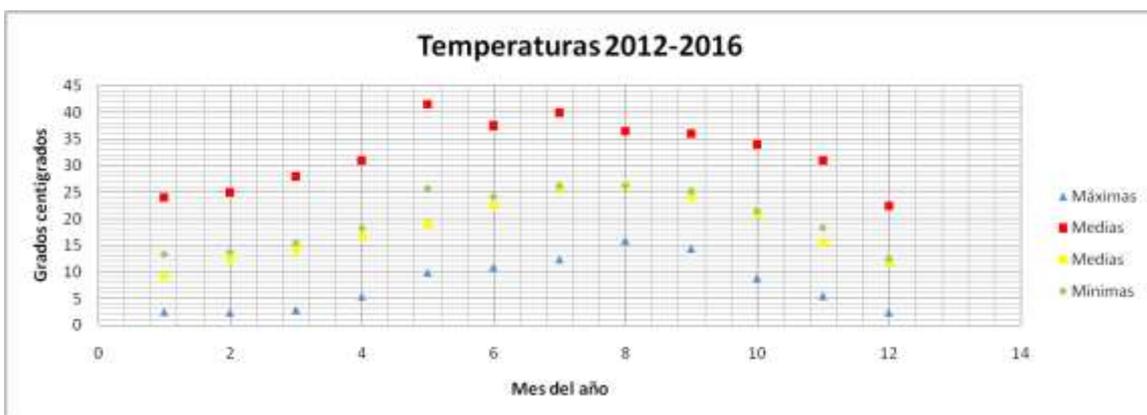


Figura 6.18 Temperaturas medias del periodo

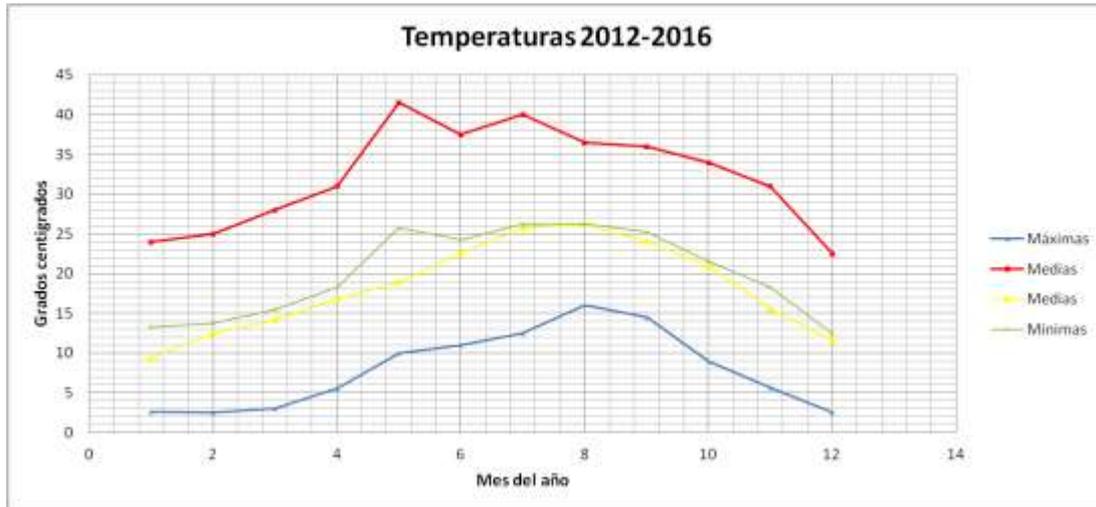


Figura 6.19 Temperaturas medias en bloque para el procesado de imágenes

### 6.2.4. Procesado de imágenes

Lo que buscamos con el procesado de las imágenes de infrarrojos es la visualización de lo que pueda ser una fuga. Es necesario que exista una interacción entre el técnico que procesa las imágenes y los procesos mismos, debido a que la termografía es una técnica visual donde es necesario evaluar las variables. El criterio del técnico tendrá peso en la determinación del elemento visualizado como fuga.

El procesado de las imágenes funciona, de forma general, basándose en una evaluación visual de una zona donde se sospecha existe una fuga de agua, después de la aplicación de los procesos. Es lo que denominamos resolución numérica.

La resolución numérica que proponemos consiste en manipular los datos de temperatura, bajo algunos criterios definidos. En un termograma, los datos requeridos son: las temperaturas mayor y menor registradas en los datos, cuya diferencia (a la temperatura mayor se le resta la menor en la escala numérica, es decir los grados negativos serían considerados dentro del rango) permite establecer el rango de temperatura que alberga la IR. La representación se ilustra en la Figura 6.20: mientras que en la imagen de infrarrojos (imagen RGB), los datos requeridos son los valores las tonalidades de los tres canales, rojo, verde, azul de 0 a 255, en cada canal, que compone la relación tonalidad-temperatura.

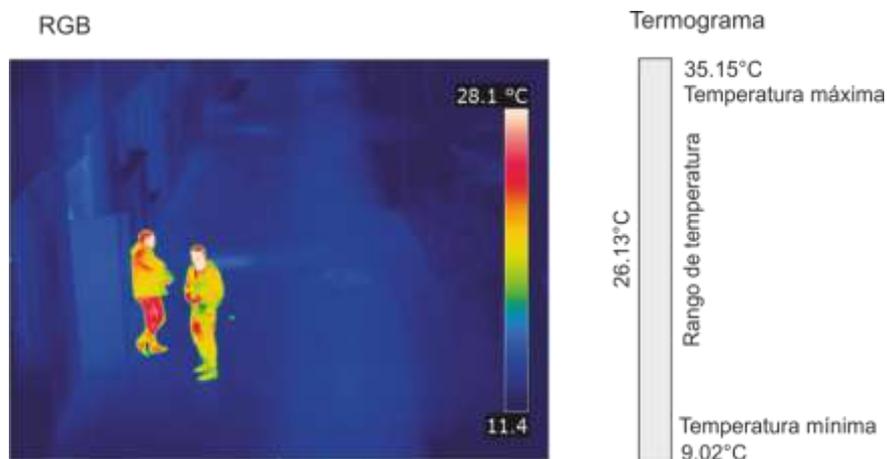


Figura 6.20 IR con escala de temperatura y escala real definida por el termograma

En ambas, se trabaja con los incrementos de temperatura, con las dos diferencias, los datos que aportan y cómo se manipulan. En el ejemplo de la Figura 6.21, donde la temperatura mayor registrada por el termograma es de  $35.15^{\circ}\text{C}$  y la mínima de  $9.02^{\circ}\text{C}$ , la diferencia de  $26.13^{\circ}\text{C}$  aplicada a la imagen RGB, significa que hay 28 mil posibles incrementos de tonalidad. El problema de la RGB, se simplifica al separar los canales, donde el incremento de la tonalidad está en 256 incrementos.

El proceso funciona así: se elige la IR a analizar, se cargan los archivos en la carpeta de proceso, se ingresan los datos de la toma de la imagen (mes, temperatura ambiente del día y hora de toma), se ejecuta el script, que se encarga de graficar la imagen, se elige una zona de la imagen que se quiera analizar, esta se localiza en el rango disponible de temperaturas del termograma, y el script determina la zona aledaña en temperatura que se aislará (Figura 6.21) en función de los valores asignados por la relación de las temperaturas.

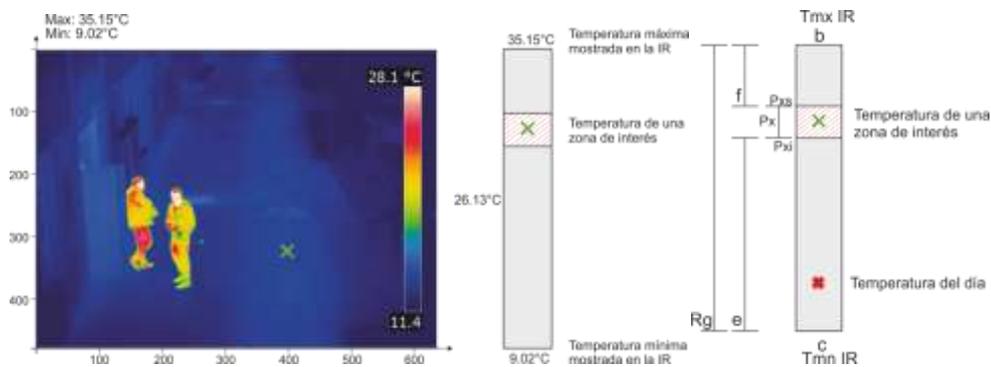


Figura 6.21 Localización de la zona de interés en la IR

La temperatura ambiental respecto a las temperaturas del termograma se podrá localizar en tres zonas ilustradas en la Figura 6.22. El caso (a), cuando el valor de temperatura ambiente está por debajo de la temperatura menor registrada en el termograma; el caso (b), cuando el valor de la temperatura ambiente se encuentra dentro del rango de temperaturas del termograma; y el caso (c), cuando el valor de la temperatura ambiente está por encima de la temperatura mayor registrada en el termograma; es necesario ubicarla porque que no existan valores negativos en las relaciones que se establecen para aislar la zona de interés. Hecho esto, los datos ambientales se encargan de localizar la zona donde yacerá la IR en la muestra histórica anual, teniéndose identificadas cinco zonas.

Las zonas surgen a raíz de la necesidad de relacionar las IRs con las posibles temperaturas del año; las temperaturas medias anuales, fungen como valores que se pueden presentar o no en las IRs. Las zonas se describen así: zona 1 contiene valores mayores a la temperatura mínima y menores incluso; la zona 2 abarca valores mayores a la temperatura mínima pero menores a la temperatura media; la zona 3 contiene valores mayores a la temperatura media y menores incluso; la zona 4 abarca valores mayores a la temperatura media pero menores que la temperatura máxima; la zona 5 contiene valores menores a la temperatura máxima y mayores incluso. Está clasificación se puede apreciar con más claridad en la Figura 6.23.

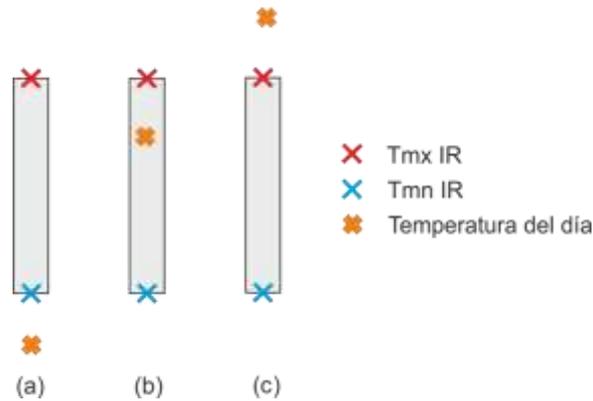


Figura 6.22 Posición de la temperatura en la IR

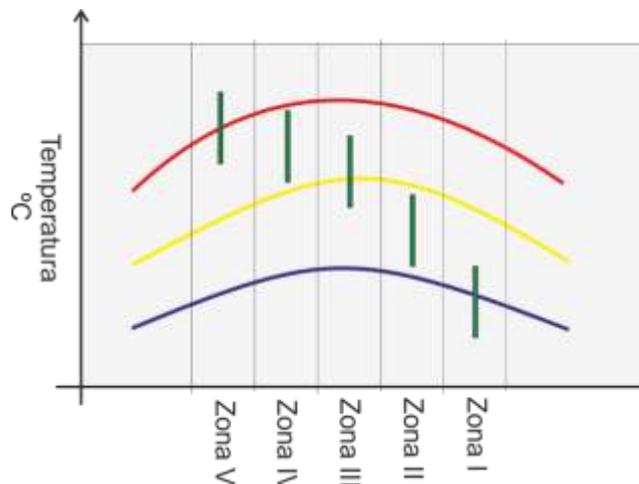


Figura 6.23 Clasificación de zonas

La representación se puede hacer en la gráfica del ciclo anual, de forma tal que se podrán observar todas las variables de la IR; se representa por medio de una línea, donde las coordenadas en el eje de las abscisas corresponden al día de toma de la imagen, y en el eje de las ordenadas serán representadas por los valores máximo y mínimo registrados en la IR. De igual forma, la temperatura del día se representa por medio de un punto cuya coordenada en el eje de las abscisas corresponde al día de la toma y el eje de las ordenadas corresponde al valor de la temperatura (Figura 6.24). Así, cada una de las imágenes de infrarrojos será representada por una línea, que al localizarla en la gráfica, quedará dentro de alguna de las zonas estipuladas, al igual que la temperatura del día. Así, cada IR, tiene una doble clasificación exclusiva relacionada con las variables ambientales históricas, en base a las cuales están calculados factores que permiten aislar las zonas que se desea visualizar de forma automática. Para los tipos de imágenes que manejaremos, la imagen infrarroja normal con formato .jpg y escala RGB, la imagen infrarroja en escala de grises y el termograma con formato de matriz.

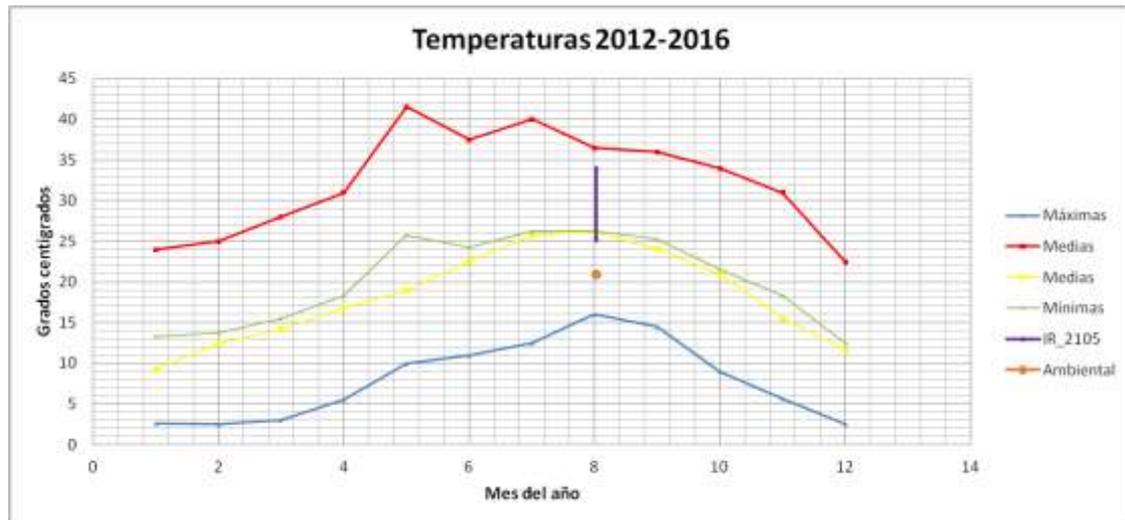


Figura 6.24 Representación de una IR en el ciclo anual de temperaturas

Durante los procesos de aislamiento de zonas de estudio en IRs, la imagen RGB relaciona las temperaturas con las tonalidades de color, la imagen en escala de grises también relaciona las temperaturas con las tonalidades, mientras que el termograma de temperaturas, lo hace directamente con las temperaturas con las relaciones impuestas.

He aquí que los resultados más claros solían observarse en la imagen en escala de grises, por la simplificación que se hace a la imagen, ya que los colores, generan ruido, que aunque puede ser reducido por medio de una tolerancia, tiene la desventaja de que en el proceso el tamaño de la imagen se ve modificado entorpeciendo el resto del procesado. Hago hincapié en diferenciar los dos tipos de imágenes porque a pesar de que se procesan a la par, sus procesos son diferentes.

En las imágenes, predomina el proceso de visualización, segmentación, binarización y el método de Otsu, mientras en los termogramas los procesos son con operaciones numéricas.

**Visualización:** Ésta es la forma más básica de END, explicada en la sección 2.1, consiste en una comparativa en el tiempo de un objeto de estudio con otro, para identificar las diferencias.

**Segmentación:** El proceso de segmentación de imagen es la partición de la misma en una serie de regiones separadas que tienen usualmente una fuerte correlación con los objetos de la imagen. La segmentación permite que un objeto pueda ser caracterizado por sus propiedades de color, textura y forma; el color puede ser utilizado como discriminante entre objetos para realizar una segmentación de escenas naturales o imágenes artificiales.

La segmentación de imágenes es una etapa importante en las aplicaciones de procesamiento de imágenes, video y visión por ordenador, pues divide la imagen en regiones u objetos significativos en función de la aplicación en particular. Se distinguen básicamente objetos del fondo sobre la base de la intensidad del color o el valor que tienen los píxeles. Aplicándola, es posible identificar los cambios de temperatura, por medio del uso de rangos de temperatura, la complicación se presenta al identificar las temperaturas de la zona que nos interesa, que no son uniformes, por lo que deben de salir de una media de temperaturas en el sitio que podría albergar la temperatura requerida. Uno de los mayores inconvenientes se presenta en los bordes ya que debido a la transmisión de calor, estos, no están bien

definidos, lo que hace que la identificación más compleja; entonces se establecen temperaturas que funcionan como bordes, generando así el rango de valores para la segmentación.

**Binarización:** Consiste en una reducción de información en la que los únicos valores posibles son verdadero y falso (1 y 0). En el caso de una imagen digital, los valores verdadero y falso corresponden a dos coloraciones: blanco y negro. Esta técnica permite separar objetos o regiones que nos pueden interesar del resto de la imagen. El objeto que se desean analizar del fondo de la imagen. Si se requieren una tonalidad específica o si se utiliza un umbral de la escala de grises (utilizada normalmente), puede requerir especificación de umbrales. Para calcular la tonalidad de gris se ponderan los valores RGB, media ponderada por percepción humana de los colores.

**Método de Otsu:** Adquiere su nombre en honor a Nobuyuki Otsu que lo inventó en 1979; utiliza técnicas estadísticas como la varianza para resolver el problema. Utiliza la dispersión de los niveles de gris. Trabaja calculando el umbral, con dos condicionantes: (1) que la dispersión dentro de cada segmento sea lo más pequeña posible, y (2) que la dispersión sea lo más alta posible entre segmentos diferentes. Calculando el cociente entre ambas variancias, buscando un valor umbral para que el cociente sea máximo. Tiene ventajas sobre los métodos de umbral que requieren entre otras cosas una iluminación uniforme o de bordes borrosos. En [29] se utiliza en combinación con algoritmos de evolución diferencial, DE por sus siglas en inglés, comparando con *particle swarm optimization* (PSO), para una imagen termográfica.

**Umbralización:** La umbralización es uno de los más importantes métodos de segmentación. El objetivo es convertir una imagen en escala de grises a una nueva con solo dos niveles, de manera que los objetos queden separados del fondo. Trata de extraer un objeto del fondo, seleccionando un umbral con intensidad T que separe los dos conjuntos; de este modo, cualquier punto que tenga un color mayor al umbral pertenecerá al objeto, en caso contrario, al fondo. Si los valores de gris del objeto y el resto de la imagen difieren claramente, entonces el histograma mostrará una distribución bimodal, con dos máximos distintos, separados por una región vacía. Con lo cual se logrará la separación perfecta entre objeto y fondo, al establecer un umbral ubicado en esta región del histograma. En [30] se pueden apreciar algunos de los métodos de umbralización bajo diferentes métodos: forma del histograma, clusterización, atributos de la imagen, etc.

Este tipo de procesamiento de imágenes puede proveer información a una plataforma de monitoreamiento de redes de agua potable, como una alternativa ante las técnicas comunes, con la necesidad de estructuras operacionales para la toma de imágenes y adicionalmente como parte de todo el proceso el mecanismo del procesamiento de imágenes para determinar las fugas.

**Software utilizado:** Contar con un software del fabricante de la cámara de infrarrojos, fue de utilidad para la adquisición, orden y pre-procesamiento de las imágenes.

FLIR QuickReport versión 1.2 SP1, software producido por FLIR, es un software asociado a la cámara termográfica, que permite a los usuarios organizar, ordenar y analizar las imágenes radiométricas de sus cámaras de infrarrojos y presentarlas. Permite modificar los parámetros de forma sencilla, agregar o quitar elementos y guardar los cambios, también permite llevar a cabo un reporte a partir de las imágenes mediante tres pasos sencillos, también permite convertir las imágenes en archivos tipo CVS (*comma-separated values*)

para su posterior proceso ya que es un formato compatible con otros softwares (ver Figura 6.25).

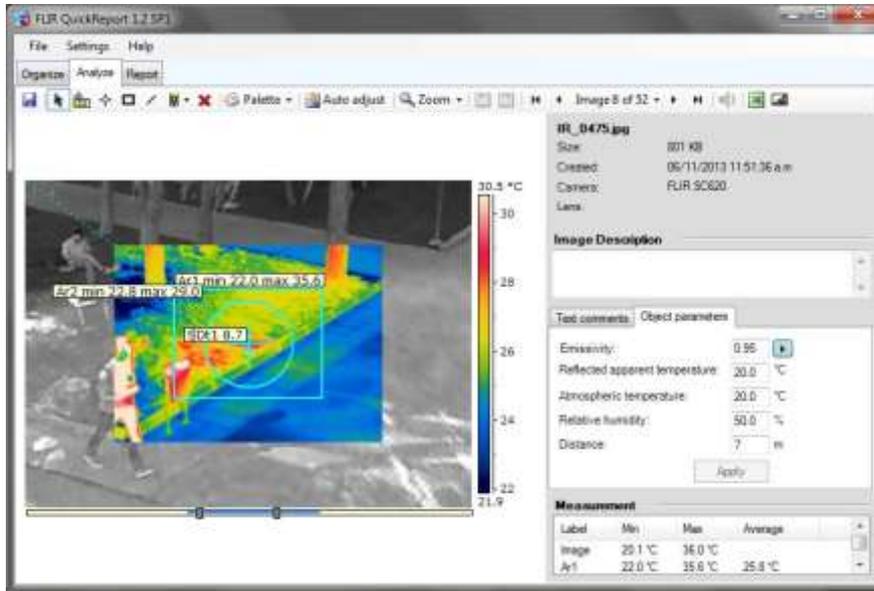


Figura 6.25 FLIR QuickReport versión 1.2 SP1

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (*GUI*) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, *Simulink* (plataforma de simulación multidominio) y *GUIDE* (editor de interfaces de usuario - *GUI*). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (*toolboxes*); y las de *Simulink* con los paquetes de bloques (*blocksets*). Versiones de MATLAB (R2013 b y R2015a).

KNIME es un software profesional de código abierto, y configura una moderna plataforma de análisis de datos que permite realizar estadísticas sofisticadas y minería de datos para analizar las tendencias y predecir posibles resultados. Su interfaz visual combina el acceso a los datos y su transformación. Como herramienta inicial, provee un potente análisis predictivo y una agradable visualización. KNIME también proporciona la capacidad de desarrollar informes basados en la información disponible, o incluso intervenir en la automatización de procesos. Además, permite incorporar procesos de otras herramientas de software como Matlab, R, Weka, etc. (Versión 2.11.1, Enero 16, 2015).

### 6.2.5. Simulación Computarizada como herramienta de apoyo

Al detectar inconsistencia en la visibilidad de las estructuras enterradas en las imágenes IR tomadas, surge el cuestionamiento de la razón de dicho fenómeno. Es decir, si las condiciones ambientales son similares, ¿qué marca la diferencia para que en ocasiones no se visualice la estructura enterrada en las imágenes y, por consecuencia, en los resultados?

Acudimos a revisar lo que consideramos la raíz de la situación: la escena tomada, el instrumento de toma de imágenes y la relación entre ellas; nuevamente las variables que intervienen en la escena son físicas y ambientales, en la cámara termográfica, las especificaciones técnicas. Asumimos que la escena y sus variables no cambiarían, más la cámara sí que podía cambiar, una de las características que cambia en las cámaras de infrarrojos es el parámetro denominado NETD o sensibilidad térmica y que es considerado de gran importancia en el proceso de toma de imágenes, ya que permite qué objetos sean visualizados, o no, en función de los elementos de la zona de estudio.

Este razonamiento no surgió hace mucho tiempo, lo que lo muestra cómo una idea en desarrollo que apenas toma forma, mas es una idea que tendría un periodo de validez a largo plazo que, además, permitiría asumir la modernización de las cámaras y con un simple test de validación en laboratorio, indicaría si la estructura enterrada podría ser visible o no. Consiste en la realización de un modelo computarizado del trabajo que evaluará la validez de la visualización de los escenarios por medio del NETD de la cámara. Se trabajaron bajo dos criterios: el primero, simulando el modelo físico que se tiene en el laboratorio por medio de ANSYS, un software de análisis, al que, agregando las características del modelo, nos daba el comportamiento que podía tener, con el inconveniente de la carencia de comportamiento de algunos elementos como el funcionamiento adecuado de la bomba de recirculación. Dicho esto, con éste surge el segundo criterio, anular la simulación y suponer un volumen de ancho unitario y longitud infinita para determinar el NETD; bajo las características generales de una tubería enterrada, ambos modelos tienen edad temprana. Se mencionan por el interés que pueden despertar, además de que se desea seguir trabajando en ellos y debe quedar constancia de su surgimiento.

ANSYS, Inc. es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de los elementos finitos para estructuras y volúmenes finitos para fluidos. Se utiliza para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS está dividido en tres herramientas principales o módulos: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador y post-procesador. Tanto el pre-procesador como el post-procesador están provistos de una interfaz gráfica. Este procesador de elementos finitos para la solución de problemas mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas, análisis de transferencia de calor y fluido dinámica, y también problemas de acústica y electromagnetismo.

### ***6.3. Viabilidad económica del método en una red de agua potable***

La evaluación económica de esta metodología consiste en mencionar todas las variables que influyen en el presupuesto del uso de la herramienta. Se incluyen los costos de inversión, más el tiempo en que se volverá obsoleta, contra los beneficios que se esperan obtener al implementarla. Para llevar a cabo este análisis que, insisto, es muy general, consideré las variables que creo necesarias, tanto en oficina como en campo durante el proceso de aplicación de la herramienta. Hablar de montos económicos sería más adecuado tratarlo después, ya que las cifras no serán constantes y no contamos con los datos económicos considerados y no es la prioridad; pero hablar de las variables implicadas, nos genera una impresión mental al respecto. Se debe recordar que existen varios y diferentes métodos, procedimientos y/o técnicas para la detección de fugas. No existe un método universal y depende en mucha medida de diferentes variables, entre las que se pueden mencionar, la competencia del organismo operador de agua o empresa encargada de las gestiones, el

equipo con el que cuenten así como desarrollo tecnológico, el tipo de fuga, su tamaño y el tiempo que demoraría en repararse. Los puntos de mayor interés son los siguientes:

- Determinar si hay fuga o no
- Determinar el tamaño de la fuga
- Determinar el lugar de la fuga
- Determinar el tipo de fuga y los daños que puede generar

La información que se requiere para trabajar con termografía es:

- El catastro técnico de la red de abastecimiento de agua y de las líneas
- Equipos entrenados en pitometría
- Sectores y subsectores de abastecimiento implantados
- Microzonas de maniobra
- Sistemas de macromedición
- Registro de macromedición
- Registro histórico de caudales mínimos nocturnos
- Organización de la estructura para detección de fugas

La pitometría es un conjunto de elementos y actividades destinados a la obtención, procesamiento, análisis y divulgación de datos operacionales, relativos a caudales, volúmenes, presiones y niveles de agua con el fin de obtener diagnósticos específicos respecto a las condiciones, reales o simuladas, de funcionamiento de elementos de un sistema de abastecimiento de agua, está estrechamente relacionada con la macromedición. Teniendo en cuenta su alcance, se puede afirmar que la pitometría representa un apoyo de extraordinaria importancia a las áreas de operación, planeamiento, proyectos y construcción.

El catastro técnico, como se ha mencionado en más de una ocasión, bien podría ser un problema. Sin embargo, estos procesos son también de interés para este trabajo, ya que también tiene como objetivo "llenar" los vacíos del catastro de la red de abastecimiento, si es que existen. Para este analizar de forma muy general la viabilidad económica de la aplicación de la herramienta, las variables se han separado en tres fases: fase uno, inversión inicial; fase dos, toma de imágenes; y fase tres, mantenimiento del equipo.

La fase uno: considera la adquisición de la cámara termográfica, el ordenador y el software de análisis. Pueden darse dos escenarios cuando el organismo responsable cuenta ya con una cámara termográfica, dando por hecho que cada organismo operador cuenta con ordenadores. En el primer, caso la inversión de la cámara se descarta a menos que se quiera adquirir un equipo más nuevo, más no así la adquisición del software y la capacitación del técnico responsable del manejo de la cámara. En el segundo se debe considerar la compra de la cámara como costo adicional.

La fase dos: implica la toma de imágenes para su análisis, establecer la periodicidad de las revisiones e involucrar la variable climática que, como ya se mencionó, influye en la calidad de las imágenes; esto incluye el mes, el día y la hora; el horario debe ser de un día laborable de preferencia frío. Como parte de esta fase, debe considerarse la disponibilidad del técnico o la empresa encargada de la toma; se debe planificar el recorrido de la zona a revisar, ya que esto también implica tiempo y afecta la hora de toma, detalles incluidos en el pre-proceso de las imágenes una vez hecha la toma; hay que ordenar las imágenes y procesarlas;

quedando como último elemento, tenemos el postproceso de las imágenes y la visualización de resultados.

La fase tres: mantenimiento del equipo, que considera todo lo necesario para poder llevar a cabo la fase dos. Consiste en hacer una revisión periódica del estado de la cámara, de las baterías, que haya técnicos capacitados, y que el equipo no se haya tornado obsoleto, debido al avance de la tecnología.

### ***Puntos de mejora***

Las fortalezas de la técnica se pueden volver sus propias debilidades. El concepto de END puede ser considerado como alternativa para la monitorización debido a la madurez que ha adquirido en la última década. Por la polifuncionalidad de la técnica que lo hace popular en diversas áreas, el proceso de imágenes termográficas (digitales) ha captado la atención por sus ventajas, tales como la toma de los termogramas que se llevan a caso sin contacto, la posibilidad de que sea útil para aquellos sitios que son complicados de acceder; las posibilidades se pueden extender más allá de la termografía incluyendo tecnologías alternativas, GPR, sensores etc.

#### ***6.3.1. Limitaciones***

Se habla mucho, a veces en demasía, acerca de las ventajas de la termografía, olvidándose de la forma de funcionamiento de ésta. Como casi toda la tecnología desarrollada, si es bien utilizada proveerá buenos resultados, de lo contrario, puede ser muy posible que los resultados sean malos. Esto podría decantar en una cadena de errores, ya que las imágenes por sí solas solo son trabajadas como una END visual, buena por medio de comparativa, una de las formas más básicas de la END, útil, pero pierde su validez de visibilidad con la profundidad del objeto en estudio (donde la transmisión de calor deja de percibirse); para que la identificación sea más robusta, las imágenes han de ser verificadas, antes de procesarlas. Si se ingresan buenas imágenes, los resultados pueden ser mejores.

Se ha hablado ya de la potencia de las cámaras; hay elementos que influyen en la potencia de la cámara, el modelo, el año que surgió e inherente el costo. Una limitante, como en casi todo, es la económica, y le sigue el creer que por tener el último modelo, el más potente, más ligero y con más aplicaciones, será de utilidad; esto es una absurdidad que aún en nuestra época es aplicable. En una sociedad donde los recursos de investigación son limitados, se debe hacer lo mejor que se pueda con lo que se tenga. Deberíamos impulsar a trabajar con software libre, apoyar a los investigadores y generar más lazos de manera que se beneficien los grupos de manera mutua, colaborando en un desarrollo conjunto.

### ***6.4. Identificación de la zona donde yace una fuga con métodos de machine learning***

#### ***6.4.1. Justificación***

El planteamiento de este modelo comenzó en octubre de 2016, los resultados parciales serán presentados próximamente en el congreso CMN 2017, en Valencia, España. Es importante mencionar la fecha, para saber de la edad temprana de esta parte de la propuesta, que nació del tiempo que lleva el pre-proceso de la toma de imágenes, la toma propia (que implica tiempo en función del área a estudiar), y de las variables observadas en del análisis económico general.

La razón de añadir este tipo de técnica, parte de que la utilización de imágenes infrarrojas es mejor si se aplica de forma puntual ya que la distancia de la lente de la cámara al objetivo observado es importante. Así la toma de imágenes en una zona más reducida permite apreciar con más detalle lo que se encuentre en ella, es decir, que la distancia entre la superficie de la toma, y la profundidad de la tubería pueden afectar la visibilidad de la tubería. También, el tiempo es importante; al reducir el área de toma de imágenes, el tiempo se reduce, ya que no solo se trata de la toma de la imagen, sino también de la ubicación del sitio, el montaje de la cámara, la toma de variables ambientales y más detalles para que todo funcione. Como relaciones directas tenemos, a mayor distancia entre cámara y superficie de estudio, mayor área de captura, menor tiempo de toma por metro cuadrado lineal, pero menos contraste de intercambio de calor; y viceversa, a menor distancia entre cámara y superficie de estudio, menor área de captura, mayor tiempo de toma de metro cuadrado lineal, pero más contraste de intercambio de calor.

Existen hoy en día, sistemas que aportan información sobre la red, en tiempo real y diferido de ahí que planteáramos la utilización de un modelo para acotar zonas e identificar la zona que posiblemente alberga la fuga. Para llevar a cabo nuestro cometido era necesario contar con datos de funcionamiento de una red de distribución, al no tenerlos decidimos acudir a un ejemplo teórico-práctico, con una red pequeña que ha sido anteriormente trabajada y que sería un buen ejemplo para lo que deseamos desarrollar.

#### **6.4.2. Descripción de la red de Hanoi**

Dado que la primera parte de nuestro modelo requiere datos para trabajar que sean “reales” y al carecer de estos, acudí a ejemplos teóricos para desarrollar el proceso. Específicamente, me centré en la red de distribución de agua de Hanoi, presentada por Fujiwara y Khang en 1990. La misma está basada en la planificación de la red de distribución de agua en Hanoi, Vietnam [31], y se utiliza por ser un punto de referencia en la literatura científica. La red de Hanoi (Figura 6.26), está formada por 34 tuberías, con un total de longitud de 38.61 km de tubería, los posibles rangos de la tubería van de entre 12 y 40 pulgadas, con una demanda total del sistema de 126,5 MGD. Los datos base para llevar a cabo la optimización, la descripción de la red, con todos los datos disponibles y detalles se encuentra en el anexo 2; la plantilla de diseño de la red, fue obtenida de los recursos ofrecidos en línea por parte de la Universidad de Exeter, UK [32], (ver Anexo II).

Esta red se utiliza para realizar la optimización de la distribución de los diámetros de las tuberías de la red, como en [33]. En [34] se utiliza haciendo uso de una variante discreta de PSO (por sus siglas en inglés *Particle Swarm Optimization*). En [35] se trabaja con una nueva variante de PSO. Al tener la disponibilidad de consultar trabajos publicados, nos da la ventaja de comparar los resultados o de tomar más de una configuración para analizar su funcionamiento.

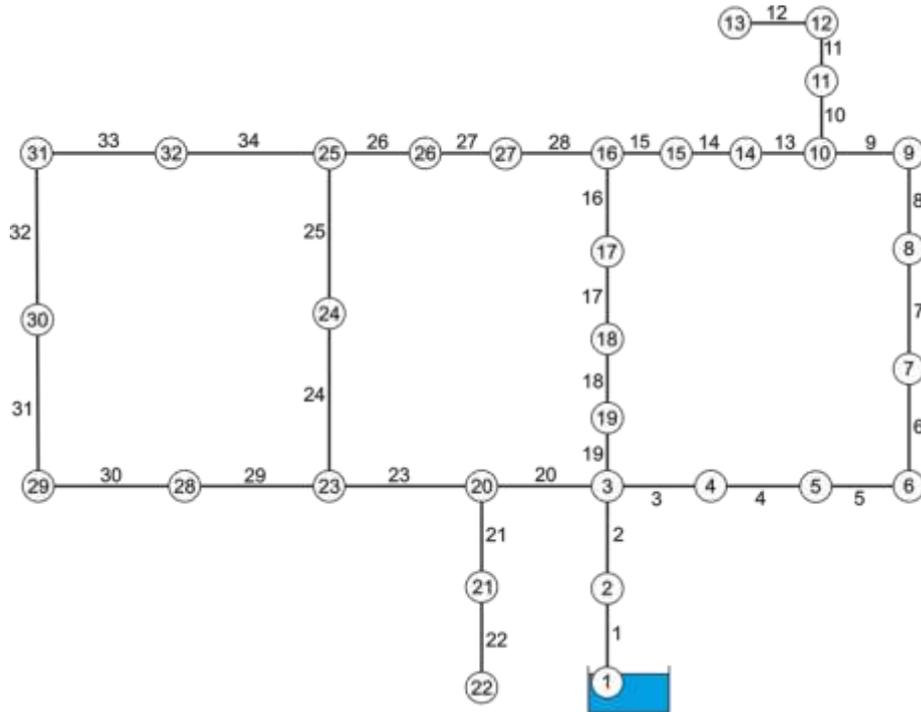


Figura 6.26 Red de Hanoi

Para reproducir el comportamiento de la red de Hanoi, se utilizó EpaNet, un software para ordenador de dominio público, que modela sistemas de distribución de agua potable. Es desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, que también permite llevar a cabo simulaciones hidráulicas en período extendido del movimiento del agua y la calidad del agua en las redes presurizadas; tema que está fuera de nuestro objetivo. EpaNet según Rossman es "una herramienta de investigación que mejora nuestro conocimiento del movimiento y destino del agua potable y sus constituyentes en una red de aguas".

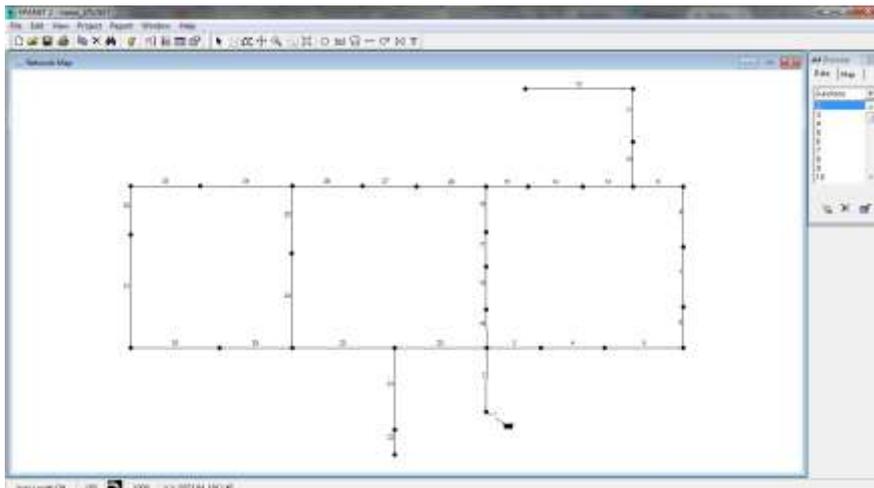


Figura 6.27 Red de Hanoi en modelada en EpaNet

El modelo hidráulico de la red de Hanoi, se realizó en EpaNet, ingresando una geometría previamente optimizada [36], validando los datos de comportamiento (Figura 6.27), para asegurar el buen comportamiento de la red; los resultados de la modelación se asumieron

como condiciones de funcionamiento adecuado u óptimo, siendo nuestro marco de referencia de buen funcionamiento.

El diagrama de flujo que ilustra la posible bondad del proceso se ilustra en la Figura 6.28, que permite evaluar el comportamiento de la red, si no hay comportamiento atípico. El sistema asume que funciona bien y la revisión de la red, termina. Por el contrario, si encuentra algún comportamiento diferente, asume que hay una fuga en la red y con los datos obtenidos procede a evaluar los sectores hasta que identifique aquel que alberga la fuga.

El método depende del conocimiento del funcionamiento adecuado de la red de distribución de agua, ya sea por obtención de datos en tiempo real o por modelación. Lo que se debe asegurar el usuario, independientemente de donde provengan los datos, es que sean los que aseguren el buen funcionamiento de la red; es decir, que reflejen resultados del funcionamiento sin fugas. Siendo así, tener la información disponible es el primer elemento a resolver; si la información corresponde a la real, se puede simular el comportamiento de la red, comparando la modelación con los datos recibidos. La modelación de la simulación de la red en óptimas condiciones, es necesaria para llevar a cabo la comparación cuando se desea llevar a cabo el mantenimiento, con datos provenientes de sensores por ejemplo.

Las herramientas informáticas han demostrado ser herramientas valiosas para los investigadores en diferentes campos. Dichas herramientas van desde el aprendizaje de máquinas y algoritmos evolutivos hasta sistemas basados en reglas y basados en el conocimiento. Por ejemplo, las técnicas supervisadas de aprendizaje de la máquina se han utilizado con éxito en problemas complejos, para la clasificación binaria y multi-clase [37]. Esto es útil para detectar diferentes escenarios defectuosos en sistemas complejos usando, por ejemplo, datos en línea de los sistemas Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA). Los sistemas SCADA juegan, hoy en día, una posición clave en la eficiencia de la distribución del agua [38], y cualquier mejora o herramientas adicionales para tal propósito podrían ser elementos valiosos para ingenieros y técnicos [39]

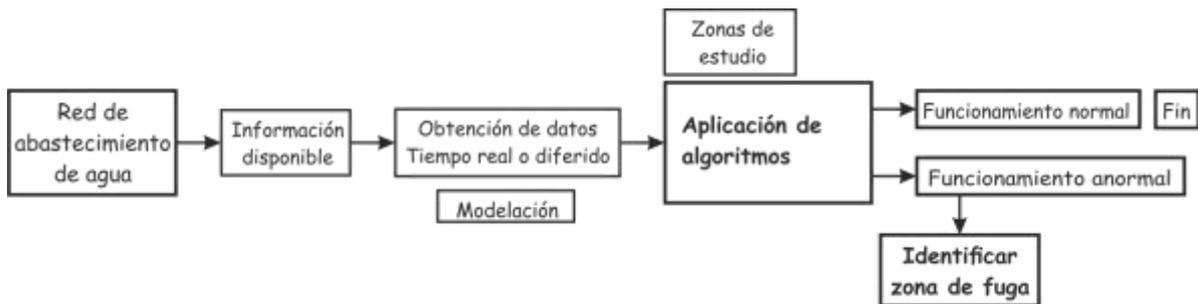


Figura 6.28 Diagrama de flujo auxiliar para identificación de posible zona de fuga

Si el método funciona, ayudará a la determinación de los puntos más convenientes para la colocación de sensores que aporten datos de comportamiento de la red. También será de utilidad para tomar decisiones sobre el sitio de la toma de imágenes infrarrojas dependiendo de que técnica se desee usar para identificar si hay fugas o no.

**Modelo hidráulico para la detección de fugas:** para identificar las zonas que contiene fuga se hizo uso de técnicas *demachine learning*. Las técnicas *demachine learning* han mostrado ser herramientas poderosas para diferentes propósitos. A grandes rasgos, su principal objetivo es extraer automáticamente la información de los datos, utilizando métodos

estadísticos y del denominado *soft computing*. Los procesos de inferencia pueden ser inductivos-deductivos o transductivos; el primero construye un modelo de función, mientras que el segundo no. En cualquier caso, estas herramientas requieren un conjunto de datos de entrenamiento para hacer sus predicciones.

De acuerdo con el resultado deseado, el algoritmo de aprendizaje automático podría basarse en:

- Aprendizaje supervisado: se genera una función para asignar entradas a las salidas deseadas de acuerdo con los datos de entrenamiento.
- Aprendizaje no supervisado: se buscan patrones basados en la auto-organización de los datos.
- Aprendizaje de refuerzo: el proceso de aprendizaje implica una interacción con el medio ambiente para adaptar su comportamiento.

Cuando se utiliza para la clasificación, el aprendizaje supervisado es quizás la opción más popular. Para este propósito, los algoritmos son entrenados con el fin de clasificar los datos como 1 (pertenecen a una clase dada) o 0 (no pertenecen). Esta clasificación se denomina clasificación binaria. Cuando se requiere una clasificación de multiclase (varias clases) se utilizan diferentes enfoques, basados principalmente en varias clasificaciones binarias.

### Planteamiento del caso de estudio

La red Hanoi es un punto de referencia común para optimización y análisis de sistemas de distribución de agua. La geometría utilizada se muestra en la Tabla 6.3 y los parámetros de funcionamiento normal se describen en la Tabla 6.4. Otra ventaja del uso de la red de Hanoi, es que es relativamente pequeña, cubriendo un área superficial aproximada de 5 km<sup>2</sup> en lo que es la red cerrada y un total aproximado de 14 km<sup>2</sup> en la red completa.

Tabla 6.3 Topología de la red de Hanoi.

Link	Length[m]	Diameter [mm]	Link	Length[m]	Diameter [mm]
1	100	1016	18	800	609.6
2	1350	1016	19	400	609.6
3	900	1016	20	2200	1016
4	1150	1016	21	1500	508
5	1450	1016	22	500	304.8
6	450	1016	23	2650	1016
7	850	1016	24	1230	762
8	850	1016	25	1300	762
9	800	1016	26	850	508
10	950	762	27	300	304.8
11	1200	609.6	28	750	304.8
12	3500	609.6	29	1500	406.4
13	800	609.6	30	2000	304.8
14	500	304.8	31	1600	304.8
15	550	304.8	32	150	508
16	2730	304.8	33	860	406.4
17	1750	406.4	34	950	609.6

Tabla 6.4 Parámetros de funcionamiento de la red de Hanoi

Node	Demand [LPS]	Head [m]	Pressure [m]	Node	Demand [LPS]	Head [m]	Pressure [m]
2	247.22	97.14	952.95	18	373.61	53.45	524.37
3	236.11	61.67	604.99	19	16.67	58.85	577.29
4	36.11	56.99	559.09	20	354.17	50.58	496.19
5	201.39	51.19	502.20	21	258.33	41.23	404.48
6	279.17	45.09	442.31	22	134.72	36.07	353.81
7	375.00	43.66	428.30	23	290.28	44.47	436.22
8	152.78	41.97	411.68	24	227.78	38.83	380.90
9	145.83	40.62	398.46	25	47.22	35.20	345.35
10	145.83	39.63	388.76	26	250.00	31.50	308.98
11	138.89	38.07	373.46	27	102.78	30.47	298.91
12	155.56	34.64	339.83	28	80.56	38.90	381.60
13	261.11	30.43	298.54	29	100.00	30.16	295.89
14	170.83	38.27	375.42	30	100.00	30.46	298.79
15	77.78	32.43	318.15	31	29.17	30.55	299.74
16	86.11	30.91	303.22	32	223.61	33.05	324.18
17	240.28	35.17	345.04	1	-5538.89	100.00	0.00

Una de las soluciones adoptadas hoy en día para mejorar la gestión de la red y mejorar su eficiencia hídrica es la sectorización, que consiste básicamente en dividir la red en diversas áreas o sectores propiamente dichos, también llamados sectores hidrométricos o DMAs (*District Metered Area*) por sus siglas en inglés. El balance hídrico de tales sectores queda definido mediante la colocación de uno o más caudalímetros en los puntos de entrada o salida de cada sector y la medición de su consumo en su interior. Para definir y delimitar los distintos sectores predefinidos, es necesario el aislamiento de aquellas tuberías que conecten sectores adyacentes mediante el cierre de válvulas de corte instaladas en la misma. Otorga facilidades reducir fugas evitando así gastos económicos a largo plazo, también se puede ahorrar dinero por la mejora de uso del equipo de bombeo al sectorizar [40].

La sectorización sería un método de gestión adecuado no solo en términos de configuración, sino de análisis para recibir datos continuos, para conocer el comportamiento de la red en tiempo real en cada uno de sus sectores. Además, otorga ventajas en su control, seguimiento y evaluación, así como la disminución de áreas para revisión, evaluación de anomalías o pérdidas de agua. Es conveniente mencionar que también cuenta con desventajas, como el aumento de tiempo de permanencia de agua en la red, fuertes inversiones iniciales y disminuye la garantía de suministro.

En una red dividida en sectores hidrométricos es más fácil evaluar los caudales circulantes y, a su vez, el nivel de fugas en cada uno de ellos, lo que supone una medida efectiva para la detección de pérdidas de agua, su localización y reparación en función de su prioridad.

La sectorización [41] en sí es un tema como puede apreciarse muy amplio, ha sido motivo de investigación que sigue en aumento, ideal tanto para tener un diseño eficaz de la red asegurando un buen funcionamiento, como para llevar a cabo el mantenimiento de un sector de la red sin dejar sin servicio a todos los usuarios de la red. En [42] se trabaja en sectorización por medio de la teoría de grafos. En [43] se tiene un claro ejemplo de la mejora de la gestión de las redes de distribución de agua por medio de la sectorización. La sectorización se ha trabajado usando un enfoque multi-agente en [44] mostrando más

bondades de la técnica. Las publicaciones más recientes establecen ya metodologías como en [45], [46] que se basan en ideas más novedosas como las redes sociales, la optimización multi-objetivo y [47] que considera un análisis económico completo con incertidumbres.

La sectorización se vuelve un complemento adecuado, previo a la aplicación de las técnicas; mas, como el objetivo principal de nuestro caso de estudio es la localización de la fuga, la sectorización de la red se hace de forma manual dividiéndola en base a la geometría y la lógica de la circulación del fluido, lo que nos deja tres sectores o zonas de estudio Figura 6.29. Estas zonas servirán para identificar en cuál de ellas yace la fuga, una vez aplicadas las técnicas; si es que existe.

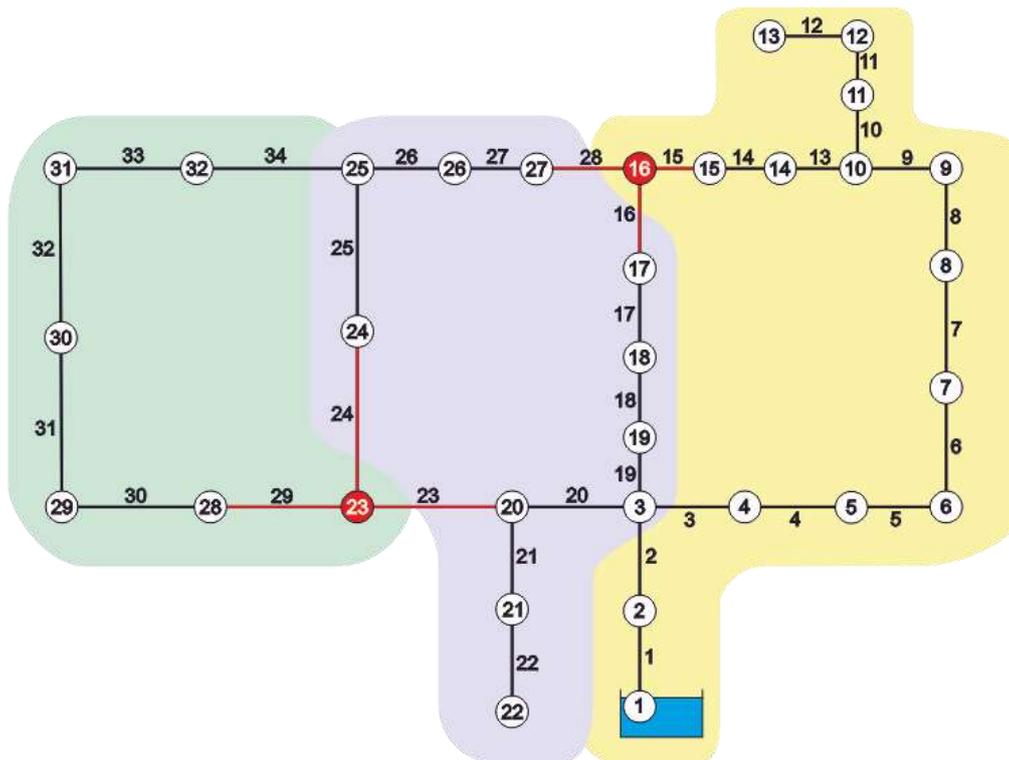


Figura 6.29 Sectores de la red de Hanoi

Para probar el funcionamiento de los clasificadores, se requerían diferentes casos de fuga. Para ello, para elaborar escenarios, se trabajó bajo la suposición de la existencia de una fuga por escenario, para cada una de las tuberías de la red. Por ende, se elaboraron 34 escenarios de funcionamiento anormal diferentes, igual a la cantidad de tuberías de la red de Hanoi. Cada escenario bajo con un comportamiento hidráulico bajo influencia de la fuga. La fuga estaba localizada, justo a la mitad de su longitud total de la tubería en la que yacía, y la pérdida de agua se asignó de manera aleatoria, en un rango de porcentaje entre el 20 y el 40% de la cantidad de agua que circula por esa tubería en condiciones normales de funcionamiento (agua saliente del nodo en el sentido de la circulación). Los nodos usados para compilar la información que alimentará a los clasificadores son el 16 y el 23, elegidos por pertenecer cada uno de ellos a un sector que influye en el comportamiento de los otros. La elección de los nodos es interesante ya que no existe una norma para la colocación, su estudio puede ser una línea de estudio interesante para un futuro.

El rango de porcentaje entre el 20 y 40% de pérdida se basó en datos estadísticos de la media del porcentaje de pérdidas de agua a nivel mundial, asignados de forma aleatoria. Ya

que no existe un criterio que determine la rotura o fallo de una tubería, las presiones en la red pueden aumentar o disminuir la fuga; tal comportamiento bien corresponde a otro tipo de estudio. En general, los modelos con fuga asignada presentaban buen comportamiento a excepción del modelo 2; éste corresponde a la fuga en la tubería número 2, tubería de las principales, previa a entrar de lleno en la red, su porcentaje de pérdida asignado era 30%, que tuvo que modificarse a tan solo 12,9%, a base de prueba y error. Dicho porcentaje que como se ve, está por debajo de la media del resto de pérdidas, que al ser de una tubería de conducción principal hasta cierto punto puede justificarse, para continuar con nuestro trabajo, se dejó este porcentaje para asegurar el funcionamiento del modelo 2. Los valores de fuga asignados para cada tubería se muestran en la Tabla 6.5.

**Tabla 6.5 Valores asignados de fuga a las tuberías**

Nodo	Demanda del nodo m <sup>3</sup> /hr	Tubería	Porcentaje de fuga de la tubería	Valor de fuga m <sup>3</sup> /hr
Reservorio		1	20	1107,778
2	890	2	12,9	682,62543
3	850	3	25	551,6075
4	130	4	35	759,612
5	725	5	40	787,572
6	1005	6	20	337,952
7	1350	7	40	525,904
8	550	8	20	232,396
9	525	9	23	233,7145
10	525	10	34	188,8904
11	500	11	28	116,6676
12	560	12	26	67,8886
13	940	13	30	94,428
14	615	14	32	46,0576
15	280	15	32	21,168
16	310	16	23	11,1711
17	865	17	27	77,9895

Nodo	Demanda del nodo m <sup>3</sup> /hr	Tubería	Porcentaje de fuga de la tubería	Valor de fuga m <sup>3</sup> /hr
18	1345	18	29	192,1134
19	60	19	25	169,7825
20	1275	20	37	802,9
21	930	21	39	153,2895
22	485	22	26	35,0272
23	1045	23	20	284,556
24	820	24	30	290,19
25	170	25	40	295,808
26	900	26	25	81,0425
27	370	27	35	25,9595
28	290	28	27	7,7247
29	360	29	28	46,2588
30	360	30	34	28,781
31	105	31	36	5,526
32	805	32	28	32,298
		33	31	44,8012
		34	29	106,7577

Con toda esta información se puede trabajar con las técnicas *machine learning* que auxiliarán en la identificación de una posible fuga. Se usaron dos clasificadores: SVM y RVM (explicados en la sección 5.3), para hacer una comparativa entre sus desempeños. Para el SVM se utilizó una *toolbox* disponible en MATLAB, para clasificación binaria; con el fin de tratar el problema multi-clase, se efectuó un enfoque uno contra todos, usando tres clasificadores diferentes que fueron entrenados para detectar la presencia de una fuga para una sola zona. Para el RVM, se utilizó una *toolbox* disponible en Matlab Central [49] soporta la clasificación multi-clase para el RVM. Fueron seleccionadas, un total de 17 pruebas de manera aleatoria, con el propósito de entrenamiento; el resto de las pruebas se usaron para llevar a cabo una comparación. El SVM resultó ser el que requería más vectores de apoyo para llevar a cabo la clasificación, mientras el RVM solo requirió dos vectores para aportar un rendimiento aproximado al otro clasificador; los valores se muestran en la Tabla 6.6.

**Tabla 6.6 Resultados de los clasificadores.**

	Success ratio	Vectors
SVM	12/17	[4,7,6]
RVM	11/17	2

Esto nos ayuda a validar la técnica como una herramienta adecuada para la detección de una fuga y de la zona donde puede yacer ésta, además de la ventaja que presenta el RVM, presentando un rendimiento casi igual que un SVM, pero requiriendo menos vectores para su clasificación.



## 7. RESULTADOS DEL PROCESO DE IMÁGENES

El análisis de imágenes es una herramienta potente que genera mucha información. Nosotros hemos considerado que la interacción del técnico es parte importante del proceso. Es el técnico el que se encarga de elegir la zona “sospechosa” de presentar una fuga en la imagen; él se encarga de visualizar y comparar las imágenes; interactúa con ellas y asigna los elementos de interés en la imagen, lo cual es básicamente la forma de trabajo. Visualmente, una imagen no puede dar más información por sí sola, que la que muestra; recordemos que se trata de una representación que tiene dos dimensiones; una tercera dimensión sería deseable, pero se requeriría de otros instrumentos o elementos para poder adquirir la profundidad en la escena.

Por otro lado, seguimos considerando de importancia al factor humano como parte de la toma de decisión. Dado lo delicado que es el tema del agua; creemos que debe ser así, es la diferencia que hacemos entre "inteligencia artificial" e "inteligencia computacional". La primera tiene una intención sustitutiva, la segunda pretende dar herramientas al capital humano para ponderar mejor sus decisiones. Las fugas se pueden presentar muy irregulares, por lo que un técnico especializado siempre será de utilidad, tanto en llevar a cabo los procesos por ordenador, como en la interpretación de los resultados.

De los ensayos hechos que se mostraron en tabla 6.2 de la sección 6.2.3, únicamente se presenta un resultado representativo de cada uno de los resultados que tienen impacto en la investigación. Los resultados son presentados en el orden siguiente:

1. La inspección visual de imágenes de infrarrojos: se varían las paletas de color y las escalas de temperatura que permiten que los rangos se amplíen o disminuyan mostrando mejor detalle en las imágenes; no se modifican las variables ambientales. Esta se lleva a cabo con apoyo del software, *FLIR Quick Report*. Requiere pericia por parte del técnico y conocimiento de la tecnología IR.
2. Procesado de la imagen RGB con MATLAB: se utiliza el método de Otsu que se encarga de segmentar la imagen. No intervienen las variables ambientales.
3. Procesado de la imagen RGB con MATLAB: se utiliza la binarización que se encarga de segmentar la imagen; el umbral se asigna para que exista visualización de los elementos. No intervienen las variables ambientales.
4. Procesado del termograma con MATLAB: el termograma se analiza comparándolo con otro de características similares de temperatura media. Intervienen las variables ambientales, fecha, hora de toma y variables de la IR.
5. Procesado completo: se analiza la imagen RGB, el termograma y la imagen en escala de grises, se presenta un resumen de todo el proceso para apreciar las diferencias. Intervienen las variables ambientales, fecha, hora de toma y variables de la IR.

Las escalas de color que se observan son: RGB para la imagen IR y CYMK para el termograma, asignadas propiamente por el software de origen, respetando las características en el proceso. El cambio de coloración no es relevante para el análisis.



### 7.1. Ensayo ID: St-3

Descripción: la toma de imágenes se hizo de enero de 2014 a febrero de 2014.

Fecha de toma: 10 de enero de 2014; Invierno.

Hora: 11:32 hrs.

Temperatura ambiente: 11.9°C.

Umbral: 85.

Figuras: 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5.

Observaciones/diagnóstico: No se aprecia diferencia relevante en los procesos; en todos se intuye la tubería y el sistema de colección pluvial. El proceso de las imágenes, en conjunto, permite intuir una tubería en buen estado, dados los resultados de la IR y el termograma, que generan contornos, lo que anula la existencia de una fuga, cuyo comportamiento se apreciaría como "mancha". La gran absorción de calor en la zona impide la visualización clara.

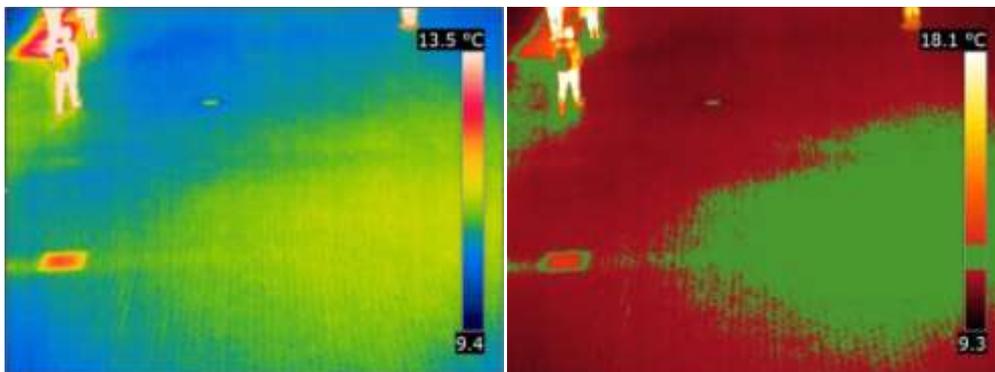


Figura 7.1 Imagen con END visual (paleta Glowbow), ensayo ID:St-3

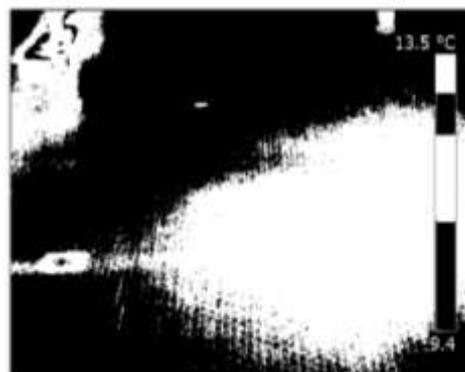


Figura 7.2 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID:St-3



Figura 7.3 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID:St-3

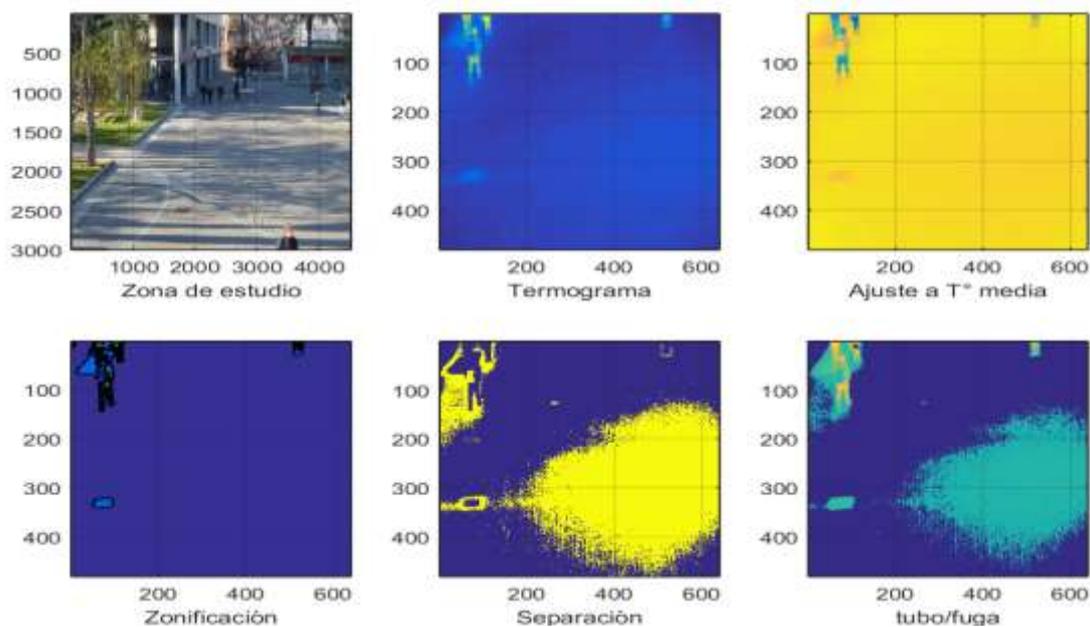


Figura 7.4 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID:St-3

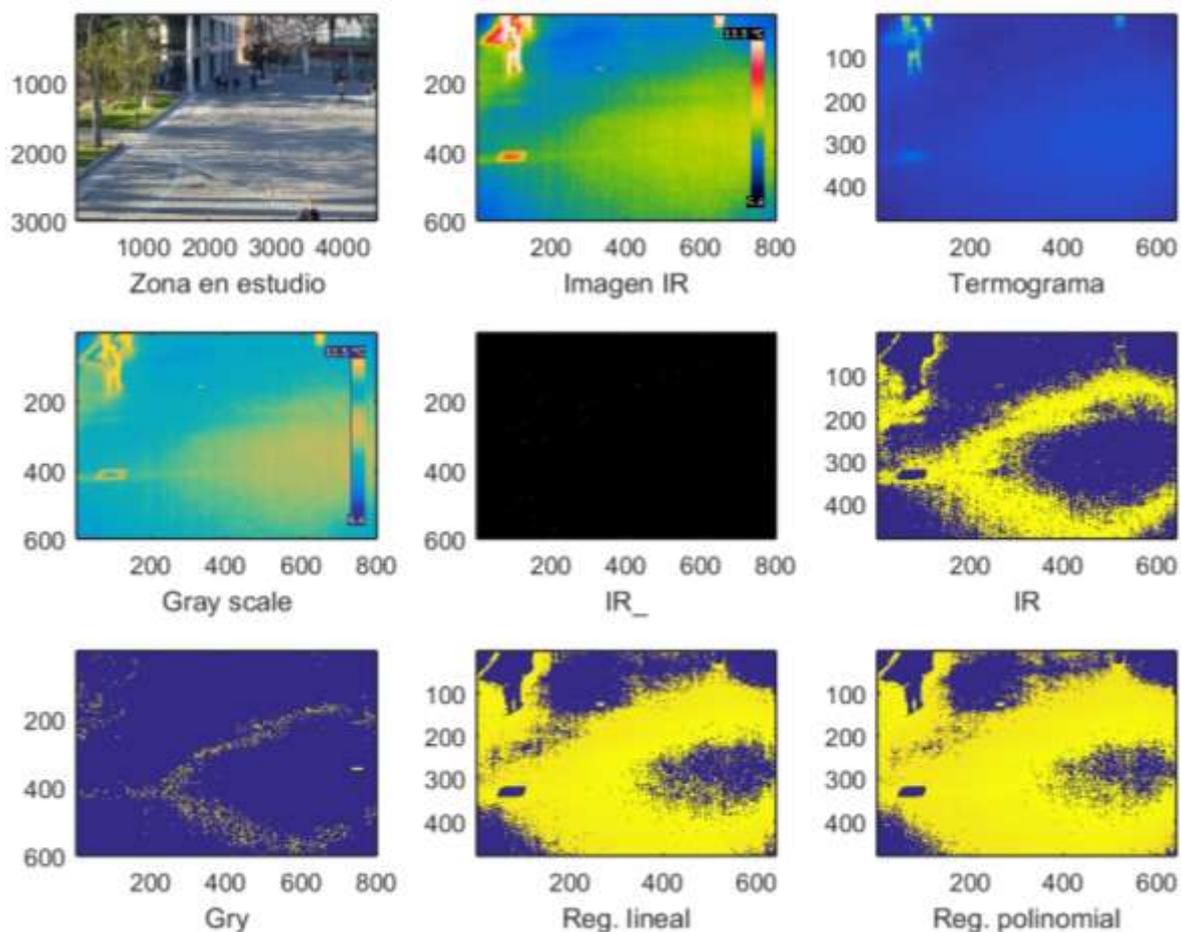


Figura 7.5 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID:St-3

## **7.2. Ensayo ID: St-4**

Descripción: la toma de imágenes se hizo de enero de 2014 a febrero de 2014.

Fecha de toma: 10 de enero de 2014; Invierno.

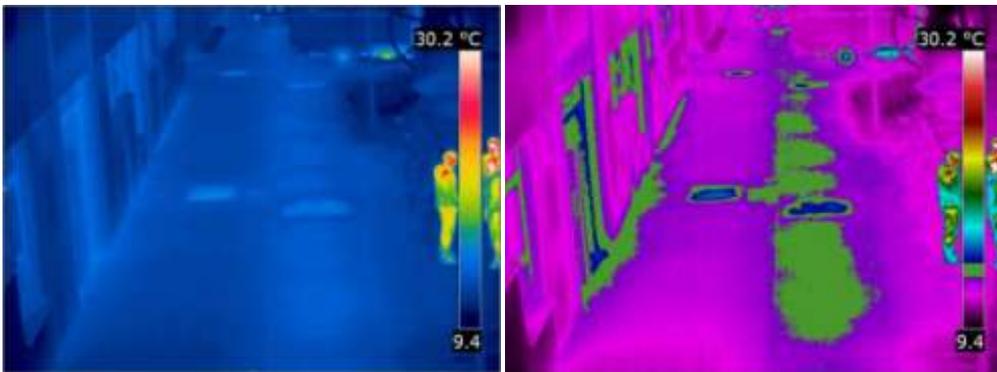
Hora: 11:46 hrs.

Temperatura ambiente: 12°C.

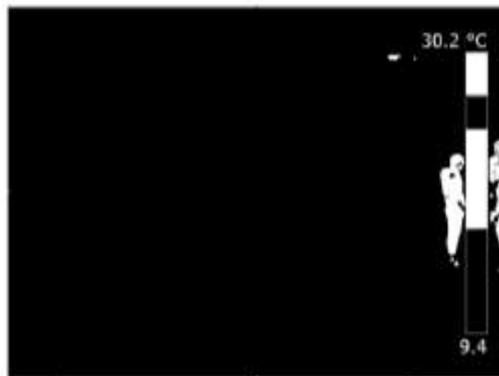
Umbral: 85.

Figuras: 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5.

Observaciones/diagnóstico: la inspección visual permite apreciar la conducción de agua pluvial. Este no es un elemento que genere fugas, mas es un buen ejemplo de los resultados del proceso. Se debe considerar la perspectiva de la imagen para asumir su contorno regular. El método de Otsu no genera información relevante.



**Figura 7.6 Imagen con END visual (paleta RainHi), ensayo ID: St-4**



**Figura 7.7 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: St-4**



**Figura 7.8 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: St-4**

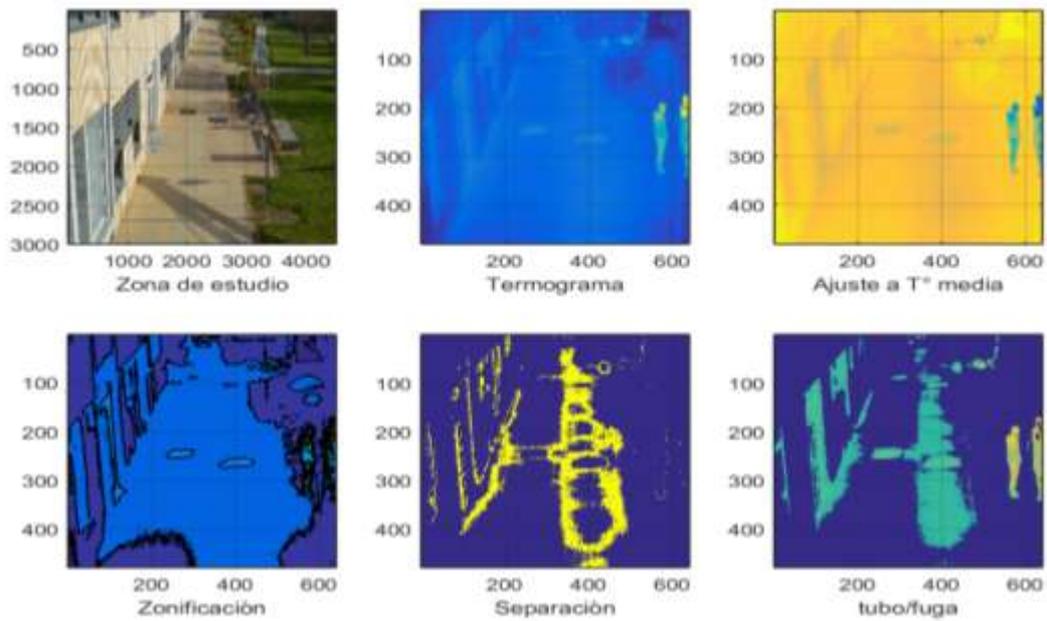


Figura 7.9 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: St-4

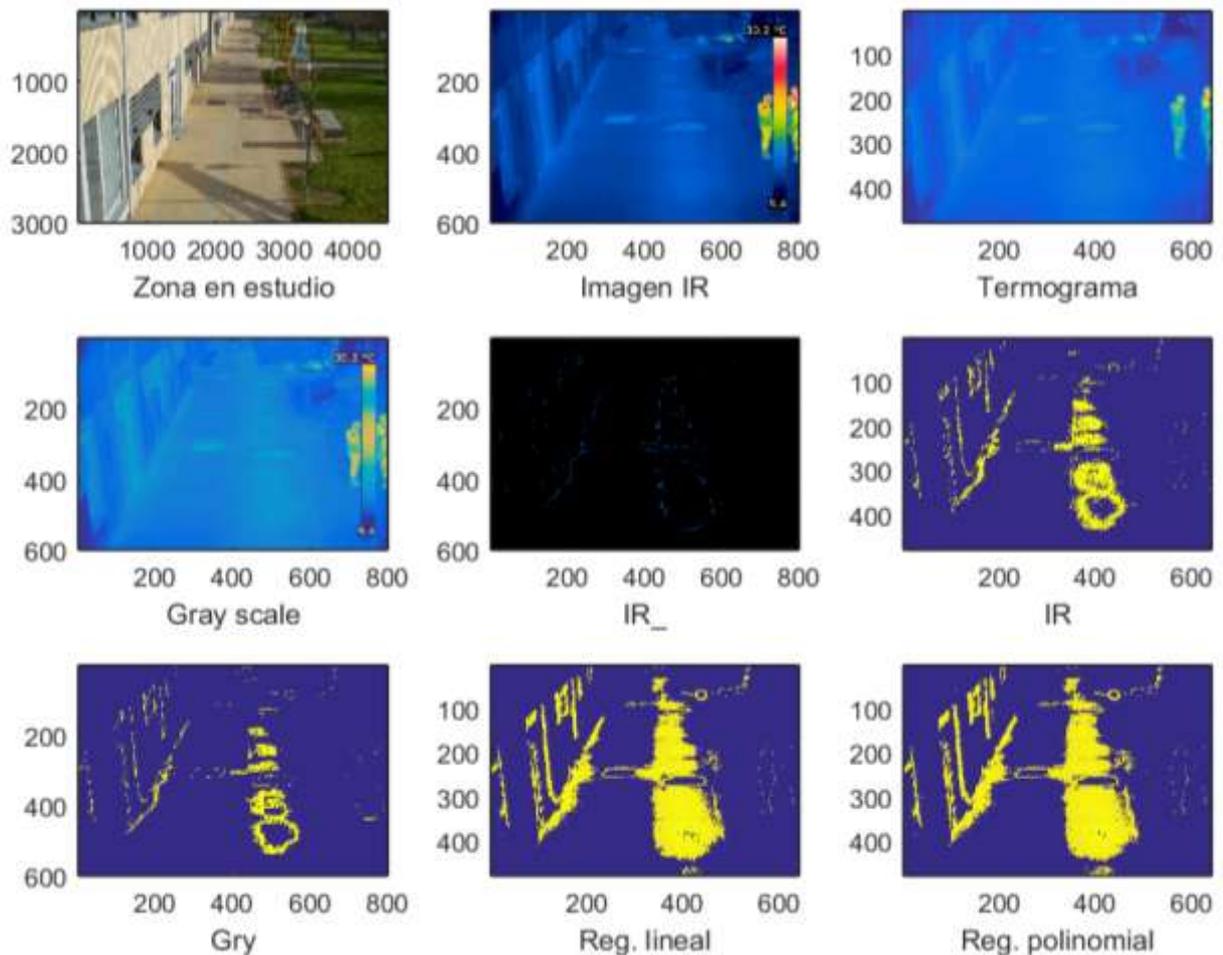


Figura 7.10 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: St-4

### 7.3. Ensayo ID: St-2

Descripción: la toma de imágenes se hizo entre la farmacia, la biblioteca de industriales y el edificio 5C de la UPV sin condiciones especiales del 18 de octubre de 2013 a 17 de febrero de 2014.

Fecha de toma: 17 de febrero de 2013; Invierno.

Hora: 18:02 hrs.

Temperatura ambiente: 12°C.

Umbral: 130.

Figuras: 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15.

Observaciones/diagnóstico: los métodos aíslan las zonas en estudio de forma positiva, en este tipo de imagen era necesario estar más alerta de los elementos externos, pues eran más que en la media del resto de la imágenes, tanto en el método de Otsu como en la binarización.

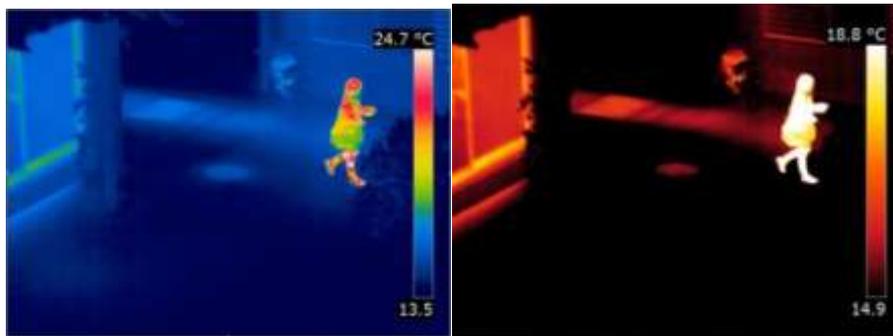


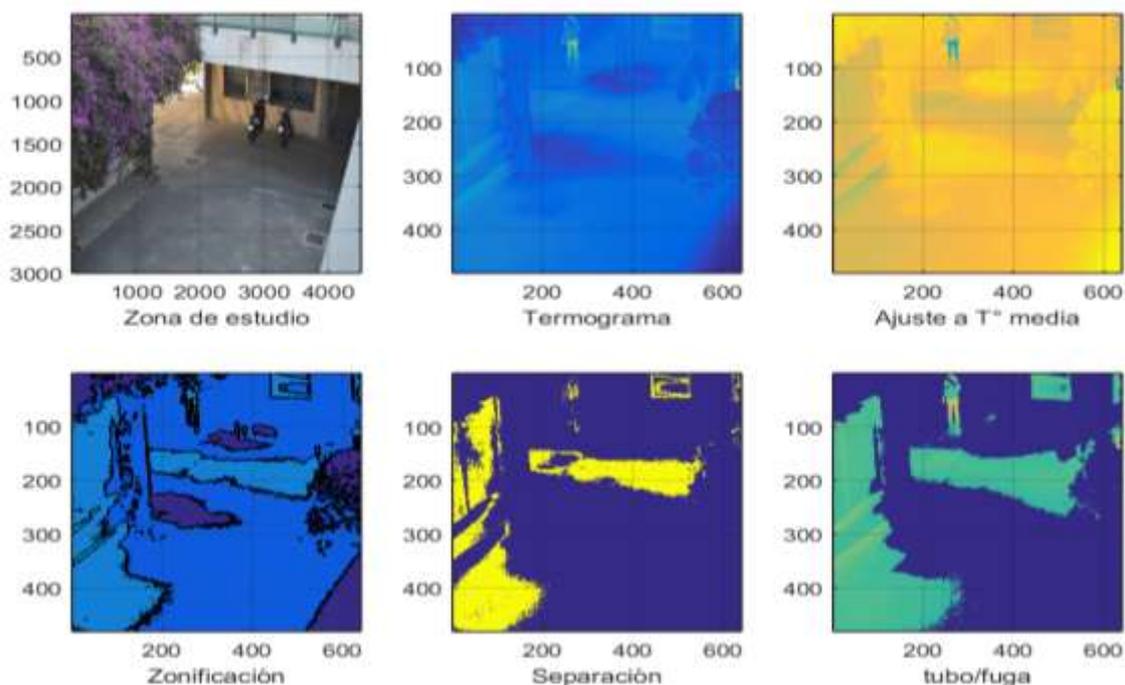
Figura 7.11 Imagen con END visual (paleta Glowbow), ensayo ID: St-2



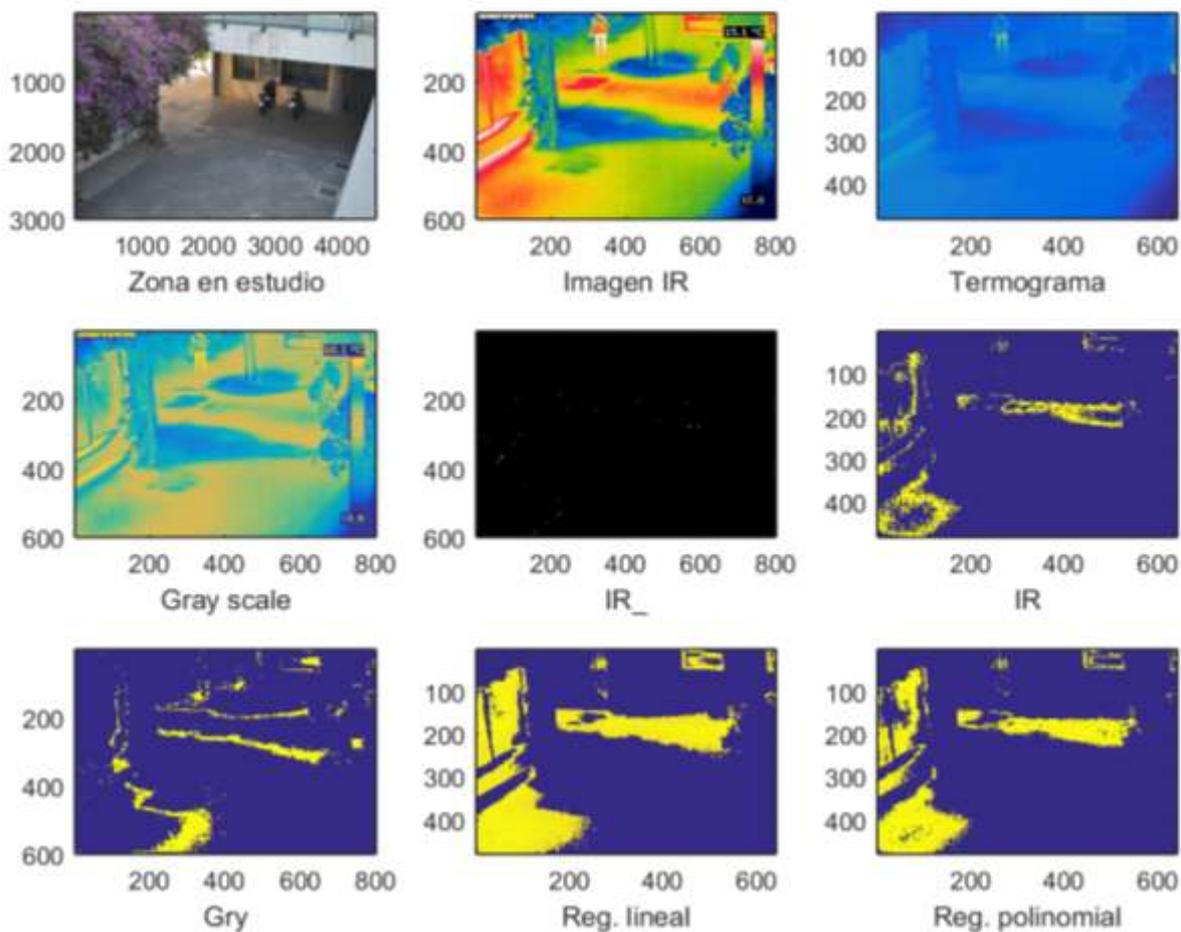
Figura 7.12 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: St-2



Figura 7.13 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: St-2



**Figura 7.14 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: St-2**



**Figura 7.15 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: St-2**

#### 7.4. Ensayo ID: Exp-1

Descripción: la toma de imágenes se hizo en la explanada de la UPV sin condiciones especiales.

Fecha de toma: 11 de diciembre de 2013; Invierno.

Hora: 17:59 hrs.

Temperatura ambiente: 12.9°C.

Umbral: 45.

Figuras: 7.16, 7.17, 7.18, 7.19, 7.20.

Observaciones/diagnóstico: los métodos aíslan de forma adecuada la estructura pluvial y la tubería; la existencia de cambios de temperatura entre ellas se favorecen y perjudican a la vez; la zona a elegir para aplicar los métodos debía incluir ambas.

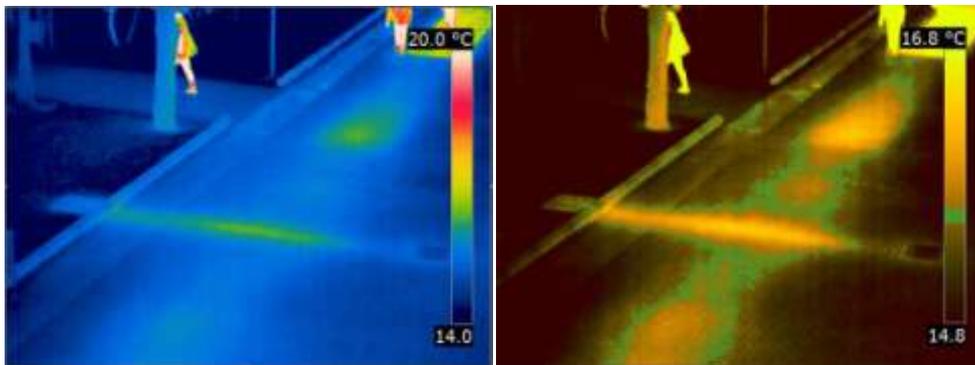


Figura 7.16 Imagen con END visual (paleta Yellow), ensayo ID: Exp-1



Figura 7.17 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Exp-1



Figura 7.18 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Exp-1

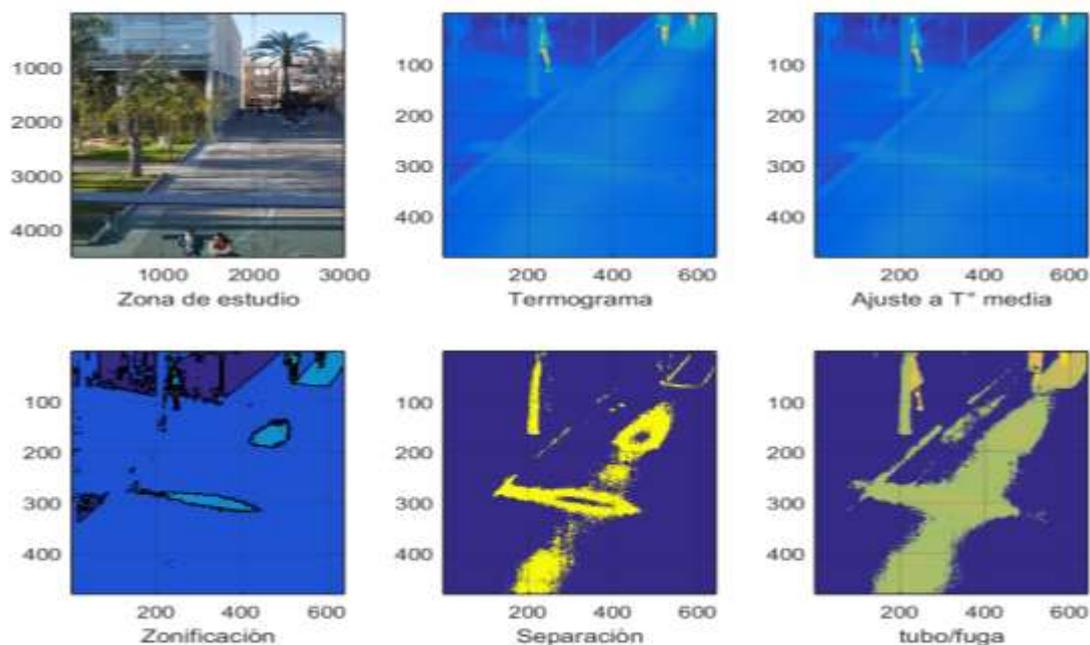


Figura 7.19 Resultados del procesamiento del termograma, ensayo ID: Exp-1

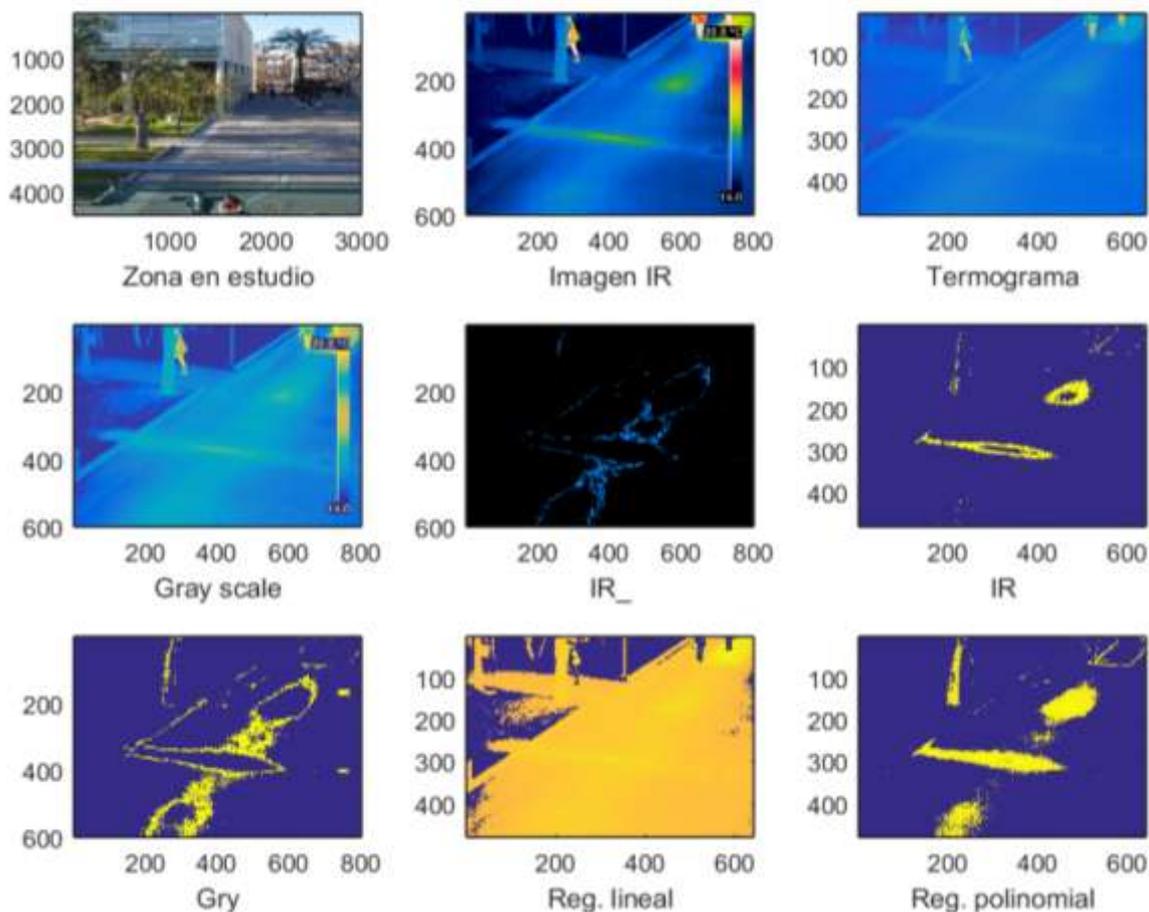


Figura 7.20 Resumen del procesamiento de las imágenes, ensayo ID: Exp-1

### 7.5. Ensayo ID: Mp-1

Descripción: Estudio de profundidad utilizando dos botellas que se enterraron a diferentes profundidades, llenas con agua a diferentes temperaturas.

Fecha de toma: 16 de junio de 2015; Primavera.

Hora: 16:37 hrs.

Temperatura ambiente: 28.4°C.

Umbral: 185.

Figuras: 7.21, 7.22, 7.23, 7.24, 7.25.

Observaciones/diagnóstico: en la inspección visual(Figura 7.21), la botella se puede apreciar una vez manipulada la imagen. Los métodos aíslan de forma adecuada la región en estudio; en el caso del método de Otsu, la saturación de temperatura aísla únicamente un contorno, correspondiente a la tubería con líquido caliente, que no aporta un resultado adecuado.

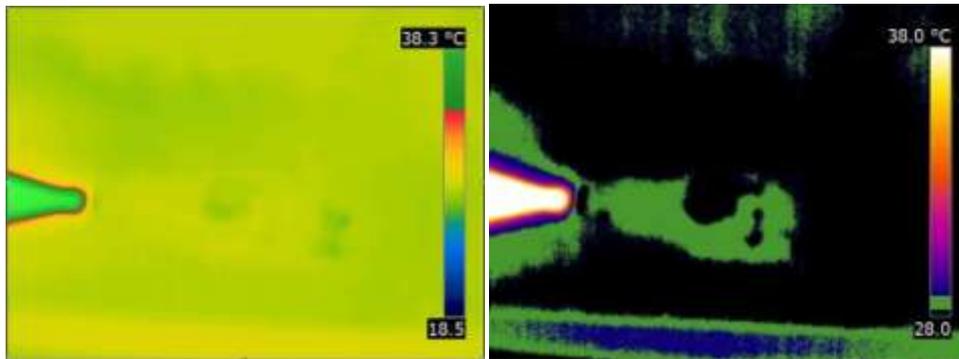


Figura 7.21 Imagen con END visual (paleta Iron), ensayo ID: Mp-1

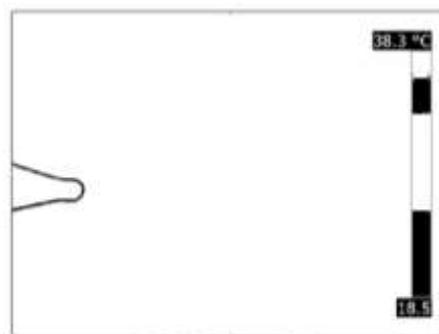


Figura 7.22 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mp-1



Figura 7.23 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mp-1

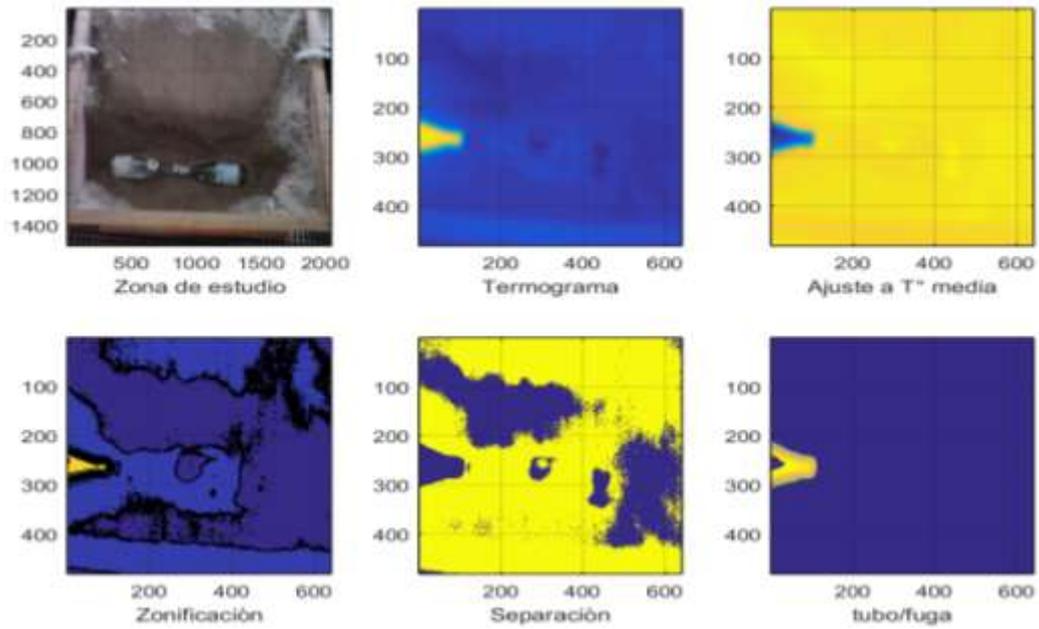


Figura 7.24 Resultados del procesamiento del termograma, ensayo ID: Mp-1

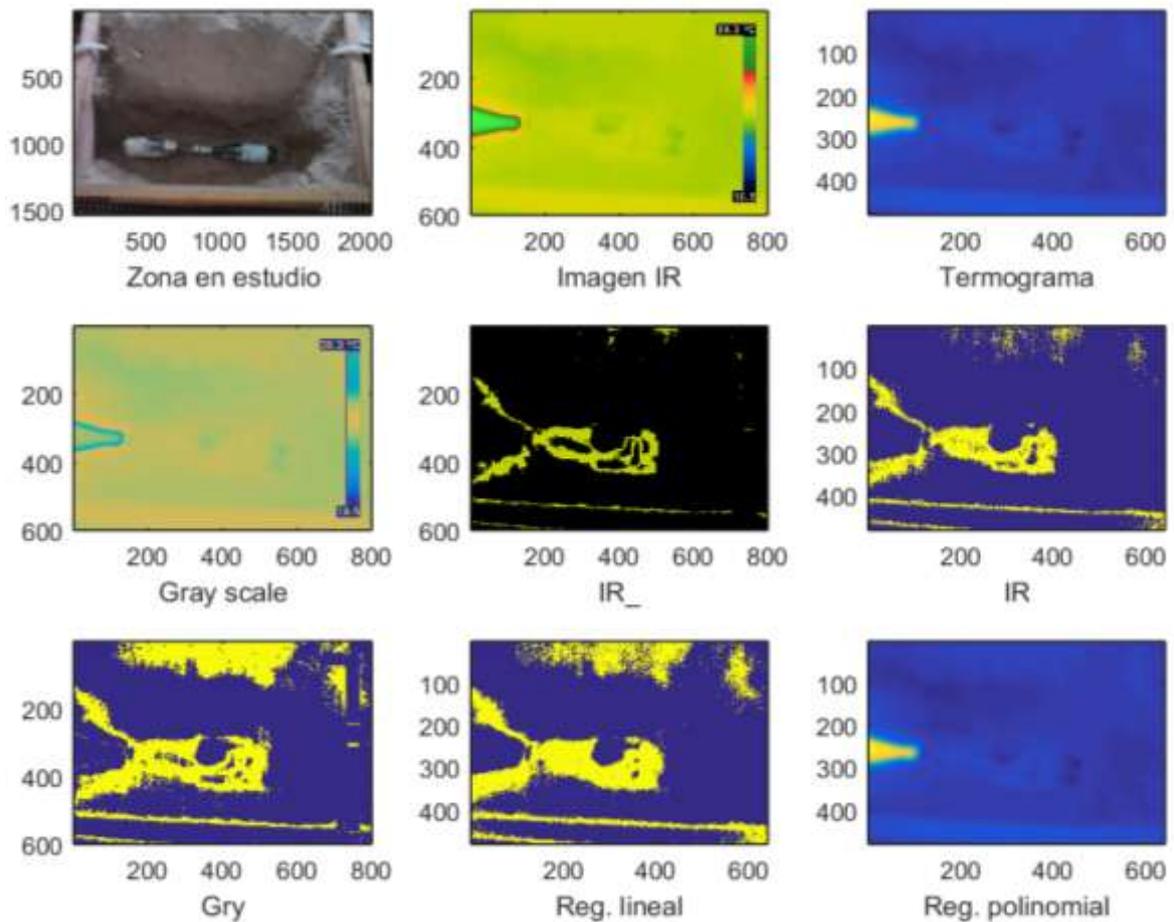


Figura 7.25 Resumen del procesamiento de las imágenes, ensayo ID: Mp-1

### 7.6. Ensayo ID: Mgf-1

Descripción: La toma de imágenes se realizó con la tubería trabajando por gravedad.

Fecha de toma: 07 de octubre de 2015; Otoño.

Hora: 15:27 hrs.

Temperatura ambiente: 21.6°C.

Umbral: 55.

Figuras: 7.26, 7.27, 7.28, 7.29, 7.30.

Observaciones/diagnóstico: la inspección visual, la tubería se aprecia de forma clara. Los métodos aíslan la zona en estudio. Se puede apreciar un contorno que no es uniforme, con zonas notablemente más frías; se puede intuir fuga en la tubería.

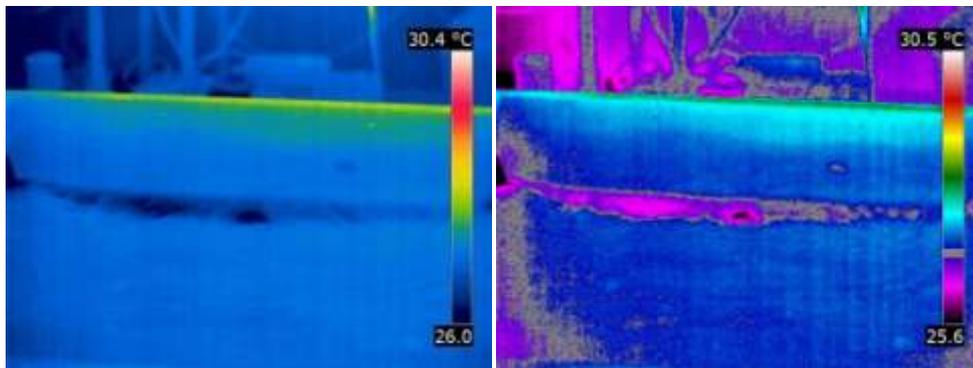


Figura 7.26 Imagen con END visual (paleta Rain), ensayo ID: Mgf-1



Figura 7.27 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mgf-1



Figura 7.28 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mgf-1

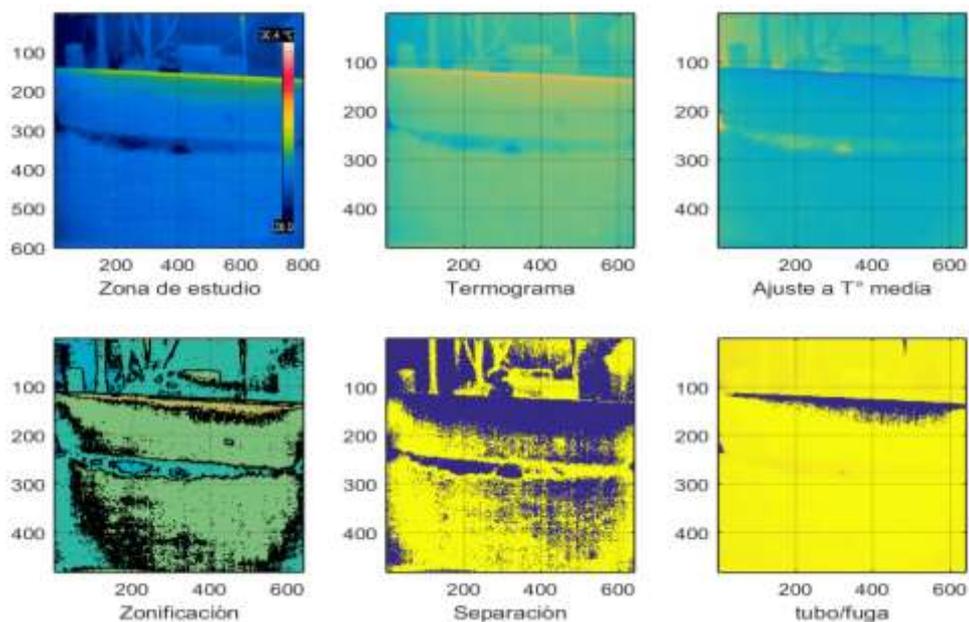


Figura 7.29 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mgf-1

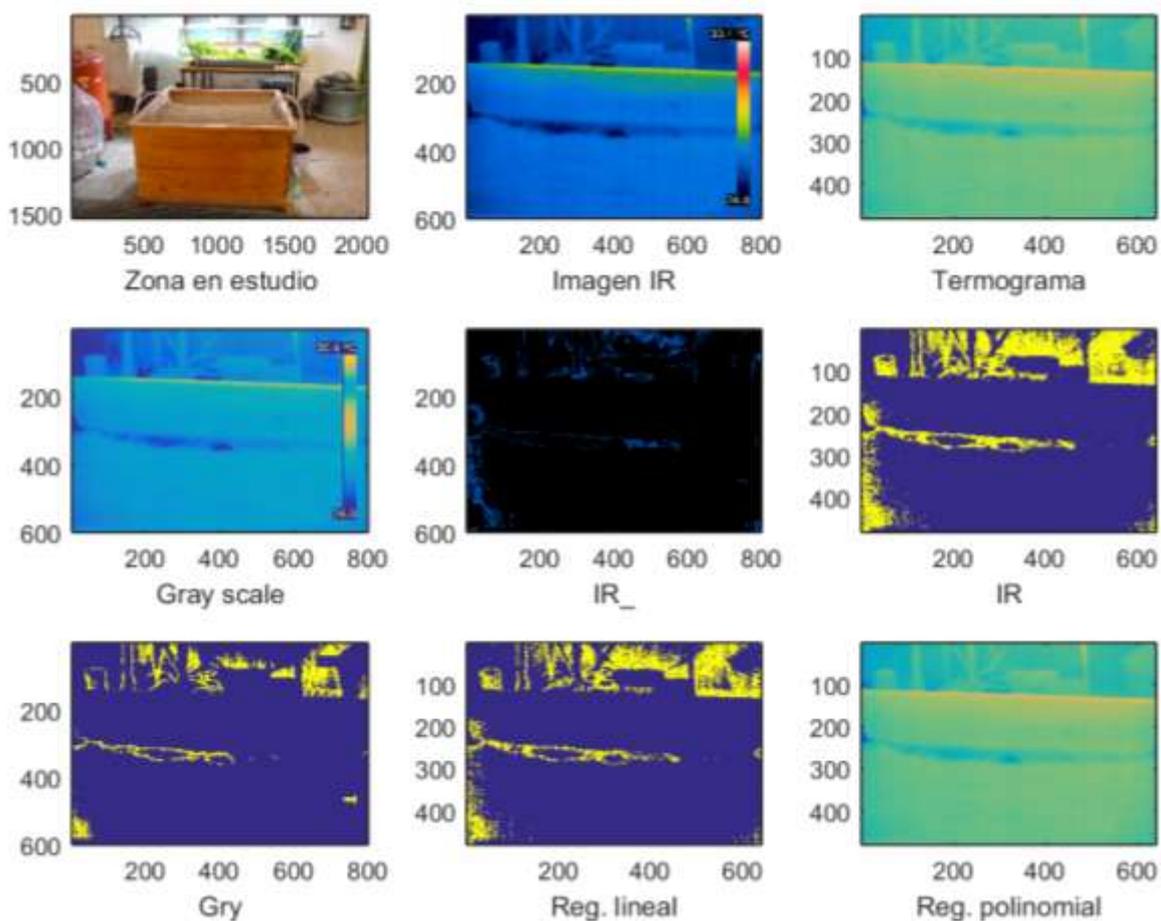


Figura 7.30 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mgf-1

### **7.7. Ensayo ID: Mr-1**

Descripción: La toma de imágenes se realizó con el circuito trabajando hasta estabilizarse.

Fecha de toma: 13 de junio de 2014; Primavera.

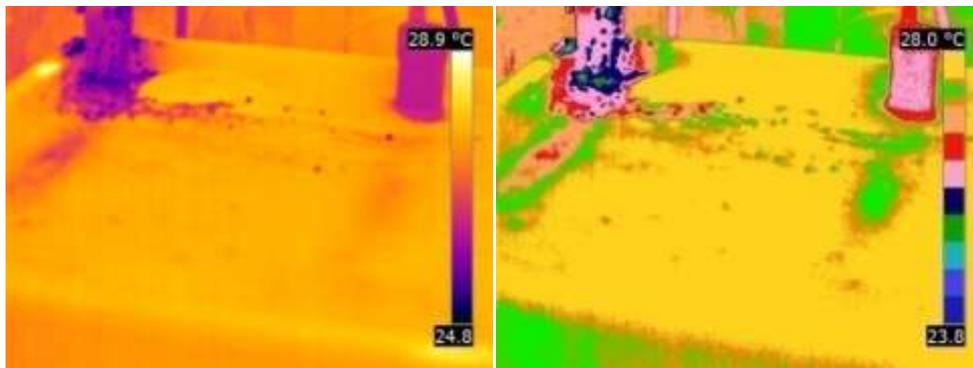
Hora: 10:29 hrs.

Temperatura ambiente: 28°C.

Umbral: 7.

Figuras: 7.31, 7.32, 7.33, 7.34, 7.35.

Observaciones/diagnóstico: la tubería se puede visualizar mejor, una vez manipulada la imagen. El método de Otsu no aísla la región de tubería. El resto de los métodos aíslan zonas y delimitan contornos; una tubería funcionando sin fugas.



**Figura 7.31 Imagen con END visual (paleta Medical), ensayo ID: Mr-1**



**Figura 7.32 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mr-1**



**Figura 7.33 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mr-1**

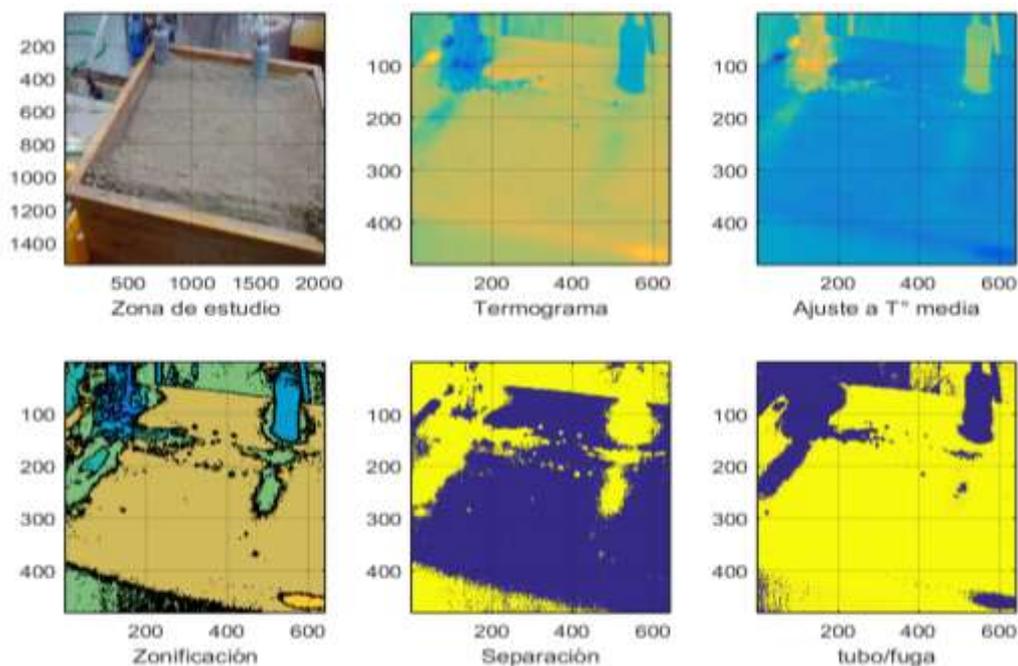


Figura 7.34 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mr-1

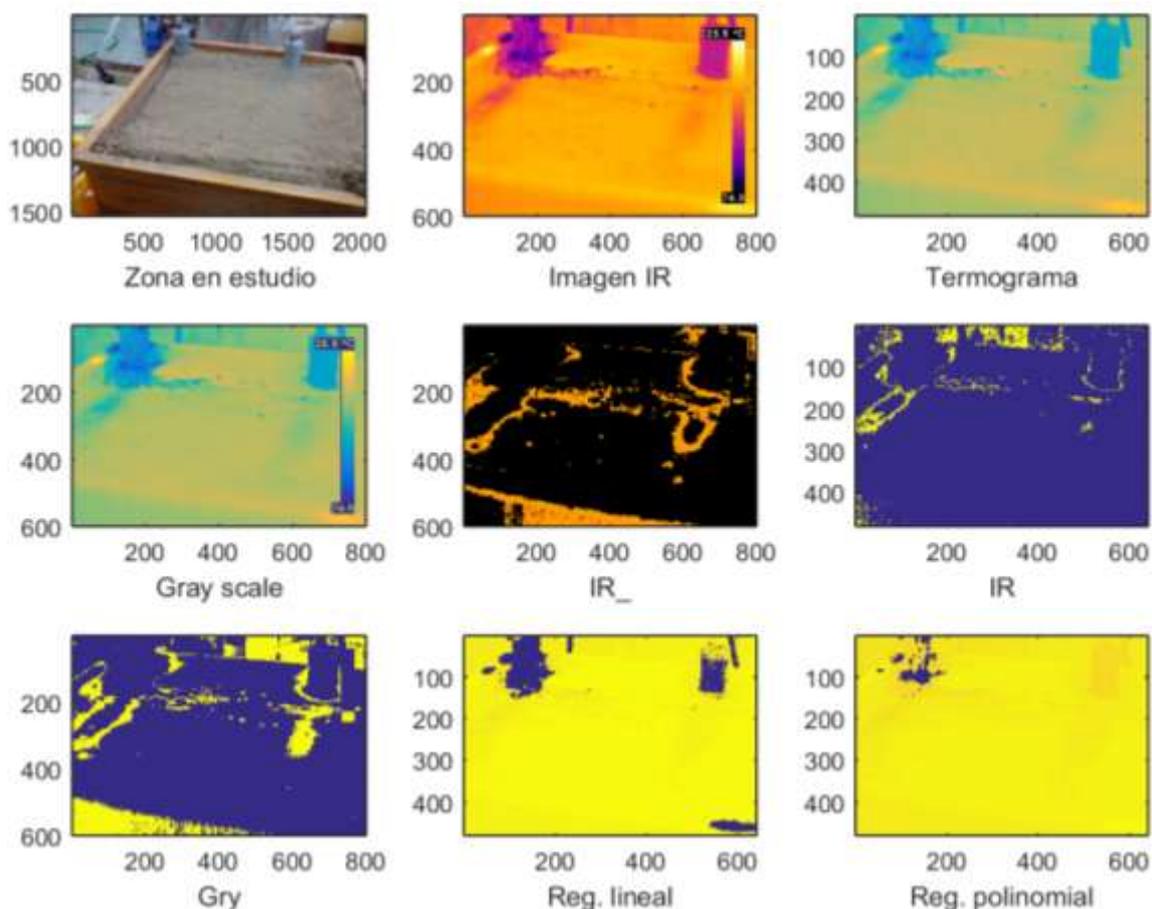


Figura 7.35 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mr-1

### 7.8. Ensayo ID: Mr-3

Descripción: La toma de imágenes se realizó con el circuito trabajando hasta estabilizarse.

Fecha de toma: 03 de agosto de 2016; Invierno.

Hora: 10:17 hrs.

Temperatura ambiente: 27.7°C.

Umbral: 131.

Figuras: 7.36, 7.37, 7.38, 7.39, 7.40.

Observaciones/diagnóstico: la tubería se aprecia de forma clara. Todos los métodos aíslan la zona de estudio de forma uniforme. No contiene fugas.

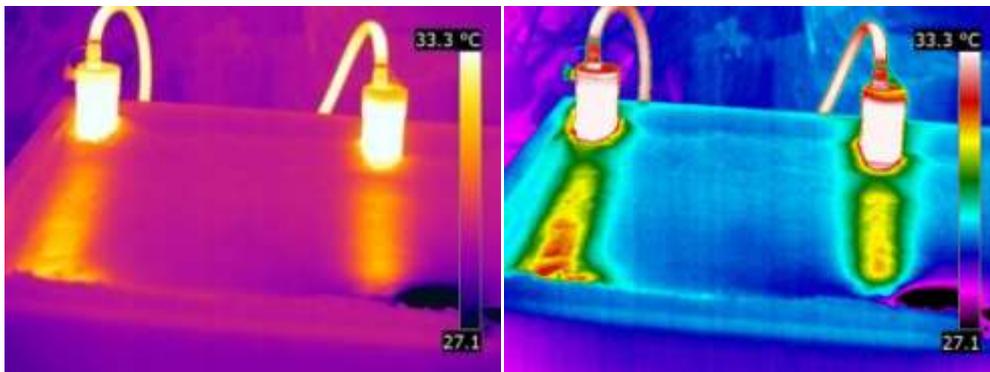


Figura 7.36 Imagen con END visual (paleta RainHi), ensayo ID: Mr-3

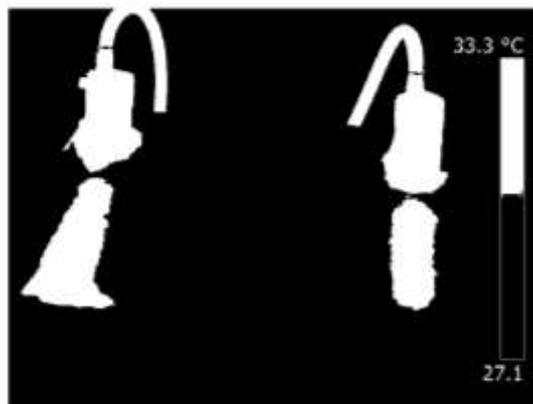


Figura 7.37 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mr-3

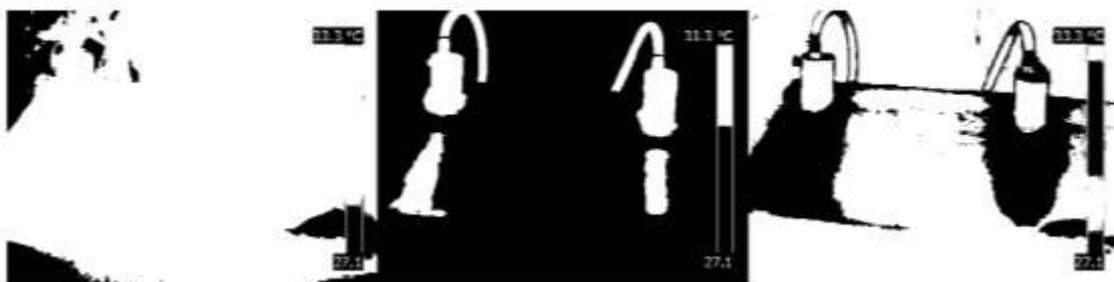


Figura 7.38 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mr-3

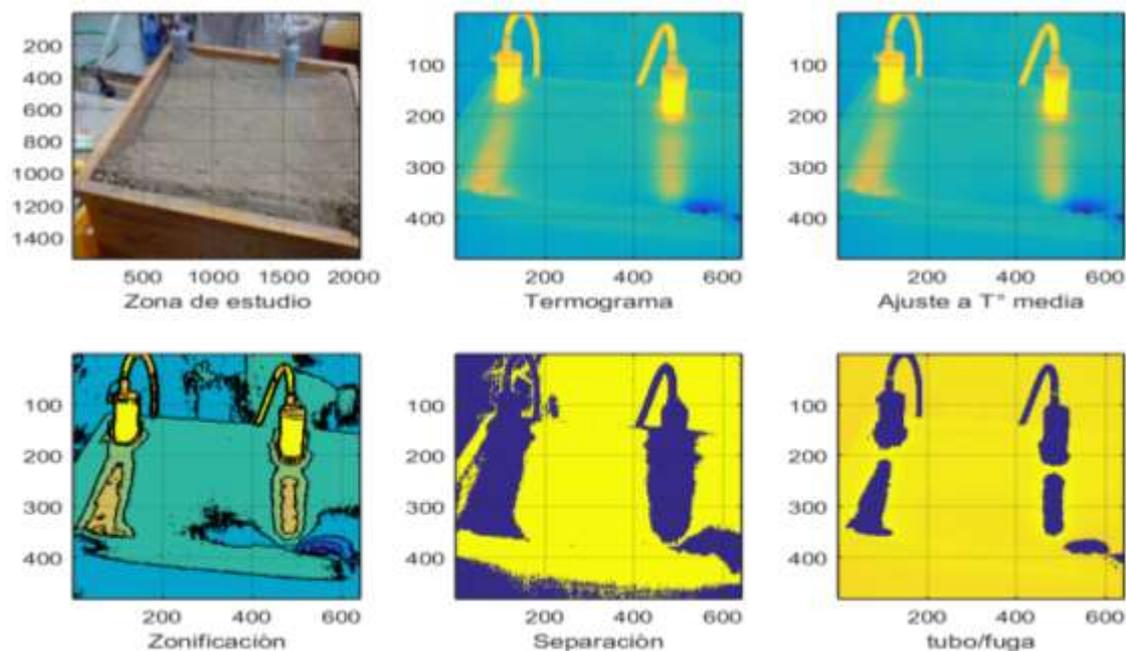


Figura 7.39 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mr-3

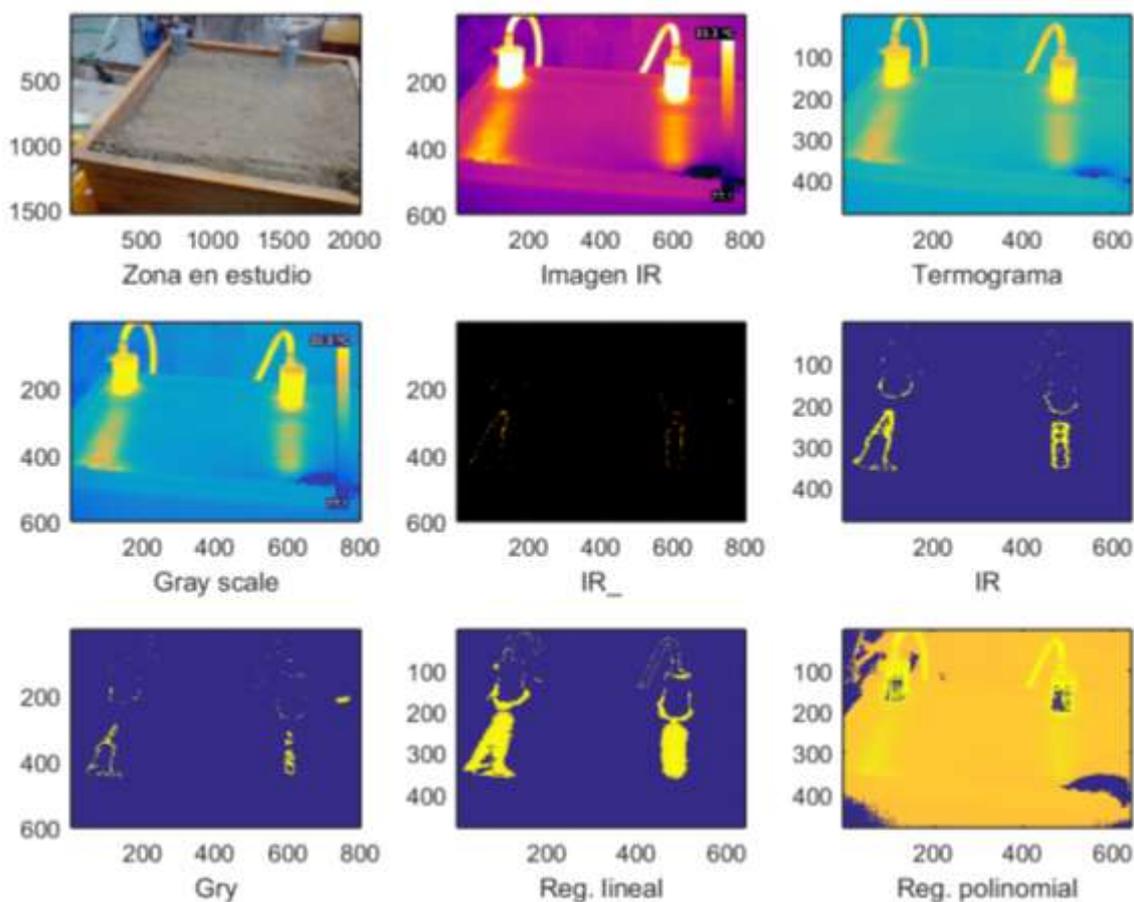


Figura 7.40 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mr-3

### 7.9. Ensayo ID: Mr-4

Descripción: La toma de imágenes se realizó con el circuito trabajando hasta estabilizarse.

Fecha de toma: 17 de agosto de 2016; Otoño.

Hora: 13:17 hrs.

Temperatura ambiente: 29.1°C.

Umbral: 105.

Figuras: 7.41, 7.42, 7.43, 7.44, 7.45.

Observaciones/diagnóstico: en la inspección visual, la tubería se aprecia de forma clara. La perspectiva afecta la imagen. El método de Otsu y el análisis del termograma no logran aislar la zona tubería. Los contornos se delimitan de forma uniforme, lo que se traduce como ausencia de fugas.

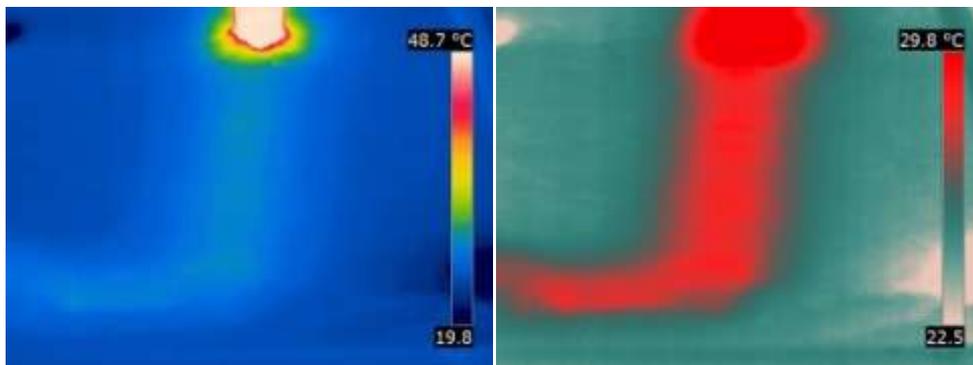


Figura 7.41 Imagen con END visual (paleta Greyred), ensayo ID: Mr-4



Figura 7.42 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mr-4



Figura 7.43 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mr-4

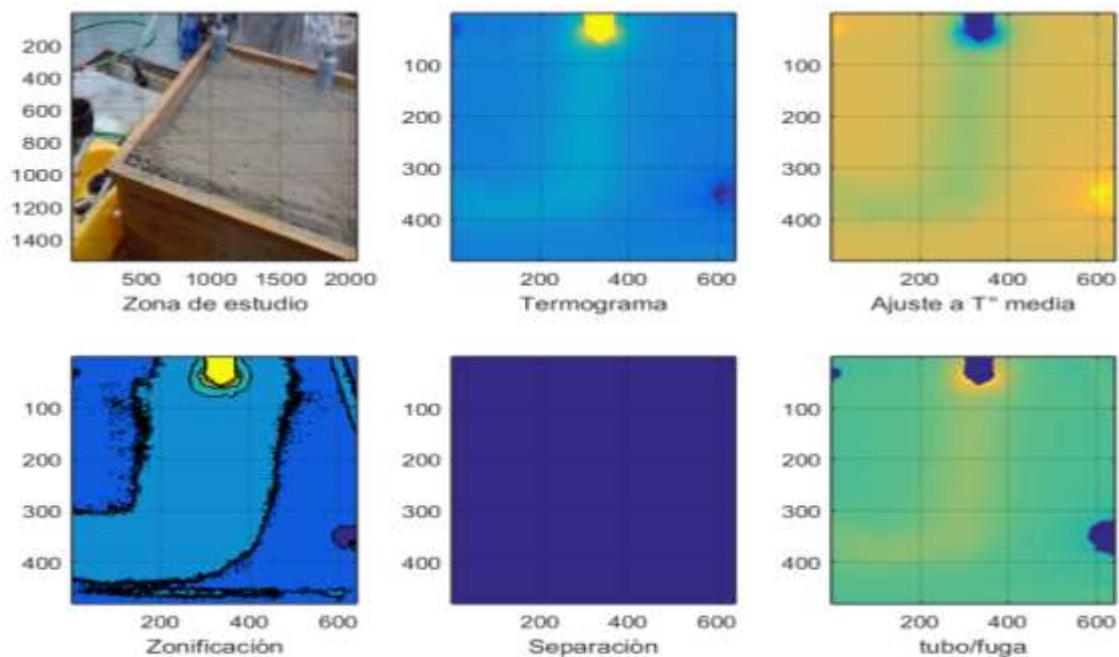


Figura 7.44 Resultados del procesamiento del termograma, ensayo ID: Mr-4

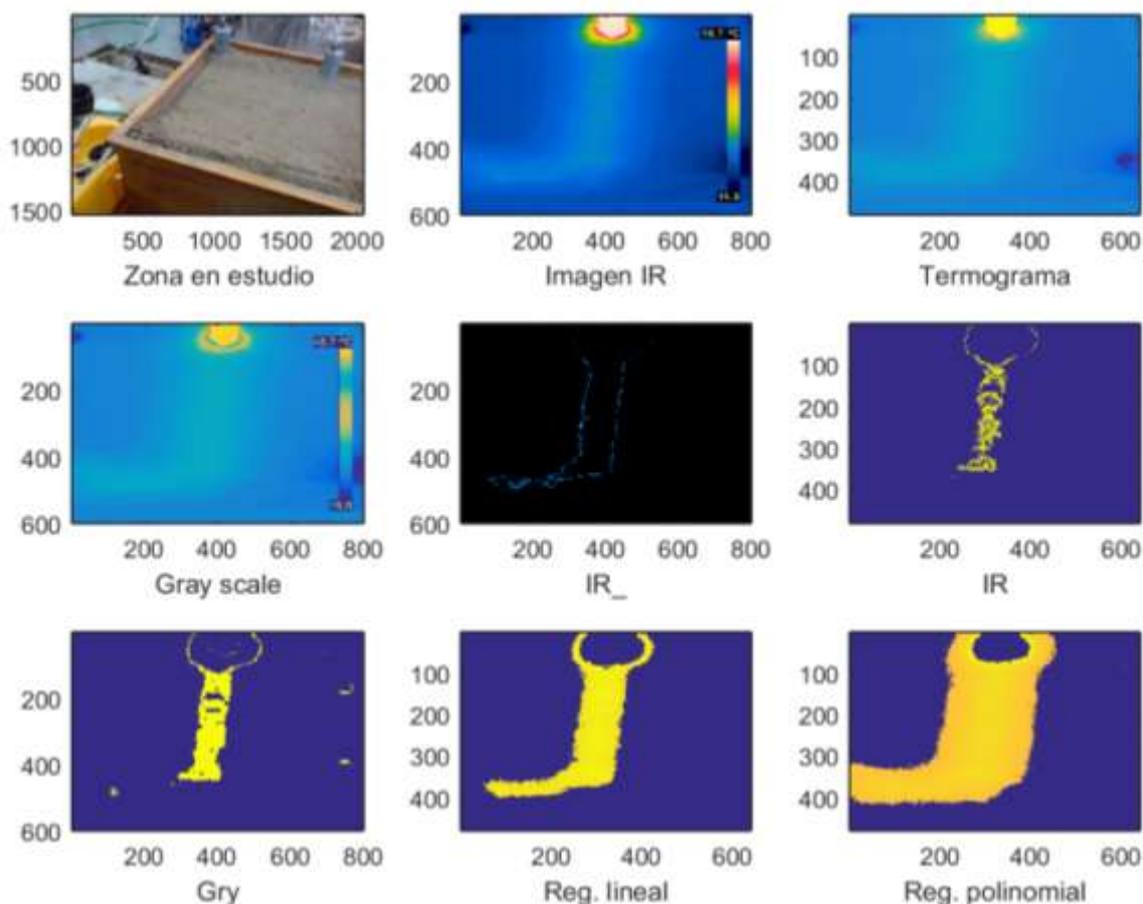


Figura 7.45 Resumen del procesamiento de las imágenes, ensayo ID: Mr-4

### 7.10. Ensayo ID: Mrf-1

Descripción: La toma de imágenes se realizó con el circuito trabajando con una fuga.

Fecha de toma: 23 de agosto de 2016; Verano.

Hora: 14:19 hrs.

Temperatura ambiente: 29°C.

Umbral: 23.

Figuras: 7.46, 7.47, 7.48, 7.49, 7.50.

Observaciones/diagnóstico: la inspección visual muestra la mancha desarrollada por la fuga. Los procesos no muestran diferencias relevantes. El método de Otsu no genera información relevante; las zonas no se aíslan de forma clara, dada la mínima variación de temperatura en la zona de la fuga (que es casi toda la imagen).

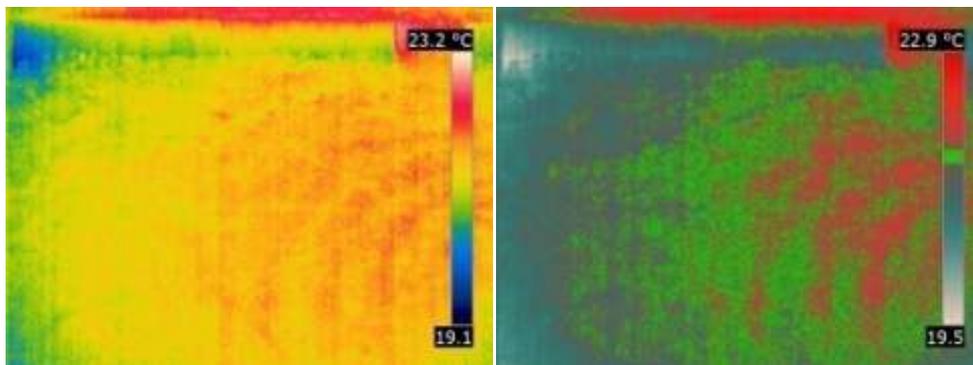


Figura 7.46 Imagen con END visual (paleta Greyred), ensayo ID: Mrf-1



Figura 7.47 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mrf-1



Figura 7.48 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mrf-1

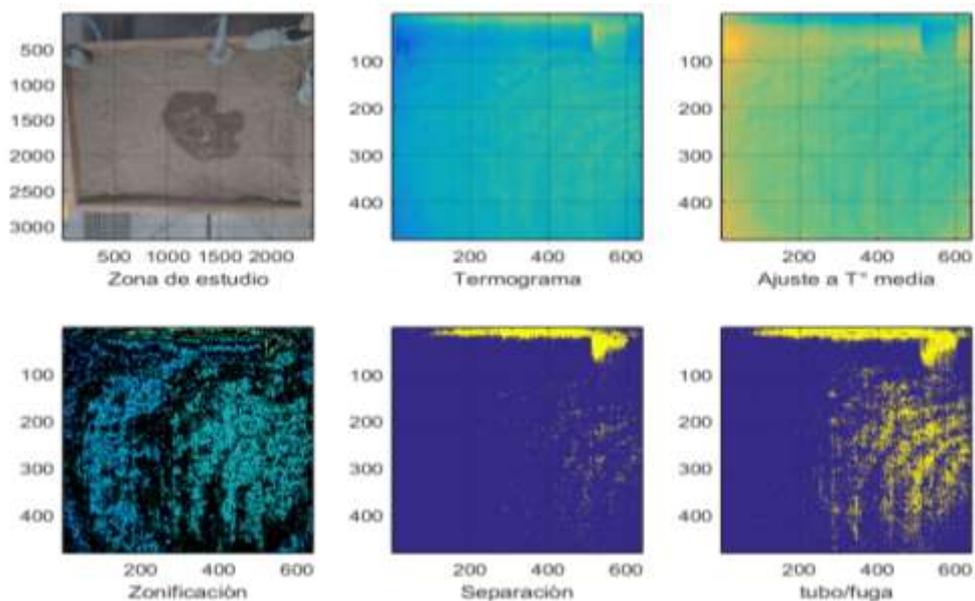


Figura 7.49 Resultados del procesamiento del termograma, ensayo ID: Mrf-1

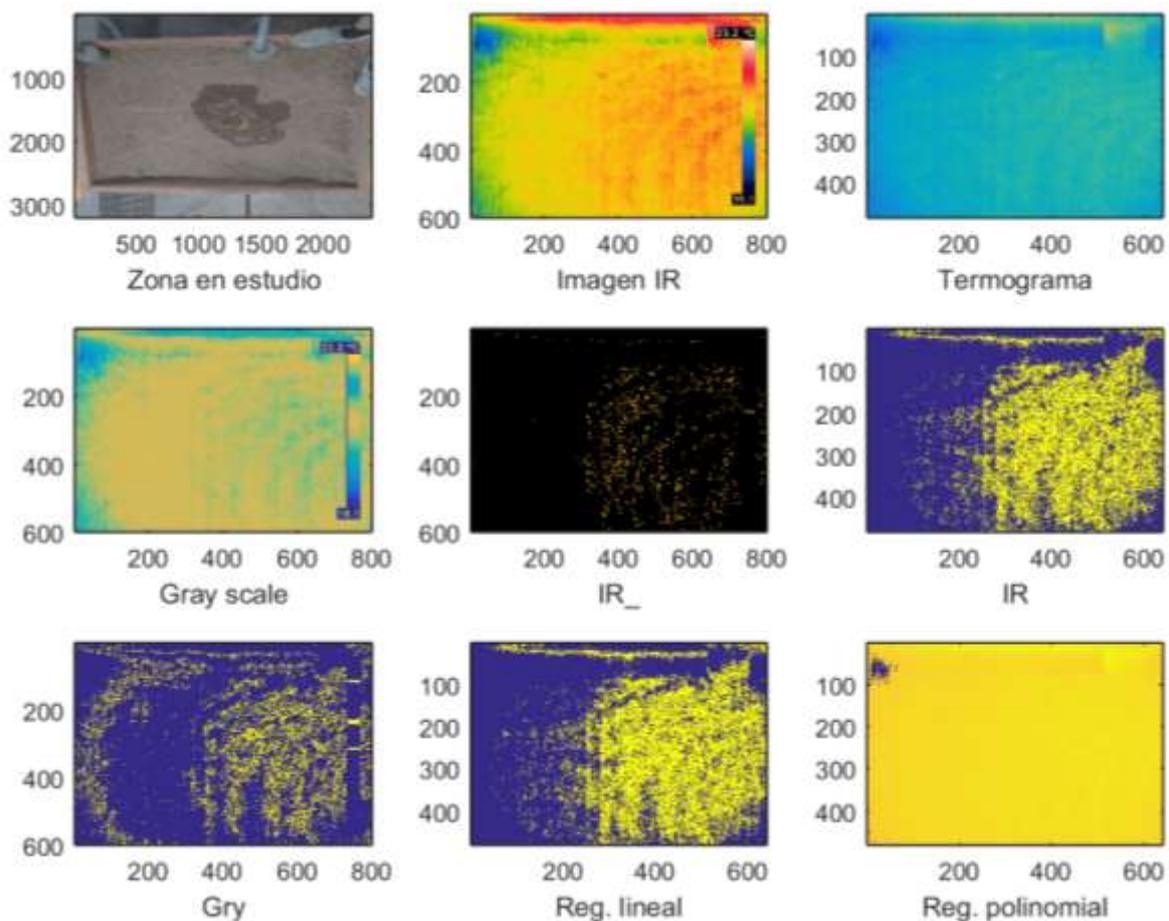


Figura 7.50 Resumen del procesamiento de las imágenes, ensayo ID: Mrf-1

### **7.11. Ensayo ID: Mrf-2**

Descripción: La toma de imágenes se realizó con el circuito trabajando con una fuga.

Fecha de toma: 10 de septiembre de 2016; Otoño.

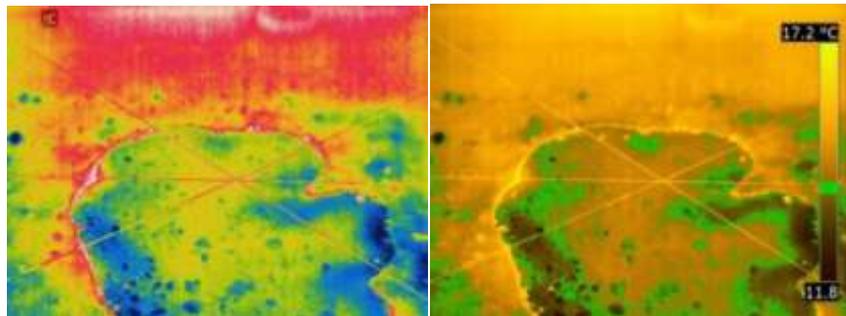
Hora: 11:55 hrs.

Temperatura ambiente: 27.2°C.

Umbral: 45.

Figuras: 7.51, 7.52, 7.53, 7.54, 7.55.

Observaciones/diagnóstico: la inspección visual muestra claramente el contorno de la fuga. La cámara tomó la imagen 10 segundos después de encender la bomba. No dio tiempo alguno a obtener información, ya que la fuga se desarrolló de manera inmediata mostrando los contornos propios del cambio de temperatura y la mancha en el material. Los procesos mostraron diferencias notorias; a pesar de ello el aislamiento de las zonas en estudio se aprecia de forma positiva.



**Figura 7.51 Imagen con END visual (paleta Yellow), ensayo ID: Mrf-2**



**Figura 7.52 Resultados de la segmentación Otsu's, ensayo ID: Mrf-2**



**Figura 7.53 Resultados de la segmentación por binarización, ensayo ID: Mrf-2**

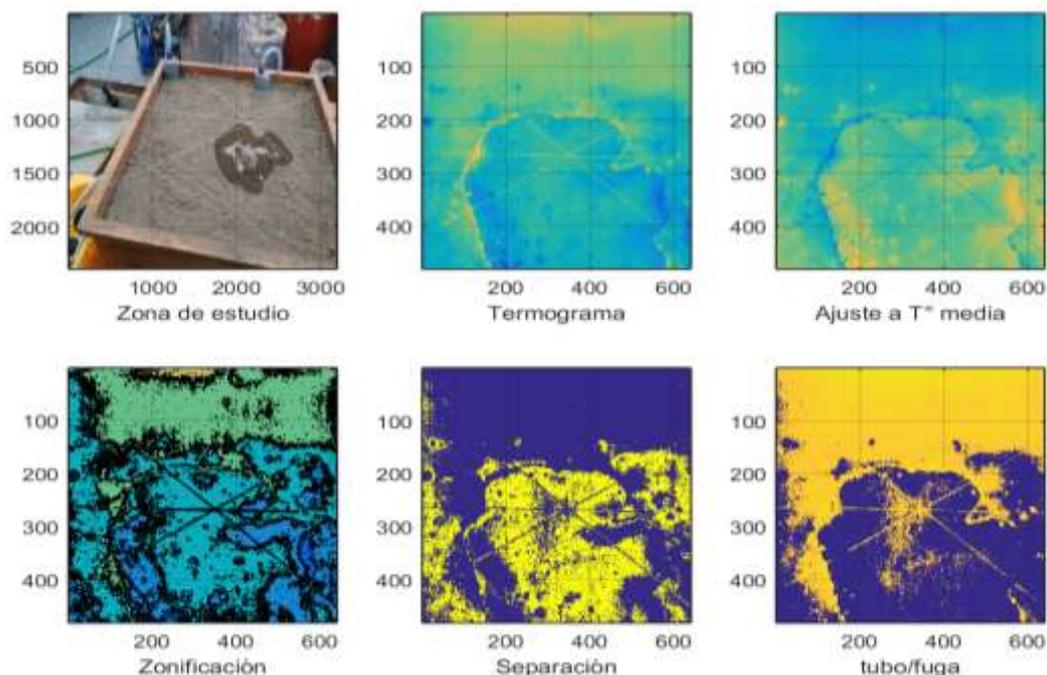


Figura 7.54 Resultados del procesado del termograma, ensayo ID: Mrf-2

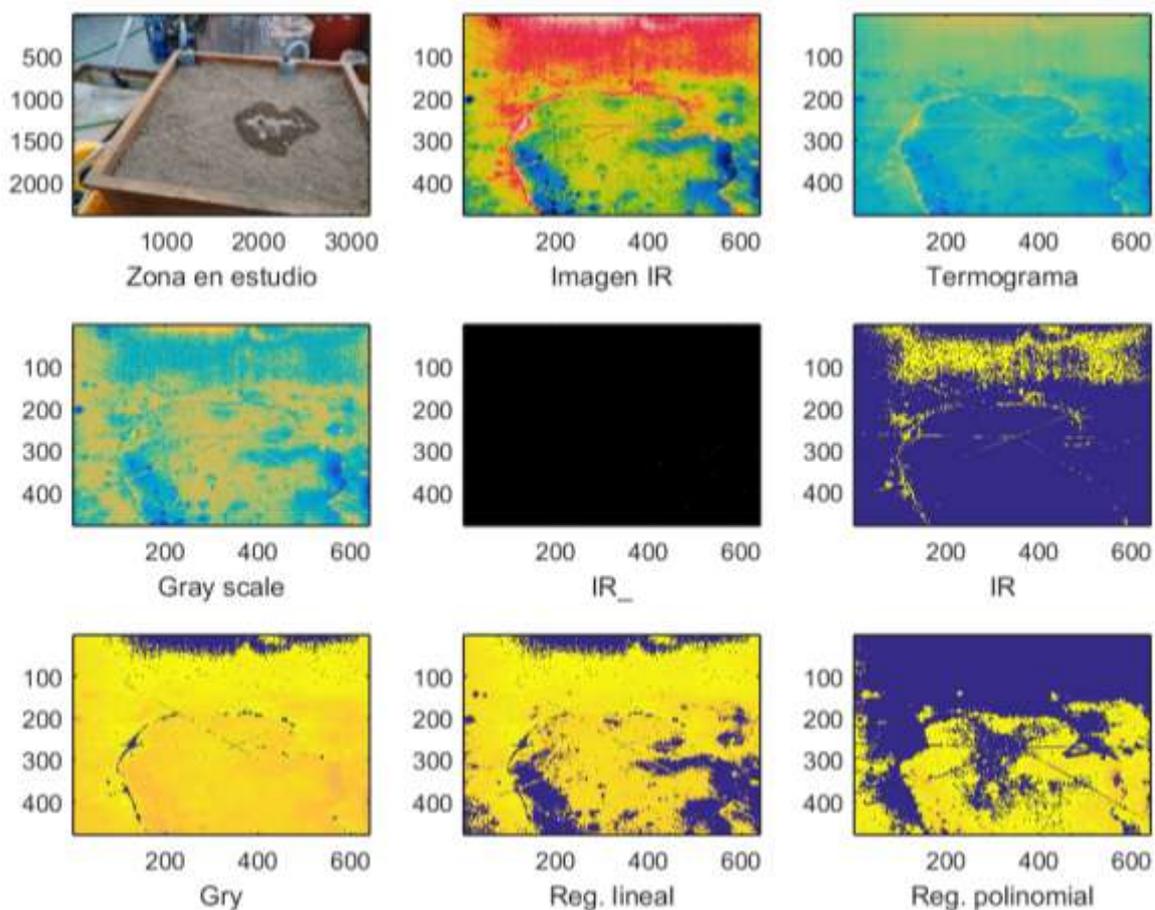


Figura 7.55 Resumen del procesado de las imágenes, ensayo ID: Mrf-2

### **7.12. Comentarios respecto al análisis de imágenes**

El análisis de las imágenes es subjetivo, con elementos que deben ser continuamente considerados: el enfoque, las variables a ingresar en la programación de la cámara, el ángulo de toma de las imágenes, la distancia de toma y la elección de la zona a estudiar. La toma de imágenes claras y bien orientadas es de suma importancia. Un equipo más eficiente y estructuras para colocar la cámara que permita hacer tomas de forma paralela a la zona de estudio, serían de utilidad.

En general, de la observación de los resultados se puede deducir que: a mayor temperatura ambiental, las imágenes se saturan y la visualización es más pobre. Así mismo, familiarizarse con la termografía aporta mejores resultados. Esto implica que el personal existente tome capacitación periódica y maneje regularmente la cámara. El uso en regiones con altas temperaturas como Andalucía en España o el norte de México, tendrían que ser estudiadas para conocer si la tecnología es factible. Es decir, dependerá mucho del lugar geográfico donde se pretenda usar la técnica. En una ciudad como Valencia, el uso de esta tecnología en verano resulta inadecuado. Tendría que usarse muy temprano o muy tarde, con temperaturas relativamente bajas, con horarios que quedan fuera de la jornada laboral.

De forma más particular, las condiciones poco variantes de las tomas en el modelo físico en un espacio cerrado como lo fue el laboratorio de hidráulica, posiblemente generaron una atmósfera más uniforme de temperatura, lo que podría reflejarse en las tomas con una transferencia de calor de que generaba menos cambios. Esto no permite aislar zonas de forma precisa sesgando los resultados que se esperaban.

### **7.13. Conclusiones**

En este apartado existen algunas conclusiones sobre el presente trabajo, que se refiere exclusivamente al desarrollo de éste y otras más generales, ya que la termografía es una herramienta que aún se encuentra en desarrollo, con un potencial de trabajo que se incrementa con el paso de los años; ésta seguirá teniendo funcionalidad como un medio de visión artificial en diferentes campos o para fines diferentes, desde los más sencillos como visión artificial nocturna, a más complejos como la aplicación de la termografía infrarroja aplicada a la detección de incendios en la interfaz urbano-forestal [48] (por citar un ejemplo).

Respecto al presente trabajo podemos concluir que la termografía es una herramienta polivalente que puede ser útil para los fines que perseguimos, más aún le quedan elementos por investigar para que tenga una fiabilidad del cien por ciento, por ello debe ser complementada con otras técnicas.

El uso de las variables ambientales, nos permitió aislar un fenómeno periódico e utilizarlo a favor en el análisis de las imágenes, he aquí que un elemento presente en nuestro día a día y del cual hace pocos años se integra una gran base de datos puede ser utilizado en nuestro beneficio. Su uso, simplifica los procesos agregando una variable "constante" en la medida de lo posible para determinar zonas en estudio de las imágenes IR.

La capacitación en termografía se torna importante ya que al trabajar con ella, el tener claro que es posible hacer y que no, permite que las direcciones de investigación sean más apegadas a la realidad. Las imágenes termográficas son elementos que aportan mucha información, ya sea la imagen por sí misma o bien los resultados del análisis de la misma donde la diferencia radica principalmente en el objetivo del uso de la imagen.

Las conclusiones más generales, pero no menos importantes están orientadas a la investigación en general. Es necesario e importante continuar trabajando con modelos de laboratorio que son la base de cualquier modelo computacional y que suelen presentar inconvenientes que en muchas ocasiones los modelos de ordenador no consideran. Esta realidad permite que se presenten problemas que no son siquiera considerados y que permiten tomar nuevos cursos en la investigación. Este tipo de investigación que podría ser más arcaica no deja de ser una base de importancia, este tipo de investigación requiere tiempo, paciencia y una ligera pero constante modificación de las variables. El apoyo de un experto en la materia es de utilidad para optimizar el tiempo de trabajo.

Sea cual sea el tema en investigación el uso de dos métodos diferentes ayuda por una parte a reforzar resultados y por otra a elaborar herramientas más robustas. El establecer protocolos elaborados y estructurados para el fin buscado con un objetivo claro, permite sacar mayor provecho a cada ensayo realizado, identificar los puntos de fallo y simplificar el proceso.

#### ***7.14. Línea de trabajo a desarrollar en un futuro***

El método tiene como una de sus bases las condiciones atmosféricas. Las variables atmosféricas son cíclicas; por ello, la base de datos se podrá ampliar y validar. Si la metodología se ajusta, en un futuro, se pueden considerar algunas de las siguientes líneas de trabajo.

Detección de fugas en drenaje. Las aguas servidas son de igual importancia que el agua potable. Sus fugas son menos frecuentes por no estar sometidas siempre a presión, pero peligrosas al tener la facultad de contaminar el terreno a su paso y los mantos acuíferos.

La identificación de defectos en pozos de extracción de agua y la utilidad de llevarlo a cabo.

Rectificación de líneas de agua ante una súbita disminución de agua (como lo podría ser una restricción) y revisar lo correspondiente a los planes de seguridad del agua.

Evaluación de infraestructura (en lo que a redes de distribución de agua se refiere) dañada por sismos, utilizando estas herramientas en la identificación.

El trabajo adicional sobre los clasificadores SVM, RVM para acotar/focalizar el área probable de las fugas se orientará a realizar estudios estadísticos adicionales con redes más grandes y diferentes escenarios defectuosos. Esto puede ser de ayuda, no solo para termografía, sino para cualquier otra herramienta que exija acotar una zona para acudir con la instrumentación adecuada.

## 8. Bibliografía

### 8.1. Artículos y consultas digitales

- [1] N. Unidas, “La situación demográfica en el mundo 2014,” 2014.
- [2] & J. J. G. Badruzzaman M., Cherchi C., Oppenheimer J., Bros C. M., “Optimization of Energy and Water Quality Management Systems for Drinking Water Utilities.”
- [3] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, “Infrared thermography for condition monitoring - A review,” *Infrared Physics and Technology*. 2013.
- [4] Constitución Española de 1978, “<http://www.congreso.es/consti/constitucion/indice/> [Consulta junio 2016].” .
- [5] U. Growth, I. Global, and W. Demand, “The United Nations World Water Development Report 2015 WATER FOR A SUSTAINABLE WORLD FACTS AND FIGURES,” 2015.
- [6] UNESCO, “El crecimiento insostenible y la creciente demanda mundial de agua,” 2015.
- [7] El diario de Ibiza, “<http://www.diariodeibiza.es/pitiuses-balears/2016/04/25/agua-tuberia-rota-abre-socavon/837615.html> [Consulta: Diciembre 2016],” *El diario de ibiza*, 2016. .
- [8] El Mundo, “<http://www.elmundo.es/madrid/2017/01/30/588f01eeca474184288b4604.html> [Consulta: Marzo 2017],” *El mundo*, 2017.
- [9] G. C. Holst, *COMMON SENSE APPROACH TO THERMAL IMAGING*. 2000.
- [10] E. P. Carreño-Alvarado, D. Ayala-Cabrera, R. Pérez-García, and J. Izquierdo, “Identification of Buried Pipes using Thermal Images and Data Mining.”
- [11] UPV Data, “<http://dataupv.webs.upv.es/datos-historicos-de-la-observacion-meteorologica-en-valencia/> [Última consulta Febrero de 2017],” *Univ. Politècnica Val.*, 2017.
- [12] D. L. Balageas, “Termografía Infrarroja : una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva ( END ),” 2007.
- [13] A. Atef, T. Zayed, A. Hawari, M. Khader, and O. Moselhi, “Multi-tier method using infrared photography and GPR to detect and locate water leaks,” *Automation in Construction*. 2016.
- [14] S. Dudić, I. Ignjatović, D. Šešlija, V. Blagojević, and M. Stojiljković, “Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography,” *Measurement*, vol. 45, no. 7, pp. 1689–1694, Aug. 2012.
- [15] R. K. Parida, V. Thyagarajan, and S. Menon, “A Thermal Imaging Based Wireless Sensor Network for Automatic Water Leakage Detection in Distribution Pipes,” pp. 1–6.
- [16] S. Montelpare and R. Ricci, “A thermographic method to evaluate the local boundary layer separation phenomena on aerodynamic bodies operating at low Reynolds number,” *Int. J. Therm. Sci.*, 2004.
- [17] E. E. N. Termograf, S. M. Revillas, G. Energ, and N. Ii, “La Termografía Infrarroja y el

- deporte de alto rendimiento,” 2012.
- [18] C. Santulli and R. La, “IR Thermography for the Detection of Buried Objects : A Short Review 1 . Introduction studied . A large number of scientific papers are available , a list of which , including considerations application-related factors , in particular the state of environ,” 2003.
- [19] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, “Infrared thermography for condition monitoring – A review,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 60, pp. 35–55, Sep. 2013.
- [20] W. Swiderski, P. Hlosta, and M. Miszczak, “IR Thermography methods in detection of buried mines.”
- [21] K. Duzinkiewicz, A. Borowa, K. Mazur, M. Grochowski, M. A. Brdys, and K. Jezior, “Leakage Detection and Localisation in Drinking Water Distribution Networks by MultiRegional PCA,” *Stud. Informatics Control*, vol. 17, no. 2, pp. 135–152, 2008.
- [22] F. J. Arregui and M. Carlos, “Burst Detection in Water Networks Using Principal Component Analysis,” no. February, pp. 47–54, 2012.
- [23] A. Nowicki, M. Grochowski, and K. Duzinkiewicz, “Data-driven models for fault detection using kernel PCA: A water distribution system case study,” *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 22, no. 4, pp. 939–949, 2012.
- [24] M. Qui, C. Verde, and A. Prieto-moreno, “Leaks ’ detection in water distribution networks with demand patterns,” pp. 307–312, 2016.
- [25] T. G. Mamo, “Virtual DMA Municipal Water Supply Pipeline Leak Detection and Classification Using Advance Pattern Recognizer Multi-Class SVM,” vol. 1, pp. 25–42, 2014.
- [26] Q. Zhang, Z. Y. Wu, M. Zhao, and J. Qi, “Leakage Zone Identification in Large-Scale Water Distribution Systems Using Multiclass Support Vector Machines,” vol. 142, no. 11, pp. 1–15, 2010.
- [27] J. Izquierdo, P. A. López, F. J. Martínez, and R. Pérez, “Fault detection in water supply systems using hybrid (theory and data-driven) modelling,” *Math. Comput. Model.*, vol. 46, no. 3–4, pp. 341–350, 2007.
- [28] D. Ayala-Cabrera, E. Campbell, E. P. Carreno-Alvarado, J. Izquierdo, and R. P??rez-Garc??a, “Water leakage evolution based On GPR interpretations,” in *Procedia Engineering*, 2014.
- [29] H. V. H. Ayala, F. M. Dos Santos, V. C. Mariani, and L. D. S. Coelho, “Image thresholding segmentation based on a novel beta differential evolution approach,” *Expert Syst. Appl.*, 2015.
- [30] C. A. Cattaneo, L. I. Larcher, A. I. Ruggeri, A. C. Herrera, and E. M. BIASONI, “MÉTODOS DE UMBRALIZACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES BASADOS EN ENTROPIA DE SHANNON Y OTROS,” pp. 2785–2805, 2011.
- [31] O. Fujiwara and D. B. Khang, “A two??phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks,” *Water Resour. Res.*, vol. 26, no. 4, pp. 539–549,

- 1990.
- [32] University of Exeter, “Download resources; University website. <http://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/cws/>,” *University of Exeter*, 2016. .
- [33] I. Montalvo, J. Izquierdo, R. Pérez, and M. M. Tung, “Particle Swarm Optimization applied to the design of water supply systems,” *Comput. Math. with Appl.*, vol. 56, no. 3, pp. 769–776, 2008.
- [34] I. Montalvo, J. Izquierdo, R. Pérez, and P. L. Iglesias, “A diversity-enriched variant of discrete PSO applied to the design of water distribution networks,” *Eng. Optim.*, vol. 40, no. 7, pp. 655–668, 2008.
- [35] I. Montalvo, J. Izquierdo, R. Pérez-García, and M. Herrera, “Improved Performance of PSO with Self-adaptive Parameters for Computing the optimal design of Water Supply Systems,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 23, no. 5, pp. 727–735, 2010.
- [36] H. P. Gomes, S. De Tarso, M. Bezerra, P. Sergio, and O. De Carvalho, “Optimal dimensioning model of water distribution systems,” vol. 35, no. 4, pp. 421–432, 2009.
- [37] Q. Xu, R. Liu, Q. Chen, and R. Li, “Review on water leakage control in distribution networks and the associated environmental benefits,” *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 26, no. 5, pp. 955–961, 2014.
- [38] B. Coelho and A. Andrade-Campos, “Efficiency achievement in water supply systems - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, no. February 2014, pp. 59–84, 2014.
- [39] A. Dolatshahi-Zand and K. Khalili-Damghani, “Design of SCADA water resource management control center by a bi-objective redundancy allocation problem and particle swarm optimization,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 133, pp. 11–21, 2015.
- [40] O. Alejo and L. Humberto, “EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE SECTORIZACIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE.”
- [41] J. Morrison, S. Tooms, and D. Rogers, “District Metered Areas: Guidance Notes,” *Int. Water Assoc. Water Loss Task.*, p. 100, 2007.
- [42] V. Tzatchkov, V. H. Alcocer, and V. Bourguett, “Sectorización de redes de distribución de agua potable a través de algoritmos basados en la teoría de grafos,” *Tlaloc-AMH*, vol. 40, pp. 14–22, 2008.
- [43] A. M. Herrera Fernández, “Improving water network management by efficient division into supply clusters,” no. JULY 2011, p. 248, 2011.
- [44] J. Izquierdo, M. Herrera, I. Montalvo, and R. Pérez-García, “Division of Water Supply Systems into District Metered Areas Using a Multi-agent Based Approach,” in *Software and Data Technologies: 4th International Conference, ICSOFT 2009, Sofia, Bulgaria, July 26-29, 2009. Revised Selected Papers*, J. Cordeiro, A. Ranchordas, and B. Shishkov, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 167–180.
- [45] E. Campbell, J. Izquierdo, I. Montalvo, A. Ilaya-Ayza, R. Pérez-García, and M. Tavera, “A flexible methodology to sectorize water supply networks based on social network theory concepts and multi-objective optimization,” *J. Hydroinformatics*, Aug. 2015.

- [46] B. M. Brentan, E. Campbell, G. L. Meirelles, E. L. Jr, and J. Izquierdo, “Social Network Community Detection for DMA Creation: Criteria Analysis through Multilevel Optimization,” vol. 2017, 2017.
- [47] E. Campbell, J. Izquierdo, I. Montalvo, and R. Pérez-García, “A Novel Water Supply Network Sectorization Methodology Based on a Complete Economic Analysis, Including Uncertainties,” *Water*, vol. 8, no. 179, pp. 1–19, 2016.
- [48] D. R. Metola, F. Martínez, and A. Valencia, “Departamento De Ingeniería Hidráulica Y Medio Ambiente,” 2009.
- [49] MoChen. Bayesian Compressive Sensing (sparse coding) and Relevance Vector Machine. Available at <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/55879>.

## **8.2. Sobre producción propia**

- Ayala-Cabrera, D., Campbell, E., Carreño-Alvarado, E.P., Izquierdo, J., Pérez-García, R., [Water Leakage Evolution Based on GPR Interpretations](#). *Procedia Engineering*, 89, 304–310, 2014
- Carreño-Alvarado, E.P., Ayala-Cabrera, D., Pérez-García, R., Izquierdo, J., [Identification of Buried Pipes Using Thermal Images and Data Mining](#). *Procedia Engineering*, 89, 1445–1451, 2014
- Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Carreño-Alvarado, E. P., Ocaña-Levario, S. J., Campbell, E. Multi-agent and clustering in data analysis of GPR images. Ch. 23 in: J.C. Cortés, L. Jódar Sánchez and R.J. Villanueva (eds.), [Mathematical Modeling in Engineering & Social Sciences](#), Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, 2014, pp. 241-251.
- Ayala-Cabrera, D., Carreño-Alvarado, E. P., Izquierdo, J., Pérez-García, R. Visualización de la evolución de fugas de agua en tuberías plásticas mediante imágenes de georadar . XXV Congreso latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, agosto 2014.
- Carreño-Alvarado, E. P., Ayala-Cabrera, D., Pérez-García, R., Izquierdo, J. Identificación de tuberías enterradas mediante termografía. XXV Congreso latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, agosto 2014.
- Ayala-Cabrera, D., Carreño-Alvarado, E.P., Izquierdo, J., Pérez-García, R. Improving Water Supply System Component Visualization into GPR Images . 2nd Annual International Forum on Water. Athens, Greece, 14-17 July 2014.
- Ayala-Cabrera, D., Campbell, E., Carreño-Alvarado, E.P., Izquierdo, J., Pérez-García, R. Water leakage evolution based on GPR interpretations. 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014. Bari, Italy.

- Carreño-Alvarado, E.P., Ayala-Cabrera, D., Pérez-García, R., Izquierdo, J. Identification of buried pipes using thermal images and data mining. 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014. Bari, Italy.

### **8.3.Libros**

- M. Mollmann, K.; Vollmer, Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, no. 1. 2014.
- W. Minkina and S. Dudzik, Infrared Thermography, Errors and Uncertainties. 2009.
- G. C. Holst, Common sense approach to thermal imaging. 2000.
- T. Astarita and G. M. Carlomango, Infrared Thermography for Thermo-Fluid-Dynamics, vol. 1. 2015.
- J. Živčák, R. Hudák, L. Madarász, and I. J. Rudas, Methodology, Models and Algorithms in Thermographic Diagnostics, vol. 5. 2013.
- J. Han and M. Kamber, Data Mining: Concepts and Techniques, vol. 12. 2011.
- Z. Yin and R. Collins, Augmented Vision Perception in Infrared. 2009.



## **ANEXOS**



# FLIR SC620/FLIR SC660

Las novedosas cámaras FLIR SC620 y FLIR SC660 se han concebido para especialistas en I+D exigentes.



Cuentan con la mayor sensibilidad y la serie de funciones más modernas disponibles. Brindan una combinación de imágenes del espectro visible e infrarrojo de calidad superior y precisión en la medición de temperatura, además de GPS, comentarios de voz y otras numerosas funciones avanzadas.



## Resolución de 640x480 píxeles

Las FLIR SC620 y SC660 tienen un detector de alta resolución, de 640 x 480 píxeles, que permite contar con una mayor precisión y observar más detalles a mayor distancia.



## Alta sensibilidad (FLIR SC660)

Una sensibilidad térmica < 30 mK permite captar los detalles más sutiles de la imagen y las diferencias de temperatura más pequeñas.



## Cámara visual de alta calidad

Una cámara visual integrada de 3,2 megapíxeles genera imágenes visuales nítidas en todas las condiciones.



## Optimizador de contraste (FLIR SC660)

La optimización automática de los ajustes de brillo y contrataste facilita los análisis térmicos de objetos detallados.



## Función panorámica

Obtiene una secuencia de imágenes y las combina automáticamente en una imagen más grande con el software FLIR Reporter o FLIR BuildIR.



## Captación de vídeo multifunción

La pantalla ancha LCD de 5,6" de la SC660 permite la visualización de imágenes en la cámara. Su interfaz FireWire puede transferir 14 bits de datos radiométricos o RAW directamente a un PC para analizar en tiempo real las imágenes captadas. Además, pueden almacenarse las secuencias radiométricas en tarjetas SD de gran capacidad. Las secuencias de vídeo MPEG-4 no radiométricas también pueden transmitirse a un PC por USB, FireWire o WLAN (opcional).



## GPS incorporado (SC660)

El GPS permite localizar geográficamente las imágenes infrarrojas mediante su referencia geográfica.

## Puntero láser

Ayuda a asociar el punto caliente o frío de la imagen IR con el objetivo físico real situado en el área inspeccionada.



## Fusión térmica FLIR

Fusiona las imágenes visuales e infrarrojas para ofrecer un mejor análisis.



## Función imagen en imagen

Superpone una imagen infrarroja a la imagen visual. Ajustable, móvil y redimensionable (según el modelo).



## Galería de imágenes en miniatura

Una galería de imágenes en miniatura de fácil acceso le ayuda a repasar y encontrar rápidamente sus imágenes infrarrojas.



## JPEG radiométrico

FLIR emplea un formato de imagen JPEG radiométrico no patentado que permite el procesamiento posterior y la escritura de informes con un software de FLIR asistido por Microsoft Word®.



## Comentarios de texto y de voz

Pueden cargarse comentarios de texto en la cámara mediante una interfaz IrDA inalámbrica. A su vez, es posible conectar unos auriculares para grabar comentarios de voz.



## Enfoque automático y manual, zoom digital

Las posibilidades de enfoque son: enfoque automático de un solo toque, enfoque automático continuo, basado en láser (modelos 660) o enfoque manual. Zoom digital 1-2x continuo (SC620), 1-8x continuo (SC660).



## Gran pantalla LCD

Una pantalla LCD extraordinariamente amplia, de 5,6", plegable y de alta calidad permite ver los detalles más sutiles de la imagen y las diferencias de temperatura más pequeñas.



## Asa triángulo con botones de acceso directo integrados

Un asa de control giratoria permite emplear la cámara en la posición que resulte más cómoda. Los botones y la unidad joystick de control de la cámara están integrados al asa y se encuentran siempre al alcance de los dedos.

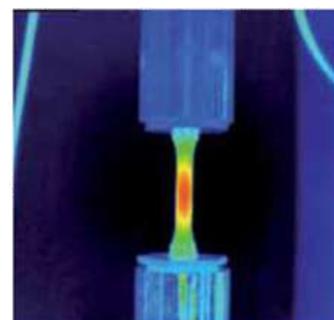
## Optimizador de contraste



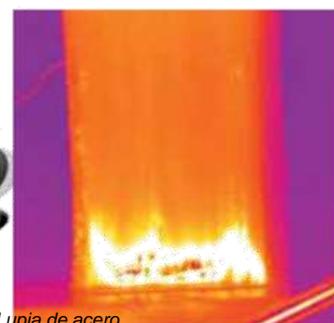
Imagen térmica básica.



Imagen térmica mejorada con la función Optimizador de contraste.



Análisis de estrés



Lupia de acero

### FLIR SC620

Sensibilidad <40 mK, precisión +/- 2% de la lectura

Lente estándar de 24°

Zoom digital 2x

Funciones de medición estándar

Puntero láser

USB, FireWire, de vídeo compuesto, IrDA y de conexión de auricular

### FLIR SC660

Sensibilidad <30 mK, precisión +/- 1% de la lectura para un intervalo de temperatura limitada

Amplia gama de lentes

Zoom digital 8x

Funciones de medición ampliadas

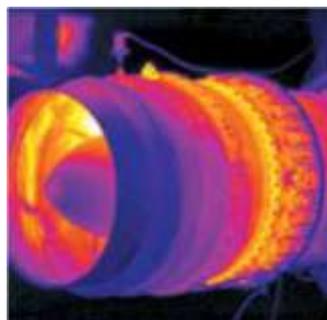
Puntero láser avanzado Poner alarmas de temperatura

USB, FireWire, de vídeo compuesto, IrDA y de conexión de auricular

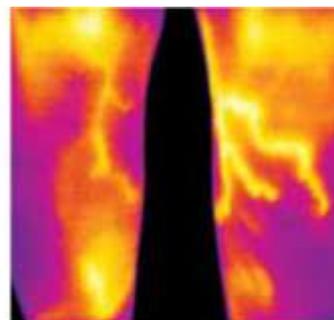
Grabación de secuencias en la cámara

GPS incorporado

Optimizador de contraste



Análisis transitorio rápido



Cartografía venosa

# FLIR SC620/FLIR SC660

## Especificaciones técnicas

### Específicas de la cámara



	FLIR SC620	FLIR SC660
<b>Imagen térmica</b>		
Campo visual (FOV) / distancia focal mínima	24° x 18° / 0,3 m	24° x 18° / 0,3 m 12° x 9° / 1,2 m 45° x 34° / 0,2 m Debe especificarse la lente al hacer el pedido
Resolución espacial	0,65 mrad para lente de 24°	0,65 mrad para lente de 24° 0,33 mrad para lente de 12° 1,3 mrad para lente de 45°
Sensibilidad térmica	40 mK a 30°C	30 mK a 30°C
Zoom electrónico	1-2x continuo incluida la función panorámica	1-8x continuo incluida la función panorámica
Enfoque eléctrico y manual con tecnología USM	Automático y manual	Automático (sigue la zona iluminada por el láser) y manual
<b>Presentación de la imagen</b>		
Optimización automática del contraste	N/A	DDE ajustable
Fusión térmica	Se muestra la imagen IR superior, inferior o comprendida en un intervalo de temperatura en la imagen visual (solo con lentes de 24°)	Se muestra la imagen IR superior, inferior o comprendida en un intervalo de temperatura en la imagen visual (solo con lentes de 24°)
Función imagen en imagen	Area IR redimensionable y móvil sobre la imagen visual (solo con lentes de 24°)	Area IR redimensionable y móvil sobre la imagen visual (solo con lentes de 24°)
<b>Medición</b>		
Precisión	±2 °C o ±2% de lectura	± 1°C o ± 1% de lectura (intervalo restringido) ± 2°C o ± 2% de lectura
<b>Análisis de medición</b>		
Punto	3	10
Área	3 recuadros o círculos con máx./mín./media	5 recuadros o círculos con máx./mín./media
Alarma de función de medición	N/A	Alarmas sonora o visual (superior/inferior) en cualquier función de medición seleccionada
Gráfico	N/A	1 línea horizontal o vertical que se desplaza en tiempo real
<b>Almacenamiento de imágenes</b>		
Almacenamiento en la cámara	N/A	Memoria RAM interna para la grabación secuencias
<b>Punero láser</b>		
Alineación láser	N/A	La posición se indica automáticamente sobre la imagen IR
Modo láser	N/A	Enfoque automático / nivel / punto de medida
<b>Grabación de vídeo</b>		
Grabación de vídeo IR radiométrico	N/A	En tiempo real a memoria RAM interna, transferible a una tarjeta de memoria
Grabación de vídeo IR no radiométrico	N/A	MPEG-4 a tarjeta de memoria
<b>Sistema de información geográfica</b>		
GPS incorporado	N/A	Los datos de localización se añaden de manera automática a cada imagen para referenciarla en los mapas WEB

## General

<b>Imagen térmica</b>	
Resolución IR	640 x 480 píxeles
Rango espectral	7,5 - 13 $\mu\text{m}$
Frecuencia de imagen	30 Hz
Enfoque	Automático o manual
Matriz de plano focal (FPA)	Microbolómetro sin refrigerar
<b>Presentación de la imagen</b>	
Pantalla	Gran pantalla LCD de 5,6" de color incorporada, de 1.024 x 600 píxeles
Visor	LCD incorporada, inclinable, de 800 x 600 píxeles
Ajustes automáticos de la imagen	Continuo/manual; lineal o basado en histograma
Ajustes manuales de la imagen	Nivel/intervalo/máx./mín.
Modos de imagen	Imagen IR, imagen visual, galería de imágenes en miniatura, fusión térmica, imagen en imagen
Imagen de referencia	Mostrada junto con la imagen IR en tiempo real
<b>Medición</b>	
Intervalo de temperaturas	SC620: -40°C a +500°C (opcional hasta +2.000°C) SC660: -40°C a +1.500°C (opcional hasta +2.000°C)
<b>Análisis de medición</b>	
Isoterma	2, superior, inferior, intervalo
Diferencia de temperatura	Variación de temperatura entre funciones de medición o con respecto a la temperatura de referencia
Detección automática de caliente/frío	Valor de temp. máx./mín. y posición se muestra dentro de un recuadro, un círculo o sobre una línea.
Temperatura de referencia	Establecida manualmente o tomada de alguna función de medición
Corrección de emisividad	Variable de 0,01 a 1,0 o a seleccionar de una lista de materiales
Correcciones de mediciones	Temperatura reflejada, transmisión óptica, transmisión atmosférica y óptica externa
Corrección externa de ópticas/ventanas	Automática, basada en los datos recibidos de transmisión y temperatura de la óptica/ventana IR
<b>Configuración</b>	
Controles de configuración	Adaptación local de unidades, idioma y formatos de fecha y hora.
Botones programables	2
<b>Almacenamiento de imágenes</b>	
Tipo	Tarjeta de memoria SD
Formato	JPEG estándar, con datos de medición incluidos
Modos	Imágenes IR/visuales, almacenamiento simultáneo de imágenes IR y visuales; la imagen visual se asocia automáticamente a la imagen IR correspondiente
Almacenamiento periódico de imágenes	Cada 10 segundos hasta 24 horas
Panorámica	Para crear imágenes panorámicas con el software FLIR BuildIR
<b>Comentarios en la imagen</b>	
Voz	60 segundos almacenados con la imagen
Texto	Almacena junto con la imagen un texto predefinido o un texto libre que proviene de PDA (por IrDA)
Marcador de imagen	4 sobre la imagen IR o visual
<b>Cámara digital</b>	
Cámara digital incorporada	Autoenfoco de 3,2 megapíxeles con lámpara de vídeo
<b>Puntero láser</b>	
Láser	Láser semiconductor de diodos AlGaInP, clase 2
<b>Sistema de alimentación</b>	
Tipo de batería	Batería recargable de ión litio
Duración de la batería	3 horas a 25 °C
Sistema de recarga	En la cámara, adaptador de CA, cargador de batería de 2 compartimentos o de 12 V desde un vehículo
Administración de la alimentación	Apagado automático y modo en espera (a elección del usuario)
Sistema de CA	Adaptador de CA, 100-240 V CA, 50/60 Hz
Tensión del adaptador	Salida de 12 VCC
<b>Información ambiental</b>	
Intervalo de temperaturas de trabajo	-15 °C a +50 °C
Intervalo de temperaturas de almacenamiento	-40 °C a +70 °C
Humedad (funcionamiento y almacenamiento)	IEC 68-2-30/24 h, humedad relativa del 95%, de +25 °C a +40 °C
Golpes	25 g (IEC 60068-2-29)
Vibración	2 g (IEC 60068-2-6)
Protección	IP 54 (IEC 60529)
<b>Interfaces</b>	
USB-A	Conectar dispositivo externo USB (copiar a lápiz de memoria)
USB-Mini-B	Intercambio de datos con un PC / transmisión de vídeo (streaming) MPEG-4
Vídeo compuesto	PAL o NTSC
IrDA	Para enviar archivos con comentarios de texto desde PDA a la cámara,
WLAN	Opcional
Conexión por auriculares	Sí

## General

### Características físicas

Peso de la cámara, con batería	1,9 kg
Tamaño de la cámara (L x Ø x H)	282 x 144 x 147 mm
Tamaño de transporte	520 x 400 x 200 mm
Peso de transporte	8,2 kg

### Suministro estándar

FLIR SC620 y FLIR SC660: Maletín de transporte rígido, cámara infrarroja con lente, batería (2 cada una, una insertada en la cámara y otra fuera de la cámara), cargador de batería, certificado de calibración, CD-ROM con software QuickReport de FLIR™ para PC, cable FireWire, 4/6 (FLIR SC620 y FLIR SC660), cable FireWire, 6/6 (FLIR SC620 y FLIR SC660), auriculares, tapa para lente (colocada sobre la lente), tapa para lente (2 cada una), cable de conexión a la red eléctrica, adaptador de tarjeta de memoria a USB, tarjeta de memoria con adaptador, fuente de alimentación, Guía de instrucciones impresa, correa para colgar del hombro, cable USB, CD-ROM de documentación para el usuario, cable de vídeo, tarjeta de extensión de garantía o tarjeta de registro



## *ANEXO II. Red de Hanoi*

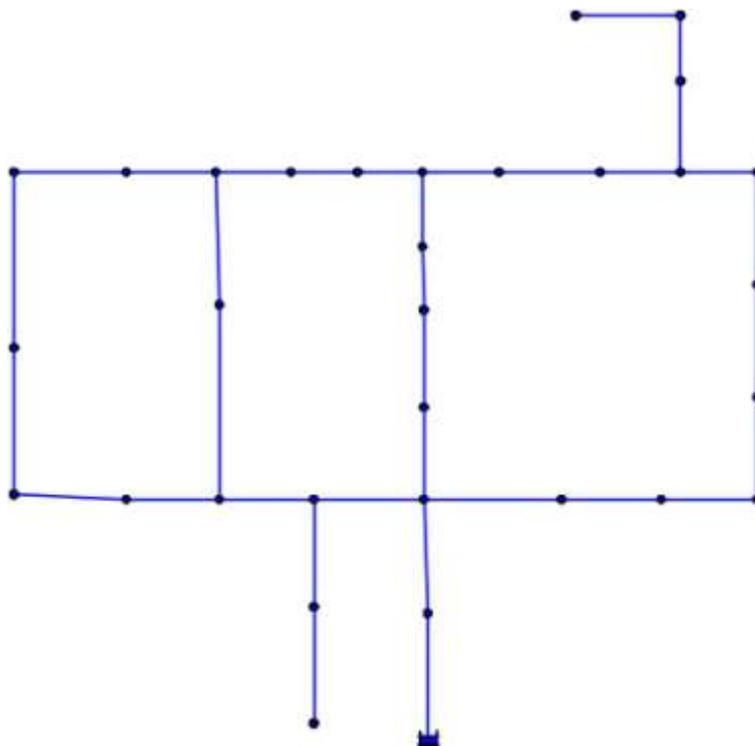
### ***SYSTEM ID: Hanoi System***

---

#### **NARRATIVE DESCRIPTION**

The Hanoi system was first presented by Fujiwara and Khang (1990) and is based on the planned trunk network of Hanoi, Vietnam. There are 34 pipes to be sized with a total length of 38.61 km. Possible new pipe sizes range between 12 and 40 inches and the total system demand is 126.5 MGD.

#### **NETWORK SCHEMATIC:**



#### **HISTORY OF THE NETWORK FILE**

The Network was first optimized by Fujiwara and Khang (1990) using a two phase non-linear programming method. It has subsequently been used as a case study for a number of optimization techniques including genetic algorithms (Savic and Walters, 1997; Marchi et al, 2014), simulated annealing (Cunha and Sousa, 1999), the shuffled frog-leaping algorithm (Eusuff and Lansey, 2003), ant colony optimization (Zecchin et al, 2005), harmony search (Geem, 2006) and differential evolution (Vasan and Simonovich, 2010). A more complete summary of studies aimed at optimizing this network is given by De Corte and Sorensen (2013).

**AVAILABLE INFORMATION**

Physical attributes	Yes
Schematic diagram	Yes
Network geometry data	Yes
GIS data file	No
Background map	No
Elevation data	Yes
Pipe data	Yes
<i>Pipe material</i>	No
<i>Pipe age</i>	No
<i>Pipe pressure class</i>	No
<i>Nominal or actual diameters</i>	Actual
Pump data	N.A.
<i>Useful horsepower</i>	
<i>Pump operating curves</i>	
Tank data	N.A.
<i>Elevation data</i>	
<i>Stage storage curves</i>	
<i>Water quality information</i>	
Valve data	N.A.
<i>PRV/FCV data</i>	
<i>Isolation valve data</i>	
<i>Hydrant data</i>	
Demand data	Yes
<i>Total system demand</i>	Yes
<i>Nodal demand data</i>	Yes
<i>Temporal data demands</i>	No
<i>System leakage</i>	No
Hydraulic data	Yes
<i>Hydraulically calibrated model</i>	
<i>Field hydraulic calibration data</i>	
Water quality data	No
<i>Disinfection method</i>	No
<i>Chlorine residual data</i>	No
<i>Booster station data</i>	No
<i>Fluoride/Chloride field data</i>	No
<i>Water quality calibrated model</i>	No
Operational data	No
<i>SCADA datasets</i>	No
<i>Operational rules</i>	No

**REFERENCES:**

- Cunha, M., Sousa, J., 1999. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach. *J. of Water Resources Plan. and Man.*, 125 (4).
- De Corte, A. and Sorensen, K. (2013) Optimisation of gravity-fed water distribution network design: A critical review, *European Journal of Operational Research*, 228, 1 - 10.
- Eusuff, M.M., Lansey, K.E., 2003. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *J. of Water Resources Plan. and Man.*, 129 (3).
- Fujiwara, O. and Khang, D.B. (1990), A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks, *Water Resour. Res.*, 26(4), 539-549.
- Geem, Z.W., 2006. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. *Engineering Optimization* 38 (3), 259–280.
- Marchi, A, Dandy, G., Wilkins, A and Rohrlach, H (2014) A methodology for comparing evolutionary algorithms for the optimization of water distribution systems, *J. of Water Resources Plan. and Man.* 140 (1), 22-31.
- Savic, D., Walters, G., 1997. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *J. of Water Resources Plan. and Man.*, 123 (2), 67–77.
- Vasan, A., Simonovic, S.P., 2010. Optimization of water distribution network design using differential evolution. *J. of Water Resources Plan. And Man. ASCE*, 136 (2), 279–287.
- Zecchin, A.C., Simpson, A.R., Maier, H.R., Nixon, J.B., 2005. Parametric study for an ant algorithm applied to water distribution system optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 9 (2), 175–191.

**DETAILED DATA SUMMARIES**

**PHYSICAL ASSETS:**

<b>Asset Type:</b>	<b># of Assets</b>
Master Meters	0
Tanks	0
Pumps	0
Pump Stations	0
Water Treatment Plants	0

**NETWORK CHARACTERISTICS:**

# Total Pipes:	34
# Branch Pipes:	7
Ratio (Branch Pipes / Total Pipes):	0.21
# Nodes	31
# Reservoirs	1
# Tanks	0
# Regulating Valves	Unknown
# Isolation Values	Unknown
# Hydrants	Unknown
Elevation Data	YES

**PIPE DATA:**

<b>Diameter (in)</b>	<b>Length (ft)</b>
12	To be determined
16	To be determined
24	To be determined
30	To be determined
40	To be determined

**PUMP DATA:**

Pump Horsepower	NO
Pump Curves:	NO

**DEMAND STATISTICS:**

<b>Demographic Type</b>	<b>Population</b>	<b>Households</b>
Directly Serviceable:	Unknown	Unknown
Indirectly Serviceable:	Unknown	Unknown
Total Serviceable:	Unknown	Unknown

<b>Production Statistics</b>	
Total Annual Volume Produced (MG):	126.5
Total Annual Volume Purchased (MG):	126.5
Total Annual Volume Provided (MG):	126.5
Estimated Annual Water Loss:	Unknown

<b>Water Costs</b>	
Customer Type	Cost per 1000 gallons
Customers within the municipality	Unknown
Customers outside the municipality	Unknown

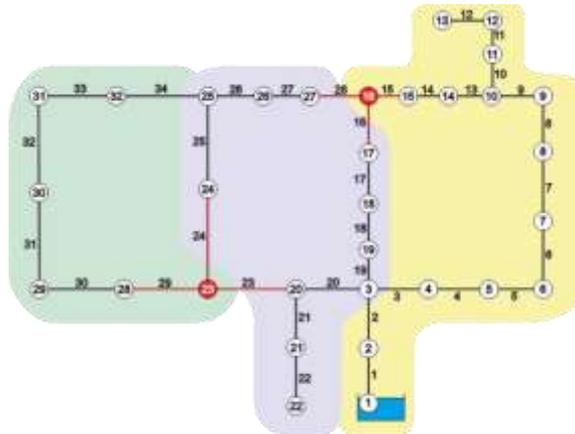
**CUSTOMERS AND USAGE:**

<b>Customer Type</b>	<b>Customer Count</b>	<b>Average Daily Demand (MGD)</b>
Wholesale:		
Residential:		
Commercial:		
Institutional:		
Industrial:		
Other:		
Total Customers:		
Flushing, Maintenance & Fire Protection:		
Total Water Usage:		126.5

**DATA FILE ATTRIBUTES:**

<b>ATTRIBUTE</b>		<b>UNITS</b>
Pipe Length & Diameter	X	Metres
Pipe Age		
Node Elevation	X	Metres
Node Demand	X	Cubic metres per hour
Valves		
Hydrants		
Tank Levels		
Tank Volume		
PRVs		
WTP		
WTP Capacity		
Pump Data		

**ANEXO III.** Reportes generados por EpaNet del funcionamiento de la red Hanoi



Se presentan aquí los reportes de la red de Hanoi, que intervienen con los nodos utilizados para el análisis (16, 23).

Nodo 16: tubería 15. Hanoi example by Fujiwara and Khang, Water Resources Research, 1990

Node Results:

Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m	Quality
2	247.22	97.13	952.81	0.00
3	236.11	61.47	603.00	0.00
4	36.11	56.78	556.98	0.00
5	201.39	50.96	499.94	0.00
6	279.17	44.84	439.88	0.00
7	375.00	43.41	425.83	0.00
8	152.78	41.71	409.14	0.00
9	145.83	40.35	395.86	0.00
10	145.83	39.36	386.10	0.00
11	138.89	37.80	370.80	0.00
12	155.56	34.37	337.17	0.00
13	261.11	30.16	295.89	0.00
14	170.83	37.97	372.52	0.00
15	77.78	31.91	313.04	0.00
16	86.11	29.72	291.56	0.00
17	240.28	34.52	338.62	0.00
18	373.61	53.18	521.66	0.00
19	16.67	58.62	575.05	0.00
20	354.17	50.29	493.35	0.00
21	258.33	40.94	401.64	0.00
22	134.72	35.78	350.97	0.00
23	290.28	44.11	432.67	0.00
24	227.78	38.37	376.46	0.00
25	47.22	34.67	340.14	0.00
26	250.00	30.77	301.87	0.00

---



---

27	102.78	29.50	289.42	0.00
28	80.56	38.51	377.74	0.00
29	100.00	29.67	291.08	0.00
30	100.00	29.95	293.80	0.00
31	29.17	30.05	294.74	0.00
32	223.61	32.52	319.02	0.00
33	15.21	30.57	299.87	0.00
1	-5554.10	100.00	0.00	0.00 Reservoir

Link Results:

---



---

Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Status
1	5554.10	6.85	28.74	Open
2	5306.88	6.55	26.41	Open
3	2209.42	2.73	5.21	Open
4	2173.31	2.68	5.06	Open
5	1971.92	2.43	4.22	Open
6	1692.75	2.09	3.18	Open
7	1317.75	1.63	2.00	Open
8	1164.97	1.44	1.59	Open
9	1019.14	1.26	1.24	Open
10	555.56	1.22	1.64	Open
11	416.67	1.43	2.86	Open
12	261.11	0.89	1.20	Open
13	317.75	1.09	1.73	Open
14	146.92	2.01	12.13	Open
16	51.77	0.71	1.76	Open
17	292.05	2.25	10.66	Open
18	665.66	2.28	6.80	Open
19	682.33	2.34	7.12	Open
20	2179.02	2.69	5.08	Open
21	393.05	1.94	6.23	Open
22	134.72	1.85	10.33	Open
23	1431.80	1.77	2.33	Open
24	975.81	2.14	4.66	Open
25	748.03	1.64	2.85	Open
26	333.19	1.64	4.59	Open
27	83.19	1.14	4.23	Open
28	19.59	0.27	0.29	Open
29	165.72	1.28	3.73	Open
30	85.16	1.17	4.42	Open
31	14.84	0.20	0.17	Open
32	114.84	0.57	0.64	Open
33	144.01	1.11	2.88	Open
34	367.62	1.26	2.27	Open
35	69.14	0.95	4.88	Open
36	53.92	0.74	3.08	Open

---



---

Nodo 16: tubería 16. Hanoi example by Fujiwara and Khang, Water Resources Research, 1990  
Node Results:

Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m	Quality
2	247.22	97.13	952.83	0.00
3	236.11	61.50	603.27	0.00
4	36.11	56.79	557.14	0.00
5	201.39	50.97	499.97	0.00
6	279.17	44.83	439.75	0.00
7	375.00	43.39	425.66	0.00
8	152.78	41.68	408.90	0.00
9	145.83	40.32	395.56	0.00
10	145.83	39.32	385.75	0.00
11	138.89	37.76	370.45	0.00
12	155.56	34.33	336.82	0.00
13	261.11	30.13	295.54	0.00
14	170.83	37.92	371.95	0.00
15	77.78	31.63	310.34	0.00
16	86.11	29.86	292.90	0.00
17	240.28	35.09	344.28	0.00
18	373.61	53.29	522.81	0.00
19	16.67	58.68	575.62	0.00
20	354.17	50.33	493.72	0.00
21	258.33	40.98	402.01	0.00
22	134.72	35.81	351.34	0.00
23	290.28	44.15	433.12	0.00
24	227.78	38.43	377.01	0.00
25	47.22	34.74	340.77	0.00
26	250.00	30.86	302.72	0.00
27	102.78	29.62	290.55	0.00
28	80.56	38.56	378.23	0.00
29	100.00	29.73	291.67	0.00
30	100.00	30.01	294.41	0.00
31	29.17	30.11	295.35	0.00
32	223.61	32.58	319.66	0.00
33	13.11	31.72	311.19	0.00
1	-5552.00	100.00	0.00	0.00 Reservoir

Link Results:

Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Status
1	5552.00	6.85	28.72	Open
2	5304.78	6.54	26.39	Open
3	2212.23	2.73	5.22	Open
4	2176.12	2.68	5.07	Open

---



---

5	1974.73	2.44	4.23	Open
6	1695.56	2.09	3.19	Open
7	1320.56	1.63	2.01	Open
8	1167.79	1.44	1.60	Open
9	1021.95	1.26	1.25	Open
10	555.56	1.22	1.64	Open
11	416.67	1.43	2.86	Open
12	261.11	0.89	1.20	Open
13	320.56	1.10	1.76	Open
14	149.73	2.05	12.56	Open
15	71.95	0.99	3.23	Open
17	288.15	2.22	10.40	Open
18	661.76	2.27	6.73	Open
19	678.43	2.32	7.05	Open
20	2178.01	2.69	5.08	Open
21	393.05	1.94	6.23	Open
22	134.72	1.85	10.33	Open
23	1430.79	1.76	2.33	Open
24	974.86	2.14	4.65	Open
25	747.08	1.64	2.84	Open
26	332.18	1.64	4.56	Open
27	82.18	1.13	4.14	Open
28	20.60	0.28	0.32	Open
29	165.66	1.28	3.73	Open
30	85.10	1.17	4.41	Open
31	14.90	0.20	0.17	Open
32	114.90	0.57	0.64	Open
33	144.06	1.11	2.88	Open
34	367.68	1.26	2.27	Open
35	34.76	0.48	1.37	Open
36	47.87	0.66	2.47	Open

Nodo 16: tubería 26. Hanoi example by Fujiwara and Khang, Water Resources Research, 1990  
Node Results:

---

Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m	Quality
2	247.22	97.06	952.19	0.00
3	236.11	60.58	594.30	0.00
4	36.11	55.83	547.66	0.00
5	201.39	49.93	489.84	0.00
6	279.17	43.72	428.87	0.00
7	375.00	42.26	414.57	0.00
8	152.78	40.52	397.50	0.00
9	145.83	39.13	383.88	0.00
10	145.83	38.11	373.83	0.00
11	138.89	36.55	358.54	0.00
12	155.56	33.12	324.90	0.00

---

---



---

13	261.11	28.91	283.62	0.00
14	170.83	36.59	358.97	0.00
15	77.78	29.25	286.90	0.00
16	86.11	26.82	263.06	0.00
17	240.28	32.74	321.19	0.00
18	373.61	52.15	511.55	0.00
19	16.67	57.68	565.87	0.00
20	354.17	48.99	480.56	0.00
21	258.33	39.64	388.85	0.00
22	134.72	34.47	338.18	0.00
23	290.28	42.45	416.42	0.00
24	227.78	36.26	355.75	0.00
25	47.22	32.18	315.65	0.00
26	250.00	25.65	251.67	0.00
27	102.78	25.24	247.56	0.00
28	80.56	36.69	359.94	0.00
29	100.00	27.37	268.47	0.00
30	100.00	27.56	270.40	0.00
31	29.17	27.66	271.30	0.00
32	223.61	30.05	294.81	0.00
33	81.04	28.20	276.60	0.00
1	-5619.93	100.00	0.00	0.00 Reservoir

Link Results:

---



---

Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Status
1	5619.93	6.93	29.37	Open
2	5372.71	6.63	27.02	Open
3	2225.45	2.74	5.28	Open
4	2189.34	2.70	5.12	Open
5	1987.95	2.45	4.29	Open
6	1708.78	2.11	3.24	Open
7	1333.78	1.65	2.05	Open
8	1181.01	1.46	1.63	Open
9	1035.17	1.28	1.28	Open
10	555.56	1.22	1.64	Open
11	416.67	1.43	2.86	Open
12	261.11	0.89	1.20	Open
13	333.78	1.14	1.89	Open
14	162.95	2.23	14.69	Open
15	85.17	1.17	4.42	Open
16	58.03	0.80	2.17	Open
17	298.30	2.30	11.09	Open
18	671.91	2.30	6.92	Open
19	688.58	2.36	7.24	Open
20	2222.57	2.74	5.27	Open
21	393.05	1.94	6.23	Open

---



---

---



---

22	134.72	1.85	10.33	Open
23	1475.35	1.82	2.47	Open
24	1016.84	2.23	5.03	Open
25	789.06	1.73	3.14	Open
27	45.69	0.63	1.39	Open
28	57.09	0.78	2.11	Open
29	168.23	1.30	3.84	Open
30	87.67	1.20	4.66	Open
31	12.33	0.17	0.12	Open
32	112.33	0.55	0.61	Open
33	141.49	1.09	2.79	Open
34	365.10	1.25	2.24	Open
35	376.73	1.86	9.37	Open
36	295.69	1.46	5.98	Open

Nodo 23: tubería 23. Hanoi example by Fujiwara and Khang, Water Resources Research, 1990

Node Results:

---



---

Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m	Quality
2	247.22	96.86	950.22	0.00
3	236.11	57.78	566.82	0.00
4	36.11	53.00	519.96	0.00
5	201.39	47.08	461.86	0.00
6	279.17	40.83	400.57	0.00
7	375.00	39.37	386.18	0.00
8	152.78	37.61	368.98	0.00
9	145.83	36.21	355.23	0.00
10	145.83	35.18	345.08	0.00
11	138.89	33.62	329.78	0.00
12	155.56	30.19	296.15	0.00
13	261.11	25.98	254.87	0.00
14	170.83	33.61	329.74	0.00
15	77.78	25.78	252.91	0.00
16	86.11	23.04	226.02	0.00
17	240.28	29.52	289.63	0.00
18	373.61	49.28	483.42	0.00
19	16.67	54.86	538.18	0.00
20	354.17	44.23	433.93	0.00
21	258.33	34.88	342.22	0.00
22	134.72	29.72	291.55	0.00
23	290.28	32.81	321.91	0.00
24	227.78	27.55	270.25	0.00
25	47.22	24.24	237.75	0.00
26	250.00	21.27	208.70	0.00
27	102.78	20.99	205.92	0.00
28	80.56	27.37	268.54	0.00
29	100.00	19.02	186.63	0.00

---



---

---



---

30	100.00	19.40	190.29	0.00
31	29.17	19.50	191.27	0.00
32	223.61	22.06	216.36	0.00
33	284.56	37.55	368.33	0.00
1	-5823.45	100.00	0.00	0.00 Reservoir

Link Results:

---



---

Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Status
1	5823.45	7.18	31.37	Open
2	5576.22	6.88	28.95	Open
3	2231.17	2.75	5.31	Open
4	2195.06	2.71	5.15	Open
5	1993.67	2.46	4.31	Open
6	1714.51	2.11	3.26	Open
7	1339.51	1.65	2.06	Open
8	1186.73	1.46	1.65	Open
9	1040.90	1.28	1.29	Open
10	555.56	1.22	1.64	Open
11	416.67	1.43	2.86	Open
12	261.11	0.89	1.20	Open
13	339.51	1.16	1.96	Open
14	168.67	2.31	15.66	Open
15	90.90	1.25	4.98	Open
16	60.92	0.83	2.38	Open
17	301.19	2.32	11.29	Open
18	674.81	2.31	6.98	Open
19	691.47	2.37	7.30	Open
20	2417.47	2.98	6.16	Open
21	393.05	1.94	6.23	Open
22	134.72	1.85	10.33	Open
24	932.25	2.04	4.28	Open
25	704.48	1.54	2.55	Open
26	287.08	1.42	3.48	Open
27	37.08	0.51	0.95	Open
28	65.70	0.90	2.73	Open
29	163.16	1.26	3.63	Open
30	82.60	1.13	4.17	Open
31	17.40	0.24	0.23	Open
32	117.40	0.58	0.66	Open
33	146.57	1.13	2.97	Open
34	370.18	1.27	2.29	Open
35	1670.24	2.06	5.05	Open
36	1385.69	1.71	3.57	Open

---



---

Nodo 23: tubería 24. Hanoi example by Fujiwara and Khang, Water Resources Research, 1990  
Node Results:

Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m	Quality
2	247.22	96.86	950.17	0.00
3	236.11	57.70	566.05	0.00
4	36.11	52.90	518.93	0.00
5	201.39	46.94	460.51	0.00
6	279.17	40.66	398.84	0.00
7	375.00	39.18	384.35	0.00
8	152.78	37.41	366.99	0.00
9	145.83	35.99	353.10	0.00
10	145.83	34.95	342.83	0.00
11	138.89	33.39	327.53	0.00
12	155.56	29.96	293.90	0.00
13	261.11	25.75	252.62	0.00
14	170.83	33.33	326.93	0.00
15	77.78	24.92	244.44	0.00
16	86.11	21.80	213.82	0.00
17	240.28	28.96	284.08	0.00
18	373.61	49.12	481.88	0.00
19	16.67	54.76	537.15	0.00
20	354.17	44.20	433.60	0.00
21	258.33	34.85	341.88	0.00
22	134.72	29.69	291.22	0.00
23	290.28	36.01	353.27	0.00
24	227.78	25.16	246.78	0.00
25	47.22	22.07	216.48	0.00
26	250.00	19.29	189.27	0.00
27	102.78	19.13	187.71	0.00
28	80.56	29.53	289.73	0.00
29	100.00	17.92	175.79	0.00
30	100.00	17.92	175.82	0.00
31	29.17	18.00	176.56	0.00
32	223.61	20.06	196.78	0.00
33	290.19	29.22	286.63	0.00
1	-5829.08	100.00	0.00	0.00 Reservoir

Link Results:

Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Status
1	5829.08	7.19	31.43	Open
2	5581.86	6.88	29.00	Open
3	2237.78	2.76	5.34	Open
4	2201.67	2.72	5.18	Open

---



---

5	2000.28	2.47	4.34	Open
6	1721.11	2.12	3.28	Open
7	1346.11	1.66	2.08	Open
8	1193.33	1.47	1.67	Open
9	1047.50	1.29	1.31	Open
10	555.56	1.22	1.64	Open
11	416.67	1.43	2.86	Open
12	261.11	0.89	1.20	Open
13	346.11	1.19	2.03	Open
14	175.28	2.40	16.82	Open
15	97.50	1.34	5.68	Open
16	64.27	0.88	2.62	Open
17	304.55	2.35	11.52	Open
18	678.16	2.32	7.04	Open
19	694.83	2.38	7.37	Open
20	2413.14	2.98	6.14	Open
21	393.05	1.94	6.23	Open
22	134.72	1.85	10.33	Open
23	1665.92	2.05	3.09	Open
25	678.40	1.49	2.38	Open
26	277.12	1.37	3.26	Open
27	27.12	0.37	0.53	Open
28	75.66	1.04	3.55	Open
29	179.27	1.38	4.32	Open
30	98.72	1.35	5.81	Open
31	1.28	0.02	0.00	Open
32	101.28	0.50	0.51	Open
33	130.45	1.01	2.40	Open
34	354.06	1.21	2.11	Open
35	1196.37	2.62	11.05	Open
36	906.18	1.99	6.60	Open

Nodo 23: tubería 29. Hanoi example by Fujiwara and Khang, Water Resources Research, 1990  
Node Results:

---

Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m	Quality
2	247.22	97.10	952.52	0.00
3	236.11	61.05	598.91	0.00
4	36.11	56.36	552.87	0.00
5	201.39	50.54	495.80	0.00
6	279.17	44.42	435.71	0.00
7	375.00	42.98	421.66	0.00
8	152.78	41.28	404.95	0.00
9	145.83	39.92	391.66	0.00
10	145.83	38.93	381.89	0.00
11	138.89	37.37	366.59	0.00
12	155.56	33.94	332.96	0.00

---

---



---

13	261.11	29.73	291.68	0.00
14	170.83	37.54	368.28	0.00
15	77.78	31.44	308.40	0.00
16	86.11	29.76	291.98	0.00
17	240.28	34.31	336.58	0.00
18	373.61	52.79	517.90	0.00
19	16.67	58.21	571.07	0.00
20	354.17	49.57	486.26	0.00
21	258.33	40.22	394.55	0.00
22	134.72	35.05	343.88	0.00
23	290.28	43.12	423.04	0.00
24	227.78	37.37	366.65	0.00
25	47.22	33.66	330.18	0.00
26	250.00	30.06	294.88	0.00
27	102.78	29.16	286.09	0.00
28	80.56	33.15	325.23	0.00
29	100.00	27.13	266.15	0.00
30	100.00	28.20	276.66	0.00
31	29.17	28.32	277.86	0.00
32	223.61	31.33	307.34	0.00
61	46.26	36.91	362.08	0.00
1	-5585.15	100.00	0.00	0.00 Reservoir

Link Results:

---



---

Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Status
1	5585.15	6.89	29.04	Open
2	5337.93	6.58	26.70	Open
3	2209.93	2.73	5.21	Open
4	2173.82	2.68	5.06	Open
5	1972.43	2.43	4.22	Open
6	1693.27	2.09	3.18	Open
7	1318.27	1.63	2.00	Open
8	1165.49	1.44	1.59	Open
9	1019.65	1.26	1.24	Open
10	555.56	1.22	1.64	Open
11	416.67	1.43	2.86	Open
12	261.11	0.89	1.20	Open
13	318.27	1.09	1.73	Open
14	147.43	2.02	12.21	Open
15	69.65	0.95	3.04	Open
16	50.29	0.69	1.67	Open
17	290.57	2.24	10.56	Open
18	664.18	2.28	6.78	Open
19	680.85	2.33	7.09	Open
20	2211.04	2.73	5.22	Open
21	393.05	1.94	6.23	Open

---



---

22	134.72	1.85	10.33	Open
23	1463.81	1.81	2.43	Open
24	977.48	2.14	4.67	Open
25	749.70	1.64	2.86	Open
26	318.94	1.57	4.23	Open
27	68.94	0.94	2.99	Open
28	33.84	0.46	0.80	Open
30	69.24	0.95	3.01	Open
31	30.76	0.42	0.67	Open
32	130.76	0.65	0.81	Open
33	159.92	1.23	3.49	Open
34	383.53	1.31	2.45	Open
35	196.06	1.51	8.29	Open
36	149.80	1.15	5.01	Open