

# **Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente**

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Electrónica, Sistemas e Informática  
**Maestría en Sistemas Computacionales**



## **IDENTIFICADOR DE GAPS EN IMÁGENES SATELITALES TOMADAS POR EL LANDSAT 7.**

---

**TRABAJO RECEPTACIONAL** que para obtener el GRADO de  
**MAESTRO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES**

Presenta: **JOSÉ ANDRÉS AVIÑA DELGADO**

Director **DR. HUGO IVÁN PIZA DÁVILA**

Co-Director. **DR. GUILLERMO SÁNCHEZ DÍAZ**

Tlaquepaque, Jalisco. Diciembre de 2020.

# **AGRADECIMIENTOS**

El autor desea dar las gracias a mi familia que me apoyo en todo momento en la obtención de este nuevo título académico.

El autor desea extender su agradecimiento al programa CONACYT por la beca otorgada con No. 640664, así mismo al ITESO por todas las facilidades y beca otorgada en convenio con la empresa Intel de México.

## **DEDICATORIA**

El autor dedica este trabajo recepcional a mi familia, así como a la empresa Intel por su incondicional apoyo en desarrollar cada día mejores profesionales.

# RESUMEN

En el año 2002 el escáner de corrección de línea en las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ presentó una falla. Las imágenes provenientes del satélite Landsat 7 son una de las principales fuentes de monitoreo de fenómenos naturales, así como de cambios inducidos por el hombre. A pesar de la falla presentada, las imágenes captadas por el satélite Landsat 7 se siguen obteniendo debido a que produce bandas de 60 m de largo, estas bandas son utilizadas para realizar estudios de geología que considera los fenómenos térmicos en la superficie terrestre, además se pueden hacer estudios multitemporales porque existen bases de datos de imágenes Landsat 7 desde 1999. Los huecos presentes dentro de las imágenes satelitales Landsat 7 se muestran como líneas paralelas diagonales que cubren el ancho de una imagen satelital, el grosor de cada línea va desde un píxel hasta cercanos los 22 píxeles de alto de la línea paralela identificada como hueco/gap.

Se han desarrollado diferentes algoritmos para corregir estos valores denominados huecos o gaps (gap-filling). Sin embargo, una cantidad considerable de estos algoritmos procesan la imagen completa, afectando no solamente los gaps existentes, sino también los píxeles de la imagen que no presentan problemas. Este procesamiento previo es la identificación de gaps en estas imágenes. Algunos algoritmos incorporan una fase de preprocesamiento para realizar esta identificación de gaps, sin embargo, no logran encontrar todos los huecos o cubrir la totalidad de píxeles que el hueco o área dañada representa.

El presente proyecto tiene como objetivo principal realizar la identificación de gaps en estas imágenes satelitales, como una fase de preprocesamiento. Este propósito se cumple de manera satisfactoria en el presente proyecto mediante un procedimiento que incluye el algoritmo de Otsu para ser aplicado sobre una imagen satelital, el cual se aplica a cada una de las bandas de la imagen satelital en formato TIFF. Con el procedimiento que se ha desarrollado en este trabajo, se implementó una interfaz gráfica con los algoritmos mencionados, para que pueda ser utilizada por cualquier algoritmo de reparación de huecos en imágenes satelitales Landsat 7.

# TABLA DE CONTENIDO

Maestría en Sistemas Computacionales	1
1. INTRODUCCIÓN	11
<b>1.1. Antecedentes</b>	12
<i>1.1.1. Landsat 7</i>	12
<i>1.1.2. Bandas espectrales y Resolución Espacial</i>	12
<i>1.1.3. Fallo del Satélite Landsat 7</i>	12
<b>1.2. Justificación</b>	12
<b>1.3. Problema</b>	13
<b>1.4. Hipótesis</b>	13
<b>1.5. Objetivos</b>	13
<i>1.5.1. Objetivo General:</i>	13
<i>1.5.2. Objetivos Específicos:</i>	13
<i>1.5.3. Novedad científica, tecnológica o aportación</i>	13
2. ESTADO DEL ARTE O DE LA TÉCNICA	14
<b>2.1. Reconocimiento de gaps en imágenes.</b>	15
<b>2.2. Algoritmos de reconocimiento de Gaps/Bordes.</b>	15
<i>2.2.1. Restauración de imágenes basada en bordes.</i>	15
<i>2.2.2. Segmentación de imágenes basada en detección de Bordes</i>	15
<i>2.2.3. Algoritmo de Hough para reconocimiento de Gaps/Bordes</i>	16
<i>2.2.4. Segmentación Binaria de imágenes + SFTA</i>	16
<i>2.2.5. Segmentación Binaria + Otsu Multinivel</i>	16
<i>2.2.6. Procedimiento propuesto en este trabajo recepcional</i>	18
3. MARCO TEÓRICO/CONCEPTUAL	20
<b>3.1. Landsat 7</b>	21
<i>3.1.1. Sensores que capturan imágenes satelitales</i>	21
<i>3.1.2. Composición de una imagen satelital del Landsat 7</i>	21
<i>3.1.3. Fallas de imagen Landsat 7(Gap)</i>	21
<i>3.1.4. Procesamiento de una imagen</i>	21

3.2.	Sistema de información geográfica	22
3.3.	Mediciones de calidad de imágenes	22
3.3.1.	<i>Introducción</i>	22
3.3.2.	<i>RMSE (Root Mean Square Error)</i>	22
3.3.3.	<i>PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)</i>	23
3.3.4.	<i>Regresión Logística</i>	23
4.	DESARROLLO METODOLÓGICO	24
4.1.	Algoritmo SFTA + Otsu multinivel	25
4.2.	Algoritmo de detección de líneas gap basado en el algoritmo de Hough	25
4.3.	Procedimiento Propuesto	25
4.3.1.	<i>Pseudocódigo</i>	26
4.3.2.	<i>Algoritmo de Otsu</i>	27
4.3.4.	<i>Generación de archivo con Gaps de imagen satelital – Delimitación de gaps</i>	28
4.3.5.	<i>Obtención de gaps</i>	29
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
5.1.	Resultados	31
5.1.2.	<i>Ventajas frente al documento “Algoritmo de Hough para reconocimiento de Gaps/Bordes”</i>	36
5.1.3	<i>Resultados del procedimiento propuesto por cada banda procesada del satélite Landsat 7</i>	40
5.1.3.2	<i>Resultados en imágenes TIFF “Level-1 GEOTIFF Data Product”</i>	44
5.2	Discusión	49
6	CONCLUSIONES	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
6.1	Conclusiones	52
6.2	Trabajo Futuro	52

# LISTA DE FIGURAS

Diagrama de Bloques 1. Diagrama que sigue el procedimiento propuesto .....	26
Gráfico 2. Muestra la ventaja del algoritmo propuesto sobre el algoritmo de “Segmentación binaria con Otsu multinivel” .....	34
Gráfico 3 Muestra la ventaja del algoritmo propuesto sobre el algoritmo de “Segmentación binaria con Otsu multinivel” .....	35
Ilustración 1. Imagen Landsat, grosor 4pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha) ...	31
Ilustración 2 Imagen Landsat, grosor 4pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha) ....	31
Ilustración 3 Imagen Landsat, grosor 4pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha) ....	32
Ilustración 4 Imagen Landsat, grosor 7pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha) ....	32
Ilustración 5 Imagen Landsat, grosor 7pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha) ....	32
Ilustración 6 Imagen Landsat, grosor 7pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha) ....	33
Ilustración 7 Imagen Landsat, grosor 14pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha) ..	33
Ilustración 8 Imagen Landsat, grosor 14pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha) ..	33
Ilustración 9 Imagen Landsat, banda térmica (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha) .....	36
Ilustración 10 Imagen Landsat, banda térmica (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha) .....	37
Ilustración 11 Imagen Landsat, banda 2 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	37
Ilustración 12 Imagen Landsat, banda 3 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	37
Ilustración 13 Imagen Landsat tomada del documento del algoritmo de “Hough” (izquierda). Acercamiento a la misma imagen para mayor detalle (derecha). .....	38
Ilustración 14 Imagen Hough1 del documento del algoritmo de “Hough” donde se puede observar en la línea 2 y 4 como falla al reconocer gaps de diferente grosor. ....	38
Ilustración 15 Imagen Landsat14 generada por el procedimiento propuesto por este documento donde se puede apreciar su cubrimiento de líneas gap de diferente grosor (Banda Térmica). .	39
Ilustración 16 Imagen Landsat15 generada por el procedimiento propuesto por este documento donde se puede apreciar su cubrimiento de líneas gap de diferente grosor (Banda Térmica). .	39
Ilustración 17 Imagen Landsat16 generada por el procedimiento propuesto por este documento donde se puede apreciar su cubrimiento de líneas gap de diferente grosor (Banda 2).....	40
Ilustración 18 Imagen Landsat 17 generada por el procedimiento propuesto por este documento donde se puede apreciar su cubrimiento de líneas gap de diferente grosor (Banda 3).....	40
Ilustración 19 Imagen Landsat, banda 1 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	41
Ilustración 20 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul lado izquierdo), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda1) .....	41
Ilustración 21 Imagen Landsat, banda 2 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	42
Ilustración 22 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul lado izquierdo), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda2) ...	42
Ilustración 23 Imagen Landsat, banda 3 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	42

Ilustración 24 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda3).....	43
Ilustración 25 Imagen Landsa, banda térmica (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha) .....	43
Ilustración 26 Imagen landat rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda Térmica) .....	43
Ilustración 27 Imagen Landsat, banda 1 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	44
Ilustración 28 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul lado izquierdo), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 1) ...	45
Ilustración 29 Imagen Landsat, banda 2 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	45
Ilustración 30 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 2).....	45
Ilustración 31 Imagen Landsat, banda 3 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	45
Ilustración 32 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 3).....	46
Ilustración 33 Imagen Landsat, banda 4 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	46
Ilustración 34 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 4).....	46
Ilustración 35 Imagen Landsat, banda 5 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	47
Ilustración 36 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 5).....	47
Ilustración 37 Imagen Landsat, banda térmica (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha) .....	47
Ilustración 38 Imagen Landsat <sup>37</sup> rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda térmica) .....	48
Ilustración 39 Imagen Landsa, banda 7 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha).....	48
Ilustración 40 Imagen Landsat con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 7) .....	48
Ilustración 41 Imagen Landsat, banda pancromática (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha) .....	49
Ilustración 42 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda pancromática) .....	49



## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1 Tabla de acrónimos.....	10
Tabla 2. Algoritmos que realizan la búsqueda de gaps en imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ .....	18
Tabla 3. Valores con los que fueron graficados los gráficos anteriores.....	35

# LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

*Tabla 1 Tabla de acrónimos*

SLC		Scan Line Corrector
PSNR		Peak Signal Noise Ratio
RMSE		Root Mean Square Deviation
TIFF		Tag Image File Format
SFTA		Segmentation-based Fractal Texture Analysis
ETM		Enhanced Thematic Mapper
GEOTIFF		Georeferencing Tag Image File Format

---

# 1. INTRODUCCIÓN

---

**Resumen:** *En el siguiente capítulo se presenta una breve explicación de los antecedentes del objeto de estudio, así como la justificación del proyecto que se aborda durante este trabajo recepcional y a lo largo de este documento, sus diferentes objetivos y la definición del problema.*

## **1.1. Antecedentes**

### ***1.1.1. Landsat 7***

Landsat 7 es un satélite utilizado para la observación y toma de imágenes de la tierra. Los diferentes instrumentos a bordo del satélite son útiles para medir el espectro electromagnético emitido desde la superficie de la Tierra hacia la atmósfera [1].

Las imágenes tomadas por el Landsat 7 (formato GEOTIFF) [16] están compuestas por 8 bandas espectrales. En cada una de estas bandas se destaca la adición de una banda espectral/pancromática con resolución de 15 metros, así como una banda térmica para 60 m. El satélite Landsat 7 permite generar imágenes con una escala de 1:25,000, principalmente en áreas rurales o en territorios de grandes extensiones [15].

### ***1.1.2. Bandas espectrales y Resolución Espacial***

Las bandas del espectro visible e infrarrojo tienen una resolución espacial de 30m (canales 1,2,3,4,5 y 7) mientras que la banda térmica tiene una resolución de 60m y de la banda pancromática con resolución espacial de 15m. Estos avances tecnológicos permite la generación de imágenes con una escala de 1:25,000, representando una mejor relación costo-beneficio que los datos generados por satélites de resolución media (Landsat 5) [15].

### ***1.1.3. Fallo del Satélite Landsat 7***

Durante el transcurso del día 31 de mayo de 2003, mientras el satélite estaba en media órbita, su escáner de corrección de línea (SLC) presentó un mal funcionamiento. Esta falla ocasionó una pérdida de alrededor del 22% de los píxeles de la imagen.

Se han propuesto diversos algoritmos para la corrección de gaps en estas imágenes satelitales. Sin embargo, la mayoría de ellos opera con todos los píxeles de la imagen, modificando también aquellos píxeles que no son gaps.

También se han propuesto algoritmos para la detección de gaps como parte de una etapa de preprocesamiento en la corrección de las imágenes. No obstante, estos algoritmos presentan diferentes limitaciones, las cuales se mencionan en la siguiente sección.

## **1.2. Justificación**

Se han desarrollado diversos métodos de reparación de imágenes con anterioridad. Sin embargo, estos algoritmos y métodos presentan limitaciones para restablecer la imagen dañada a su totalidad.

Además, han sido propuestos algunos algoritmos para detectar los huecos o gaps en estas imágenes. Sin embargo, no han logrado detectar en su totalidad a todos los gaps. Esto se debe a que algunos algoritmos no fueron concebidos para trabajar de

forma eficiente con líneas de espesor suficientemente grandes que contienen a los gaps, porque fueron desarrolladas solamente para procesar imágenes de pequeñas dimensiones o detectar gaps en líneas con espesores no tan grandes como las que presentan las imágenes Landsat 7, de espesores aproximados a 22 píxeles.

Con base en algunas de las limitaciones encontradas en el estado del arte, se propone en este trabajo recepcional un procedimiento para encontrar los gaps de una imagen satelital, que mejore el desempeño de los trabajos relacionados más recientemente publicados, en función de las métricas presentadas por estos mismos.

### **1.3. Problema**

Los diferentes trabajos relacionados con el mejoramiento de imágenes Landsat 7 no han logrado eliminar los gaps en su totalidad, sin afectar regiones de la imagen sin fallas.

### **1.4. Hipótesis**

Creemos que para mejorar una imagen Landsat 7, es necesario incorporar una etapa de preprocesamiento dedicada exclusivamente a la detección de gaps. Una vez identificadas las regiones afectadas por la falla, se puede adaptar algún algoritmo de rellenado

### **1.5. Objetivos**

#### ***1.5.1. Objetivo General:***

Crear procedimientos que permitan identificar los gaps en imágenes satelitales Landsat 7.

#### ***1.5.2. Objetivos Específicos:***

Los objetivos propuestos en este trabajo recepcional son los siguientes:

- 1.- Desarrollar algoritmo para identificación de gaps en cada una de las bandas de la imagen satelital a procesar.
- 2.- Desarrollar algoritmo capaz de generar un archivo/imagen que contenga exclusivamente los gaps identificados en una imagen satelital.
- 3.- Desarrollar algoritmo para la generación de un archivo con coordenadas, que permita de una forma rápida y sencilla saber la posición de cada uno de los gaps identificados.

#### ***1.5.3. Novedad científica, tecnológica o aportación***

Un procedimiento para la identificación de gaps en imágenes satelitales Landsat 7 que mejore los resultados obtenidos en los trabajos relacionados más recientes, en función de las métricas definidas en los trabajos mencionados dentro de la sección del estado del arte.

---

## 2. ESTADO DEL ARTE O DE LA TÉCNICA

---

**Resumen:** *En el siguiente capítulo se presenta un resumen de los trabajos relacionados con el presente trabajo recepcional, diferentes algoritmos, proyectos relacionados con el tema de la identificación de gaps en imágenes satelitales partiendo del más antiguo (1999) al más reciente(2019).*

## 2.1. Reconocimiento de gaps en imágenes.

La falla del escáner de corrección de línea del satélite Landsat ha llevado al desarrollo de nuevos métodos para rellenar los gaps presentes en una imagen tomada por el satélite Landsat 7 sin embargo, la imagen obtenida por la mayoría de estos métodos no es satisfactoria [4]. Algunos de los métodos de reparación de fallas han optado por un enfoque diferente buscando una reparación más efectiva, derivado en la primera identificación de los gaps de una imagen satelital. Estos algoritmos han optado por identificar en una primera fase los gaps, huecos, o imperfecciones en una imagen satelital, la cual una vez que hayan sido identificados estos elementos, harán el proceso de corrección de los mismos de una manera eficiente y corrigiendo solamente aquellos que sean gaps, y no píxeles de la imagen. Han sido propuestos diferentes trabajos para la identificación de los gaps. Entre los más recientes existen algunos que han realizado la identificación mediante su pendiente [11], usando filtros tipo kernel o matriciales [12], así como segmentación de imágenes [8, 10].

## 2.2. Algoritmos de reconocimiento de Gaps/Bordes.

### 2.2.1. Restauración de imágenes basada en bordes.

Este algoritmo necesita como entrada una imagen de cualquier tipo y un kernel/filtro/máscara. Dentro de este algoritmo se asume que, si se identifican bordes/Gaps dentro del área del kernel, estos están conectados de alguna manera con los gaps fuera del kernel.

Como proceso principal, se procede a detectar los gaps alrededor del kernel basándose en los contornos de los segmentos resultantes de una segmentación divisoria [12]. Una segmentación divisoria es aquella que identifica altitudes/bordes geográficos mediante diferentes valores en una imagen de escala de grises [14]. Idealmente estos bordes separan 2 objetos/regiones homogéneas. Los bordes son extraídos por el algoritmo de acuerdo con las manecillas del reloj dentro del filtro dado [12].

### 2.2.2. Segmentación de imágenes basada en detección de Bordes

Este algoritmo detecta bordes mediante “diferencia de fuerzas” por cada píxel. Después de que se calcula la diferencia por cada uno de estos píxeles se asume que lo mayor sea este valor diferencial, siendo lo más probable que ese píxel sea un borde. Este algoritmo también propone un método llamado “Región creciente”, este algoritmo decide que píxel es un borde. El algoritmo de “región creciente” toma un píxel de referencia de manera arbitraria de la matriz de “diferencia de fuerzas” y sus 4 vecinos son clasificados como “candidatos de región”. Cuando el proceso de “región creciente” toca algún “candidato de región” un criterio es usado para determinar si el algoritmo debería continuar por la misma dirección. En caso de que no se identifique un candidato, esa región es separada de la imagen y se le asigna una nueva etiqueta/nombre. Este proceso se repite de manera iterativa hasta que todos los píxeles han sido procesados.

Para la creación de la matriz de “diferencia de fuerzas”, se hace uso de un filtro/kernel de 3x3 que recorre la imagen píxel por píxel [13].

### **2.2.3. Algoritmo de Hough para reconocimiento de Gaps/Bordes**

Este algoritmo parte de la idea de localizar los límites de líneas no identificadas, en este caso usando la transformada de Hough. La transformada de Hough es capaz de detectar líneas rectas dentro de una imagen basándose en el principio de dualidad matemática.

Para este algoritmo y su implementación de la transformada de Hough se calculó la pendiente de la gran mayoría de las líneas y el promedio de ellas (el algoritmo es incapaz de reconocer explícitamente las líneas de la parte sur de una imagen satelital). [11]

### **2.2.4. Segmentación Binaria de imágenes + SFTA**

Este algoritmo recibe como entrada una imagen en escala de grises, esta imagen se necesita descomponer en un subconjunto de imágenes binarias. Para este propósito se utiliza la segmentación binaria de imágenes. Para cada una de las imágenes binarias resultantes se obtiene una imagen fractal.

El primer paso de la segmentación binaria consiste en calcular un conjunto de valores umbral. Los valores umbral se obtienen mediante una variación del algoritmo de segmentación binaria que los calcula mediante la distribución de los valores de gris dentro de la imagen. Este cálculo se obtiene mediante un cálculo iterativo del algoritmo de Otsu.

El algoritmo de Otsu encuentre un valor umbral que minimice la varianza. El siguiente paso de este algoritmo es segmentar las imágenes de forma binaria con base a los umbrales obtenidos. El resultado final es un conjunto de ‘n’ de imágenes binarias.

Para obtener los bordes se utiliza el algoritmo denominado SFTA. El algoritmo de SFTA utiliza un vector que es construido por el conjunto de imágenes binarias, su tamaño, niveles de gris y límites/bordes. Este cálculo se efectúa a cada una de las imágenes [8].

### **2.2.5. Segmentación Binaria + Otsu Multinivel**

Este algoritmo se propone para obtener información de bordes y sus propiedades, hace uso de la segmentación binaria y el algoritmo iterativo de Otsu. El primer paso de este algoritmo para encontrar aquella información faltante es mediante el algoritmo de segmentación binaria para detectar gaps. El algoritmo de segmentación binaria toma una imagen y regresa un conjunto de diferentes valores umbral que son procesados por Otsu. Después de aplicar Otsu a cada una de las imágenes se aplica un segundo paso del algoritmo de segmentación binaria. Este segundo paso consiste en convertir la



imagen en turno en un conjunto de imágenes binarias, esto es resultado de la selección de un valor umbral del conjunto original de umbrales del primer paso de segmentación binaria y aplicado al algoritmo de segmentación binaria. Como producto final de este proceso se obtiene la detección de bordes/gaps [10].

Tabla 2. Algoritmos que realizan la búsqueda de gaps en imágenes satelitales Landsat 7 ETM+

Algoritmos	Identificación de los gaps en la imagen	Diseñado específicamente para procesar imágenes satelitales	Producción de falsos positivos o negativos en la imagen	Procesamiento de líneas de gaps de cualquier grosor	Procesamiento de imágenes satelitales no homogéneas
<b>Algoritmo de Hough para reconocimiento de gaps (2019) [11]</b>	Capaz de identificar líneas de gaps mediante una pendiente.  Incapaz de reconocer líneas gap del final de una imagen satelital	Diseñado para imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.  Las imágenes satelitales fueron reducidas en tamaño a 500 x 500 píxeles	No especifica qué hace el algoritmo frente a Gaps de línea discontinuas o que pudiesen introducir falsos positivos	No especifica si es capaz de identificar líneas Gap de diferente grosor.	No se especifica
<b>Restauración de imágenes basada en bordes (2005) [12]</b>	Capaz de identificar borde/Gaps a partir de una imagen y un kernel dado.	No ha sido probado en imágenes satelitales	Inventa contenido donde el algoritmo no puede identificar correctamente.	No se especifica	No ha sido probado en imágenes satelitales
<b>Segmentación de imágenes basada en detección de Bordes (1999) [13]</b>	Identifica Bordes a partir de un kernel/Mapa DIS	No ha sido probado en imágenes satelitales	Produce falsos/positivos en algunas áreas	No se especifica	No ha sido probado en imágenes satelitales
<b>Segmentación Binaria + SFTA (2012) [8]</b>	Capaz de identificar Gaps a partir de texturas.  Necesita un conjunto de imágenes binarias	No ha sido diseñado para imágenes satelitales.  Probado en imágenes de 64 x 64	su efectividad va desde 13% a 95%	No se especifica	No ha sido diseñado para imágenes satelitales
<b>Segmentación Binarias + Otsu multinivel (2017) [10]</b>	Capaz de reconocer gaps en imágenes satelitales	Probado en imágenes satelitales(8mb) que no son de tipo GEOTIFF (960mb).  Parte de sus pruebas son en imágenes de 300 x 300 tardando hasta 4 min por imagen.	Su cálculo de RMSE va desde 1.75 hasta 4.48 en imágenes satelitales	Capaz de identificar diferentes grosores de líneas GAP	Solamente se ha probado su efectividad con imágenes homogéneas

### 2.2.6. Procedimiento propuesto en este trabajo recepcional

En el proceso de llegar a la solución que propone mostrar el presente documento se probaron diferentes algoritmos de reconocimiento de bordes. Dentro de los algoritmos que se probaron tales como Laplace o Prewitt se identificó uno de los principales elementos que de igual manera exploraron los algoritmos de “Segmentación Binaria + SFTA” y “Segmentación Binaria + Otsu”, el hecho de

evaluar las imágenes en una escala de grises en lugar de una imagen de rango de color completo.

El hecho de utilizar las imágenes en su equivalente de escala de grises llevó al uso del algoritmo de Otsu. El algoritmo de Otsu como método de entrada utiliza solamente imágenes de esta naturaleza para así poder evaluar los diferentes tonos de grises y poder calcular un umbral que minimice el valor de dispersión de los valores de gris dentro de la imagen.

Este procedimiento propone como primer paso la aplicación del algoritmo de Otsu, sin ningún procesamiento previo a diferencia de los algoritmos anteriores. El valor umbral resultante se aplica directamente sobre la imagen satelital original para así tener una imagen resultante sólo con los gaps identificados dentro de la imagen. Como pasos adicionales, este procedimiento propone identifica los límites de la imagen (Las imágenes satelitales de Landsat 7 tiene una rotación de alrededor de 10 grados según mediciones manuales realizadas por el presente alumno) para, así como paso final poder ofrecer un archivo de texto con las coordenadas de los diferentes gaps encontrados dentro de la imagen satelital.

---

## 3. MARCO TEÓRICO/CONCEPTUAL

---

**Resumen:** *En el siguiente capítulo se presenta una breve explicación acerca de las imágenes satelitales y de donde provienen las mismas que son objeto de estudio, las bases teóricas y conceptuales acerca de las imágenes satelitales y como se procede con el procesamiento de imágenes satelitales.*

## **3.1. Landsat 7**

### ***3.1.1. Sensores que capturan imágenes satelitales***

El satélite Landsat 7 está diseñado para obtener 7 bandas o canales de energía reflejada, así como uno de energía emitida. El objetivo principal de los sensores del Landsat 7 es el de actualizar la calidad de la información radiométrica, siendo esta en teoría proporcional a los datos obtenidos por los sensores del sistema de observación en la Tierra.

Debido a que mucha de esta información necesita ser corregida, el satélite Landsat solía contar con un sensor que era capaz de corregir esta información con precisión [6].

El satélite Landsat 7 hace uso del sensor SLC (Scan Line Corrector por sus siglas en inglés). Este sensor permite adquirir imágenes de la Tierra, haciendo ajustes sobre la curvatura de la misma, en un intervalo constante a la dirección de vuelo del satélite Landsat [1]. En el momento en el que el satélite Landsat fallo, se perdió la habilidad del sensor de obtener imágenes en un campo espacial continuo [2]

### ***3.1.2. Composición de una imagen satelital del Landsat 7***

Las imágenes obtenidas por el satélite Landsat 7 están formadas por 7 bandas de energía reflejada más una banda de energía proyectada. La banda 6 es capaz de escanear radiación infrarroja térmica. Las bandas 1-5, así como la banda 7 tiene una resolución espacial de 30 m. La resolución espacial para la banda infrarroja al momento de adquisición de la imagen es de 120 m, sin embargo, esta imagen es ajustada a 30 m por píxel.

Las imágenes del satélite Landsat pueden ser obtenidas con 3 niveles diferentes de corrección: corrección sistemática, corrección precisa y corrección de terreno [6].

### ***3.1.3. Fallas de imagen Landsat 7(Gap)***

Un gap es una brecha sistemática de datos sobre imágenes obtenidas por el sensor del satélite Landsat 7. Este fallo remueve la capacidad de entregar campos espaciales continuos [3].

### ***3.1.4. Procesamiento de una imagen***

El campo de procesamiento de imágenes se refiere a la acción de procesar imágenes digitales mediante un ordenador digital, computadora [7]. Uno de los propósitos del procesamiento de imágenes es la extracción de información útil de las imágenes para empezar un proceso de restauración o mejora, así como el procedimiento de compresión de información para un fácil almacenaje y transportación. Los elementos que conforman al procesamiento de imágenes son:

adquisición de imagen, almacenamiento de imagen, procesamiento de imagen y visualización de imagen. Los algoritmos de procesamiento de imágenes pueden dividirse en 3 diferentes tipos: Bajo nivel, nivel medio y nivel alto.

El procesamiento de bajo nivel interactúa directamente a nivel de píxel, el nivel medio hace uso de procesos de segmentación, así como procesos de enlace de bordes. El último tipo de algoritmo de procesamiento de imágenes se llama alto nivel. El algoritmo de alto nivel es capaz de procesar escritura a mano, reconocimiento facial y algoritmos de visión de máquina [5].

## **3.2. Sistema de información geográfica**

La información geográfica es información acerca de un elemento sobre la superficie de la Tierra, es el conocimiento sobre dónde hay algo o que hay en un determinado lugar.

Un sistema de información se entiende como la unión de la información y herramientas informáticas para su análisis con objetivos concretos. Un sistema de información se usa para manipular, consultar en una base de datos.

Sistema de información geográfica, al incluir el término geográfica, se asume que la información es espacialmente explícita, es decir, incluye la posición en el espacio. No importa si el sistema de información geográfica se ve como una base de datos o un sistema de toma de decisiones, un sistema de información geográfica siempre deberá contar con la capacidad de trabajar con información espacial. Un sistema de información espacial también puede ser visto como las acciones organizadas con que las personas miden aspectos de fenómenos y procesos geográficos para enfatizar cuestiones espaciales, entidades y relaciones [7].

## **3.3. Mediciones de calidad de imágenes**

### ***3.3.1. Introducción***

El error cuadrático medio (RMSE) y la proporción máxima de señal a ruido (PSNR) son las medidas más populares para obtener métricas en procesamiento de imágenes y video. Técnicamente RMSE mide la diferencia entre imágenes mientras que PSNR mide la fidelidad de las mismas o en otras palabras, que tanto se parece una imagen de referencia con aquella que está siendo comparada [17].

### ***3.3.2. RMSE (Root Mean Square Error)***

RMSE es el error cuadrático medio entre los diferentes valores de gris de un píxel entre dos secuencias de imágenes L y J.

$$MSE = \frac{L}{TXY} \sum_T \sum_X \sum_Y [L(T, X, Y) - J(T, X, Y)]^2$$

para imágenes de tamaño X, Y y T franjas. [17] El valor del RMSE es siempre no negativo y de un valor cercano a cero (cero indica que ningún error ha sido encontrado dentro de los datos) [24].

### 3.3.3. PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*)

El PSNR estima la calidad de una imagen reconstruida en comparación con una imagen original. Su principal objetivo es encontrar un valor que refleje la calidad de la imagen reconstruida. [19] El PSNR es una medida en decibeles que se define de la siguiente manera:

$$PSNR = 10 \log \frac{m^2}{MSE}$$

donde m es el valor máximo que un píxel puede tener [17]. El MSR representa el error cuadrático acumulado entre la imagen original y la modificada/reconstruida [19]. Nótese que MSE y PSNR están definidos para información lumínica, si se toma en cuenta valores de color no hay un cómputo válido para tales medidas [17].

El valor típico del PSNR oscila entre 30 y 40 dB, El Comité de MPEG considera que un aumento de una imagen a otra tan mínima como 0.5dB es suficiente para denotar que una imagen es mejor que otra, por lo tanto, entre más alto es el valor de PSNR más fidelidad contiene la imagen que ha sido comparada [18].

### 3.3.4. *Regresión Logística*

La regresión logística suele evaluar el efecto de uno o más antecedentes sobre un determinado hecho a ocurrir [20]. El modelo de regresión logística se caracteriza por emplear predictores continuos (covariantes) para estimar la probabilidad de que una respuesta binaria (o binomial) ocurra [21].

---

## 4. DESARROLLO METODOLÓGICO

---

**Resumen:** *El siguiente capítulo provee un breve resumen de los 2 principales artículos (sección 4.1 y sección 4.2) contra los que será comparado este documento recepcional (sección 4.3). En la sección 4.3 se provee la descripción detallada del procedimiento propuesto por este trabajo recepcional.*



#### **4.1. Algoritmo SFTA + Otsu multinivel**

Este algoritmo se propone para obtener información de bordes y sus propiedades, hace uso de la segmentación binaria y el algoritmo iterativo de Otsu. El primer paso de este algoritmo para encontrar aquella información faltante es mediante el algoritmo de segmentación binaria para detectar gaps. El algoritmo de segmentación binaria toma una imagen y regresa un conjunto de diferentes valores umbral que son procesados por Otsu. Después de aplicar Otsu a cada una de las imágenes se aplica un segundo paso del algoritmo de segmentación binaria. Este segundo paso consiste en convertir la imagen en turno en un conjunto de imágenes binarias, esto es resultado de la selección de un valor umbral del conjunto original de umbrales del primer paso de segmentación binaria y aplicado al algoritmo de segmentación binaria. Como producto final de este proceso se obtiene la detección de bordes/gaps [10].

#### **4.2. Algoritmo de detección de líneas gap basado en el algoritmo de Hough**

Este algoritmo parte de la idea de localizar los límites de líneas no identificadas, en este caso usando la transformada de Hough. En 1962, Hough propuso un método para detectar líneas en una imagen basado en el principio de dualidad matemática. Este algoritmo plantea la idea que a partir de una línea recta sobre un plano puede ser expresada por dos parámetros.  $\rho$  y  $\emptyset$  donde  $\rho$  es el radio y  $\emptyset$  es el ángulo polar dentro de un sistema de coordenadas polares:

$$\rho = x \cos \emptyset + y \sin \emptyset$$

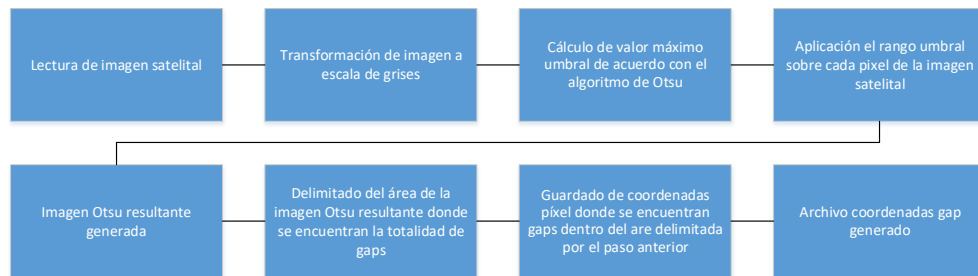
Donde  $\rho$  es también la distancia vertical del punto original  $O$  hacia una línea recta,  $\emptyset$  es el ángulo entre la línea vertical desde el origen de la línea recta y el eje x.

Para este algoritmo y su implementación de la transformada de Hough se calculó la pendiente de la gran mayoría de las líneas gap y el promedio de ellas (el algoritmo es incapaz de reconocer explícitamente las líneas gap de la parte sur de una imagen satelital). [11]

#### **4.3. Procedimiento Propuesto**

Este procedimiento propone para la identificación de gaps dentro de una imagen satelital Landsat 7 hace uso de una imagen satelital real de 8300 pixeles por 7400 pixeles, sin importar si se va a procesar una imagen completa de 8 bandas o una sola banda, todo esto en formato TIFF. La imagen de entrada es convertida en una imagen en escala de grises, para posteriormente ser procesada por el algoritmo de Otsu una sola vez. Después del procesamiento de Otsu y de obtener el valor máximo de valor

Umbral, se aplica este valor umbral desde un mínimo valor 0 para obtener la imagen resultante. Para una representación gráfica, observar la sección 4.3.5 Diagrama de Flujo



*Diagrama de Bloques 1. Diagrama del proceso que sigue el procedimiento propuesto.*

#### **4.3.1. Pseudocódigo**

- a) Lectura de imagen satelital
- b) Obtención de numero de canales de imagen satelital
- c) Si número de canales mayor a 1
  - a. Convertir imagen a escala de grises
- d) Método obtención niveles de gris
  - a. Iterar cada píxel en imagen satelital
    - i. Guardar valor de gris de imagen satelital
- e) Método probabilidad de gris
  - a. Por cada valor de gris guardado
    - i. Guardar valor promedio de gris de acuerdo con el tamaño de imagen
- f) Método obtener valores w y U/Método Momentum
  - a. Por cada valor guardado en el promedio de gris a partir de índice 1
    - i. Guardar W (índice anterior agregando valor de probabilidad de gris)
    - ii. Guardar U (índice anterior agregando (índice anterior multiplicado por el valor de probabilidad de gris))
- g) Método de Otsu máximo/Umbral máximo/varianza
  - a. Por cada valor en W a partir de 1
    - i. Dividir los valores de W en W0(valor W) y W1(valor W -1)
    - ii. Si los valores de W son diferentes a cero
      1. Dividir los valores de U en U0(valor U entre valor W1) y U1(valor ultimo de U menos valor U entre valor W2)
      2. Asignar a sigma la suma de elevar al cuadrado la resta del último valor de U menos U0 y U1 respectivamente
      3. Es el valor de sigma mayor a sigmaMax (valor inicial 0)
        - a. El valor de sigma reemplaza a sigmaMax

- b. Se asigna a umbralMax el iterador – 1
- h) Método de rango umbral
  - a. Por cada píxel dentro la imagen satelital
    - i. Si píxel pertenece al rango umbral
      - 1. Asignar valor mínimo
    - ii. Si píxel no pertenece al rango umbral
      - 1. Asignar valor máximo
- i) Método de delimitación de gaps
  - a. Se manda llamar el método encontrar bordes partiendo de la parte superior izquierda
  - b. Se manda llamar el método encontrar bordes partiendo de la parte superior derecha
  - c. Se manda llamar el método encontrar bordes partiendo de la parte inferior izquierda
  - d. Se manda llamar el método encontrar bordes partiendo de la parte inferior derecha
  - e. Método encontrar bordes
    - i. Por cada píxel dentro la imagen satelital
      - 1. Si el valor es mayor al Umbral regresar valor sino ignorar
  - f. Dibujar cuadrado basándose en los bordes obtenidos anteriormente.
- j) Método generación de archivo gap
  - a. Por cada píxel en la imagen
    - i. Si el píxel pertenece al cuadrado dibujado
      - 1. Guardar píxel si este es un gap
    - ii. Se encuentre final del cuadrado
      - 1. Dejar de guardar gaps y saltar a la siguiente línea
  - b. Generar archivo resultante gap

#### ***4.3.2. Algoritmo de Otsu***

El algoritmo de Otsu es un algoritmo de procesamiento de imágenes que se encarga de minimizar la varianza entre los diferentes niveles de gris presentes a lo largo de una imagen. Este proceso se aplica a cada una imagen donde se obtiene la región deseada en un umbral determinado, donde el algoritmo de Otsu se encarga de proveer el valor umbral máximo, mientras que el valor umbral mínimo es definido por el usuario

El algoritmo de Otsu se encarga de obtener una región umbral mediante un método de discriminación, en el cual el umbral es una región de píxeles pertenecientes a una imagen que es particionada en 2 clases dependiendo del nivel de gris al que el píxel pertenezca.

Algoritmo:

1. Los píxeles se dividen en 2 clases  $C_0$  y  $C_1$  por un valor umbral de nivel  $k$ .
2. Se calcula la probabilidad de ocurrencia de la clase
  - a.  $w_0 = Pr(C_0) = \sum_{i=1}^k p_i = w(k)$
  - b.  $w_1 = Pr(C_1) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - w(k)$
3. Calcula la clase promedio de los niveles de gris.
  - a.  $U_0 = \sum_{i=1}^k iPr(i|C_0) = \sum_{i=1}^k ip_i/W_0 = U(k)/w(k)$
  - b.  $U_1 = \sum_{i=k+1}^L iPr(i|C_1) = \sum_{i=k+1}^L ip_i/w_1 = (U_T - U(k)) / (1 - w(k))$

donde  $w(k)$  y  $U(k)$  son los valores acumulados desde cero al  $k$ -ésimo nivel y

$$U_1 = \sum_{i=k+1}^L iPr(i|C_1) = \sum_{i=k+1}^L ip_i/w_1 = (U_T - U(k))/(1 - w(k))$$

es el nivel promedio de toda la imagen.

4. Cálculo de la varianza
  - a.  $\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^k (i - U_0)^2 Pr(i|C_0) = \sum_{i=1}^k (i - U_0)^2 p_i/w_0$
  - b.  $\sigma_1^2 = \sum_{i=k+1}^L (i - U_1)^2 Pr(i|C_1) = \sum_{i=k+1}^L (i - U_1)^2 p_i/w_1$
5. Para poder evaluar la fiabilidad del umbral  $k$ , se utilizan los siguientes métodos de reducción:

- a.  $\lambda = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_w^2}, k = \frac{\sigma_T^2}{\sigma_w^2}, n = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2}$                       donde
- b.  $\sigma_w^2 = w_0\sigma_0^2 + w_1\sigma_1^2$                       es la varianza dentro de la clase,
- c.  $\sigma_B^2 = w_0(U_0 - U_T)^2 + w_1(U_1 - U_T)^2 = w_0w_1(U_1 - U_0)^2$  es la varianza entre clases, y
- d.  $\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^L (i - U_T)^2 p_i$                       es la varianza total [9].

#### 4.3.3. Cálculo de valor umbral

El valor umbral se aplica a cada píxel que se encuentra dentro del rango dado por el presente documento (valor inicial 0) y el valor máximo dado por el algoritmo de Otsu. Todo valor que se sale del valor umbral se le asigna un valor máximo, 255. [23]

$$imagen(x, y) = \begin{cases} 255 & \text{if } src(x, y) > \text{umbral} \\ 0 & \text{if } src(x, y) \text{ dentro de umbral} \end{cases}$$

#### 4.3.4. Generación de archivo con Gaps de imagen satelital – Delimitación de gaps

En un esfuerzo de tratar de reducir el procesamiento de toda la imagen, primeramente, se delimitan hasta donde llegan los gaps y se menosprecia todos los demás bordes superior, inferior izquierdo y derecho.

Teniendo como referencia el valor umbral Otsu se procede a encontrar los 4 puntos de la imagen para así poder dibujar un cuadrado que delimite la mayor cantidad de gaps dentro de la imagen. La operación es simple, se procede a encontrar el primer píxel fuera del rango umbral delimitado y se guarda como coordenada para dibujar el cuadro y el método termina. Este método se ejecuta un total de cuatro veces con diferentes puntos de partida dependiendo la cercanía de la imagen con el lado izquierdo o derecho, superior o inferior.

$$imagen(x,y) = \begin{cases} \text{Coordenada if } src(x,y) > \text{umbral} \\ 0 \text{ continua busqueda} \end{cases}$$

Una vez obtenidas las coordenadas se procede a dibujar el cuadrado con líneas rectas que nos devuelvan un cuadrado de un color dado.

#### ***4.3.5. Obtención de gaps***

Una vez obtenido el cuadrado del paso anterior se procede a iterar la imagen y despreciar todo píxel hasta que se encuentra un píxel correspondiente con el cuadrado que se dibujó en el paso anterior, a partir de este momento toda coordenada de píxel es guardada dentro de un archivo de texto hasta volver a encontrar otra línea del cuadrado. Cuando otro píxel correspondiente al cuadrado dibujado en el apartado anterior, el algoritmo brinca hacia la siguiente fila y ejecuta el mismo proceso hasta llegar a la fila final de la imagen.

---

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

**Resumen:** *En la siguiente sección se presentarán las diferentes ventajas en orden cronológico frente a los diferentes documentos del estado del arte, así como sus respectivas evidencias. Como apartado final, se presentará la imagen resultante por cada banda una vez procesada por el presente trabajo recepcional.*

## 5.1. Resultados

### 5.1.1. Ventajas con relación al documento: “Segmentación binaria con Otsu multinivel” del documento “An Efficient Approach for Filling Gaps in Landsat 7 Satellite Images” 2017.

El algoritmo de “Segmentación binaria con Otsu multinivel” hace uso de imágenes sintéticas de 300 x 300 así como imágenes del satélite Landsat 8 en el que introduce gaps de diferente grosor 4pt, 7 pt y 14 pt. Para poder medir la eficacia del presente algoritmo se procedió con el mismo enfoque y a continuación se provee una pequeña muestra de las diferentes imágenes de 4, 7 y 14 pt del satélite Landsat 8 que fueron evaluadas por el presente algoritmo de este documento.

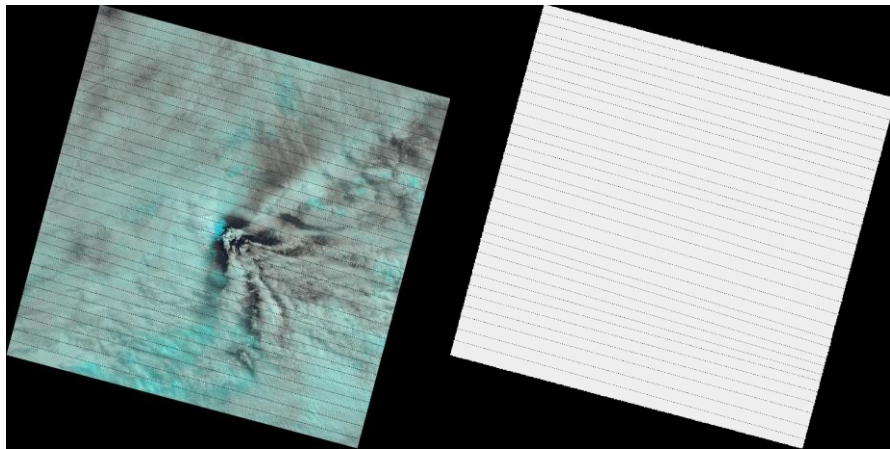


Ilustración 1. Imagen Landsat, grosor 4pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha)

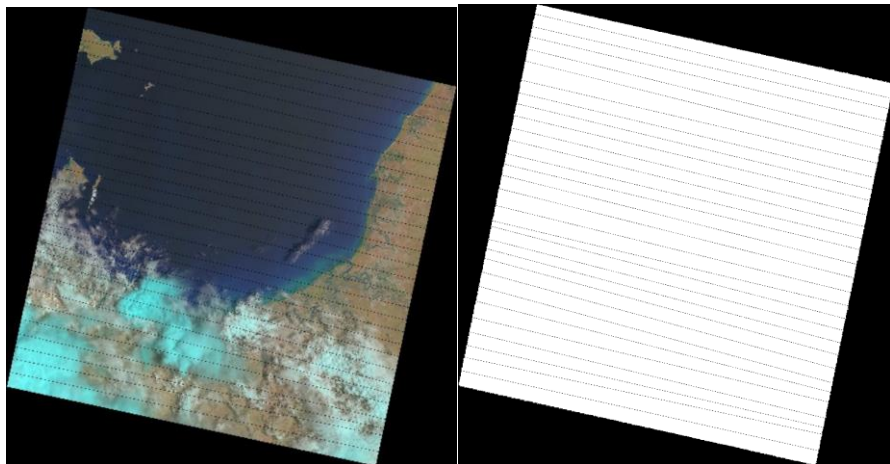
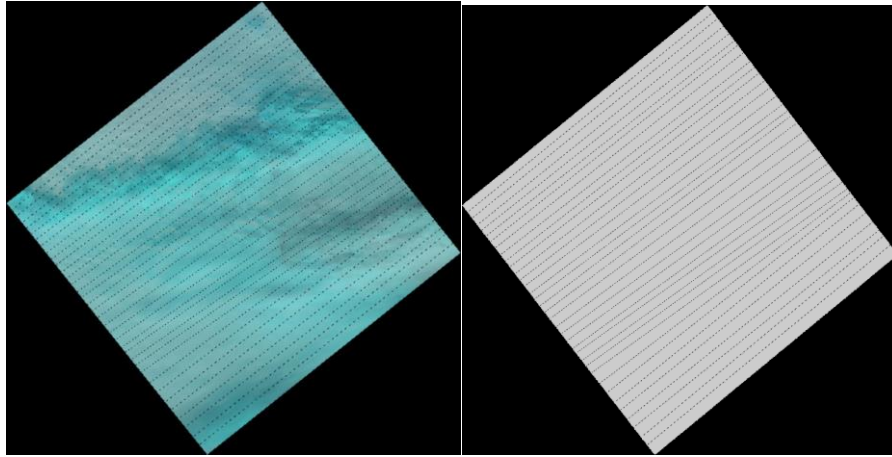
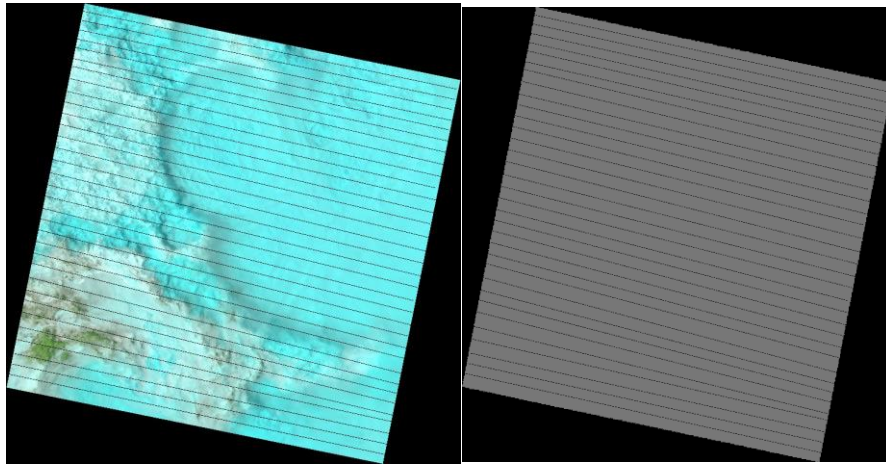


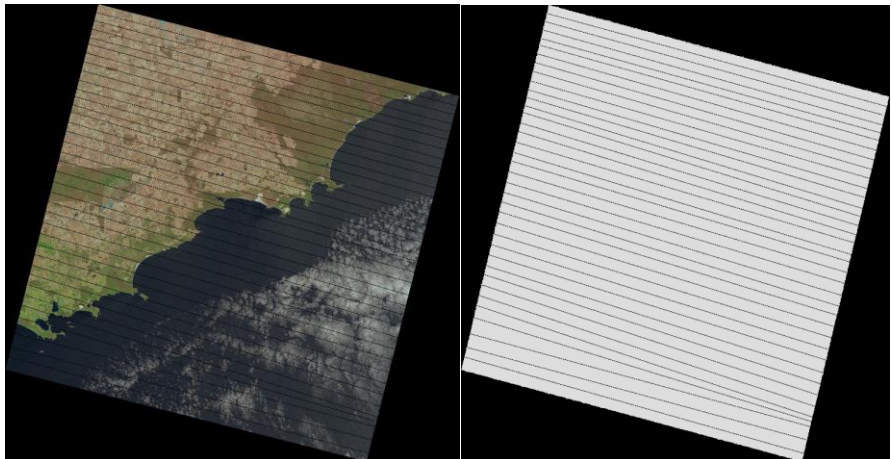
Ilustración 2 Imagen Landsat, grosor 4pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha)



*Ilustración 3 Imagen Landsat, grosor 4pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha)*

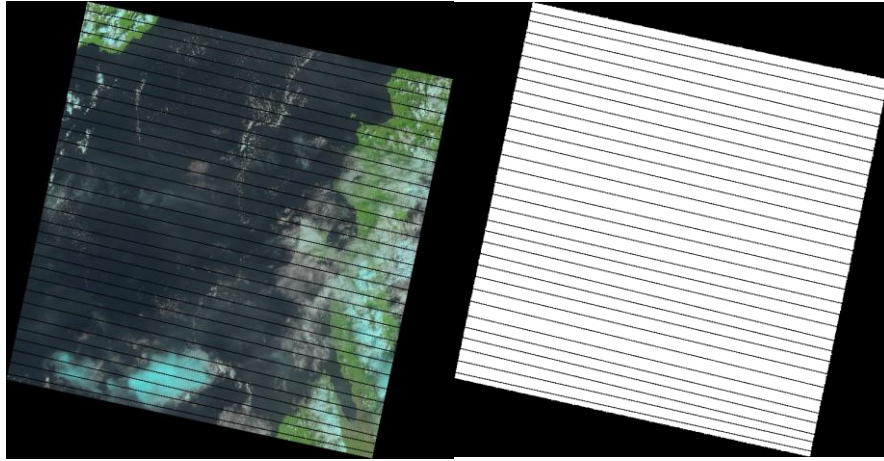


*Ilustración 4 Imagen Landsat, grosor 7pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha)*

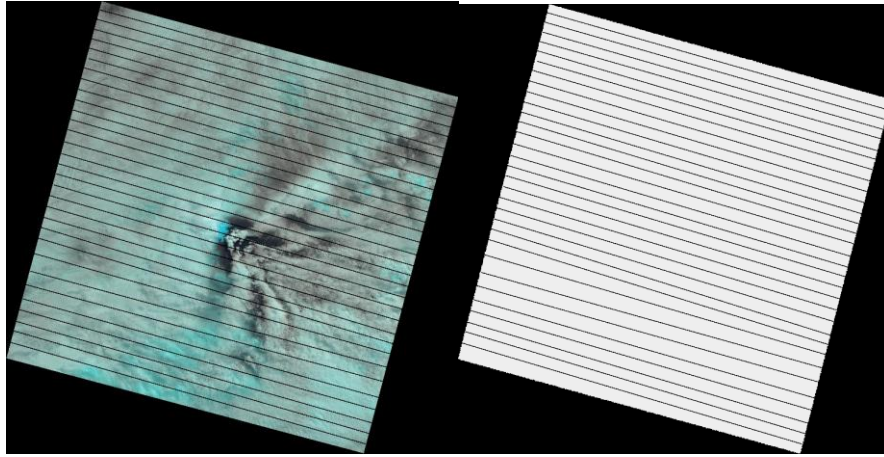


*Ilustración 5 Imagen Landsat, grosor 7pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha)*

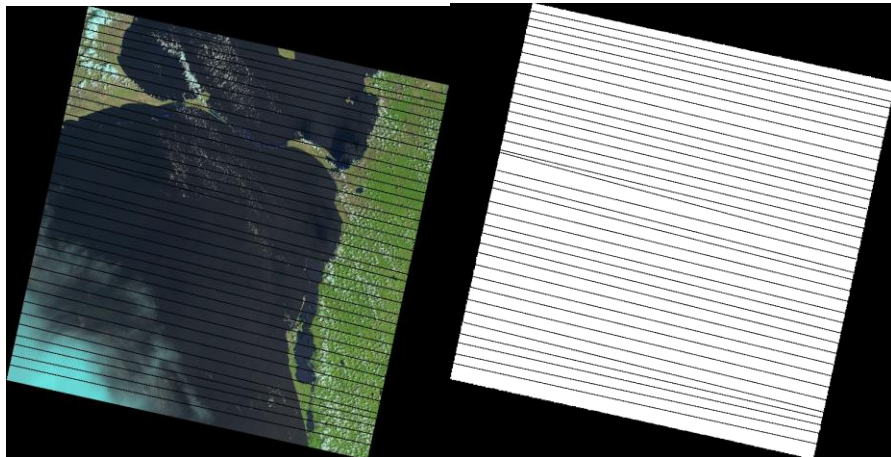




*Ilustración 6 Imagen Landsat, grosor 7pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha)*



*Ilustración 7 Imagen Landsat, grosor 14pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha)*



*Ilustración 8 Imagen Landsat, grosor 14pt (izquierda). Imagen de gaps producida(derecha)*

Para complementar aún más la eficacia del presente algoritmo frente al algoritmo de “Segmentación binaria con Otsu multinivel” se procedió a evaluar el presente algoritmo con las mismas métricas con que se evaluó en su momento el algoritmo anterior utilizando una nueva y más extensa muestra de imágenes satelitales diferente a la ya mostrada en los Gráficos 1 y 2(24 imágenes TIFF representando las 8 bandas de 3 imágenes satelitales Landsat 7). Los valores que fueron utilizados para el algoritmo “Segmentación binaria con Otsu multinivel” fueron el PSNR y el RMSE, mismos que se utilizaron en el presente algoritmo para denotar la mejora ofrecida por el mismo.

En la Tabla 3 se puede observar que el valor de PSNR del presente algoritmo está dentro del rango de 20 dB a 40 dB y de acuerdo con el documento contra el que se está comparando el PSNR mide la diferencia entre 2 imágenes, la original y la imagen estimación, donde mayor es el valor, mayor es la calidad o similitud [18]

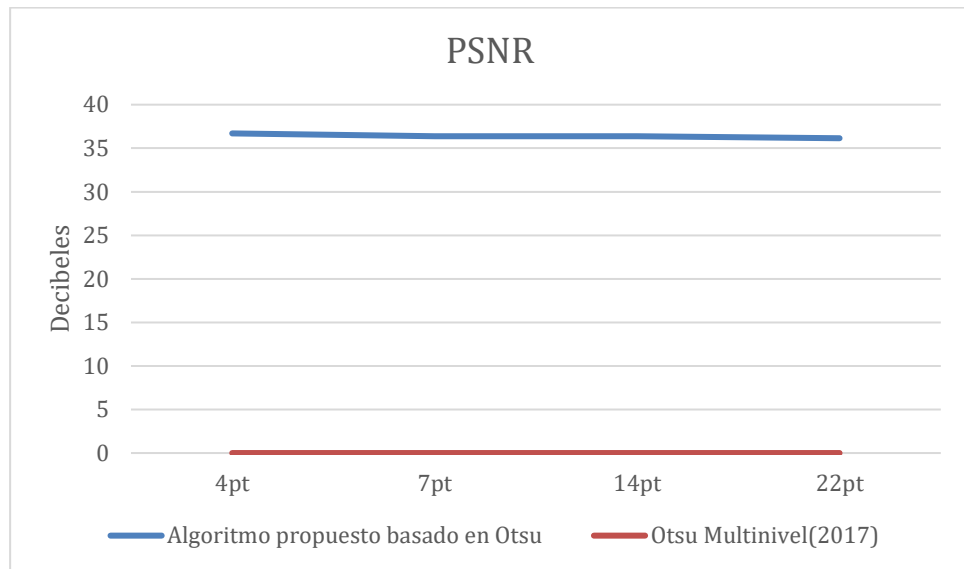


Gráfico 1. Muestra la ventaja del procedimiento propuesto sobre el algoritmo de “Segmentación binaria con Otsu multinivel”

En la tabla 3 se puede observar como a raíz de que el grosor del gap en imágenes satelitales, este se mantiene prácticamente cercano a cero en el procedimiento propuesto por el presente documento.

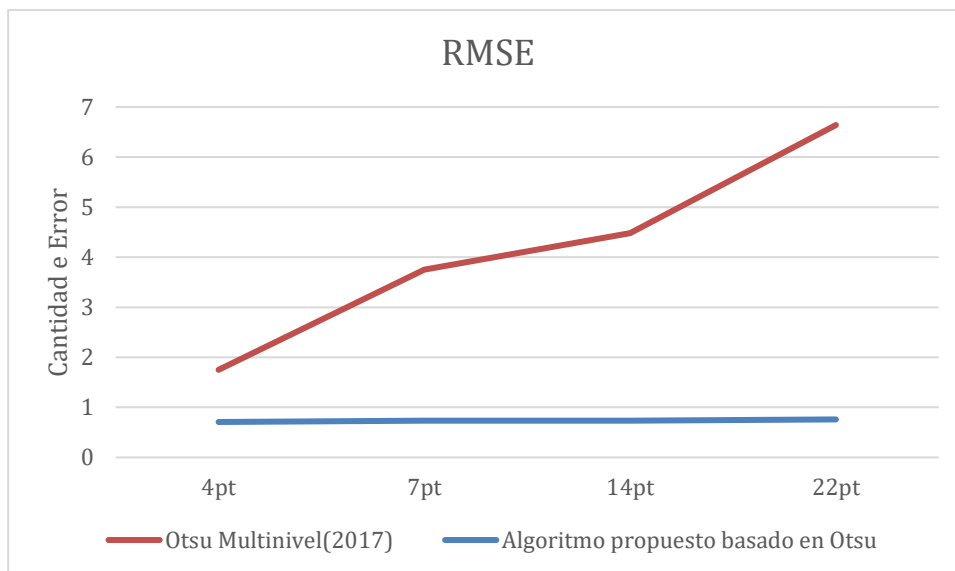


Gráfico 2 Muestra la ventaja del procedimiento propuesto sobre el algoritmo de “Segmentación binaria con Otsu multinivel”

En el grafico anterior se puede apreciar como el rango de error entre la imagen original y la imagen a comparar (imagen resultante del trabajo propuesto para color azul, imagen resultante del algoritmo de Otsu multinivel para color naranja) para el presente algoritmo es prácticamente constante, a diferencia contra el algoritmo que se compara donde el rango de error incrementa cada vez mas según aumenta el grosor de la línea gap

Tabla 3. Valores con los que fueron graficados los gráficos anteriores

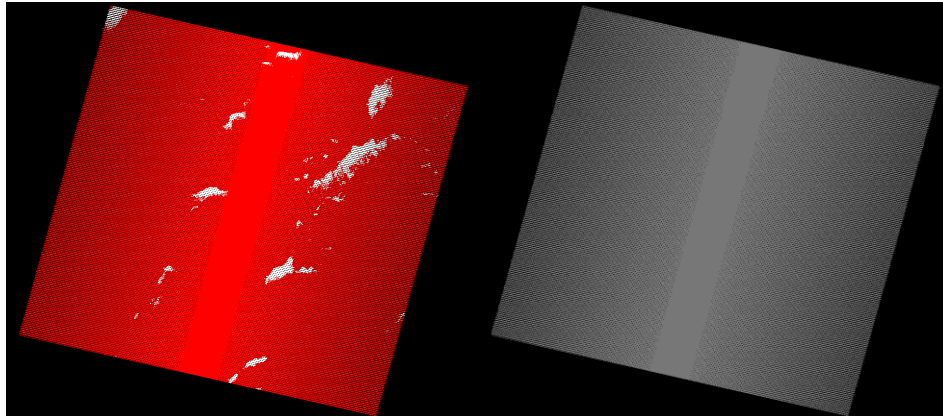
<b>Gap 4 pts</b>	<b>PSNR</b>	<b>RMSE</b>
<i>Procedimiento Propuesto</i>	36.70	0.7076
<i>Algoritmo “Segmentación binaria con Otsu multinivel”</i>	18.83	1.75
<b>Gap 7 pts</b>	<b>PSNR</b>	<b>RMSE</b>
<i>Procedimiento propuesto</i>	36.36	0.7368
<i>Algoritmo “Segmentación binaria con Otsu multinivel”</i>	18.60	3.71
<b>Gaps 14 pts</b>	<b>PSNR</b>	<b>RMSE</b>
<i>Procedimiento propuesto</i>	36.38	0.7362
<i>Algoritmo “Segmentación binaria con Otsu multinivel”</i>	18.48	4.48

Como se puede observar en la tabla 3 el procedimiento propuesto da un valor de PSNR mucho mayor a comparación del algoritmo de Hough, dando como resultado una comparación más fiel y fidedigna hacia la imagen contra la que fue comparada así

mismo, el resultado del cálculo RMSE da un cálculo muy cercano a cero (cero es total similitud entre los datos comparados), tal y como se expresó en el punto 3.3 del presente documento (Mediciones de calidad en imágenes).

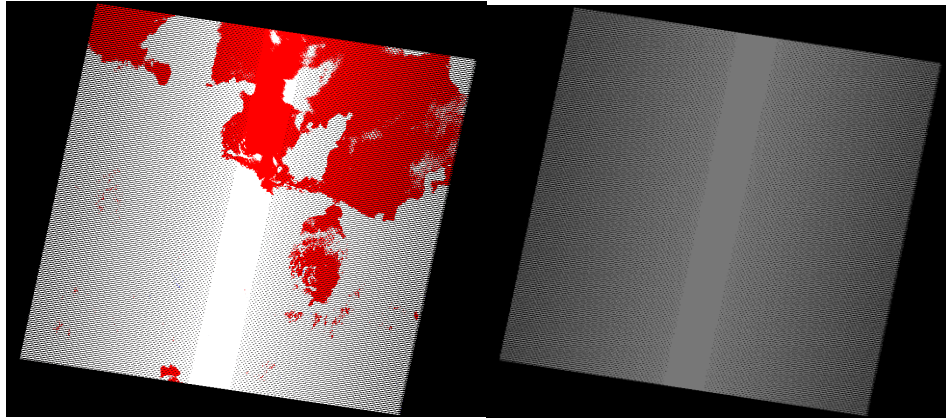
### ***5.1.2. Ventajas frente al documento “Algoritmo de Hough para reconocimiento de Gaps/Bordes”***

El presente algoritmo presenta una serie de ventajas sobre el algoritmo de “Hough”, tal como el reconocimiento de líneas gap sin importar su grosor y en imágenes satelitales completas de 8000 x 7000 pixeles a diferencia de las imágenes satelitales que hace uso el algoritmo de “Hough” que son un subconjunto de 4500 x 4500 pixeles [11]. Otro punto donde sobresale el presente algoritmo es la identificación de todas las líneas gap, a diferencia del algoritmo de “Hough” que falla en reconocer las líneas gap de la parte final de la imagen que está evaluando [11]. Las principales ventajas del presente algoritmo se encuentran al utilizarlo con la banda térmica de las imágenes satelitales de Landsat 7 “LandsatLook Images with Geographic Reference”, así como cualquier banda de las imágenes satelitales de Landsat 7 “Level-1 GeoTIFF Data Product ” ambos formatos disponibles en la página de “United States Geological Survey - USGS”

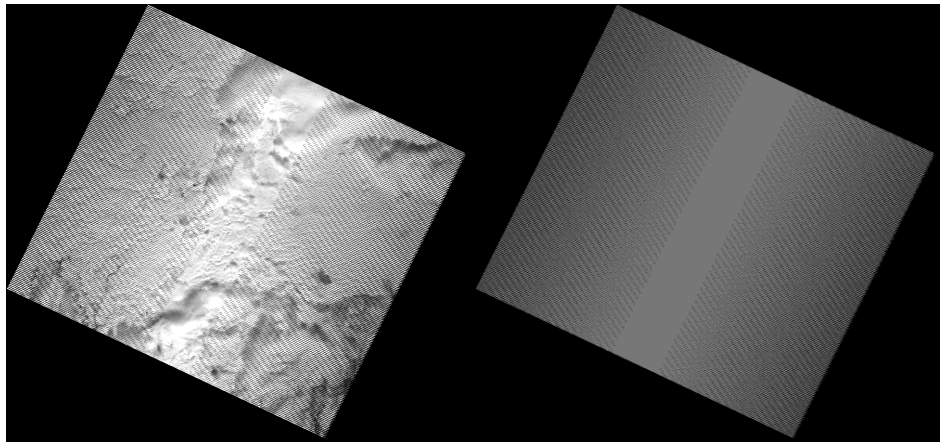


*Ilustración 9 Imagen Landsat, banda térmica (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*

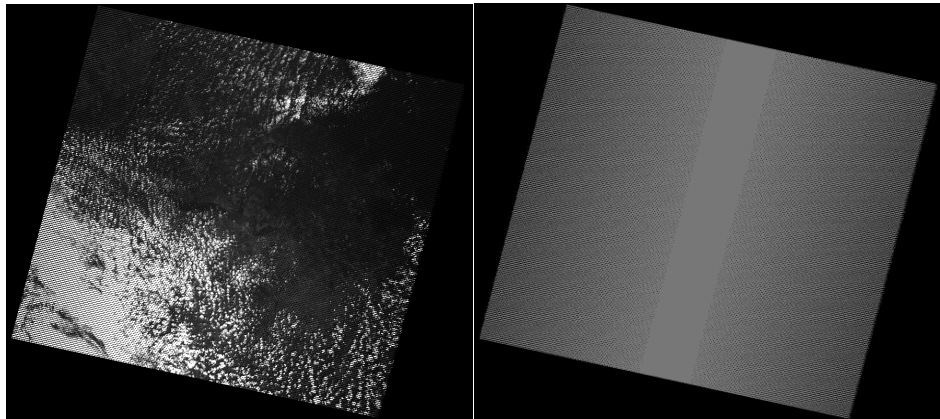




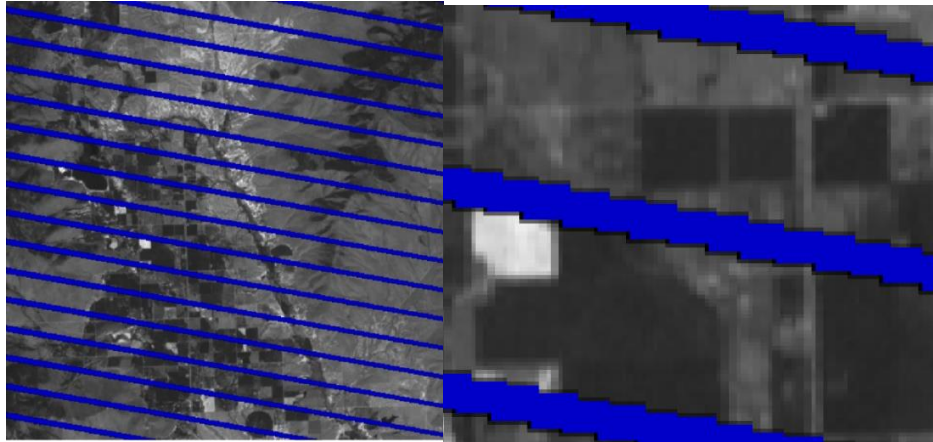
*Ilustración 10 Imagen Landsat, banda térmica (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



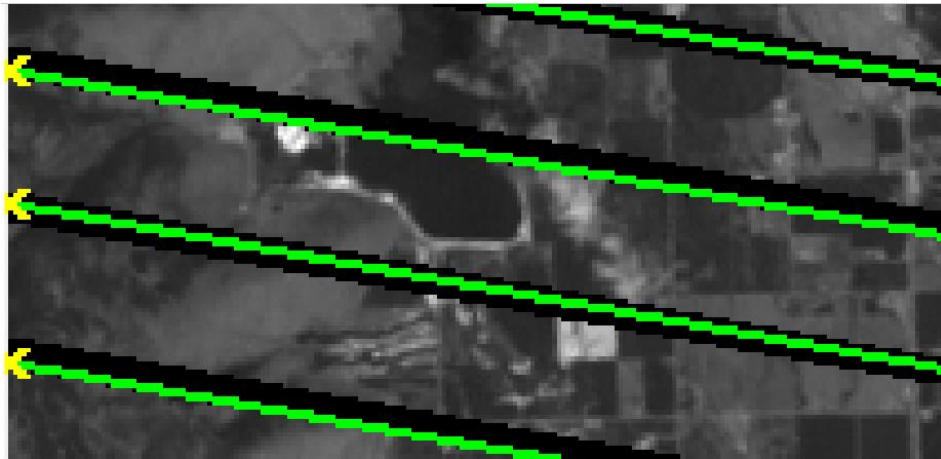
*Ilustración 11 Imagen Landsat, banda 2 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



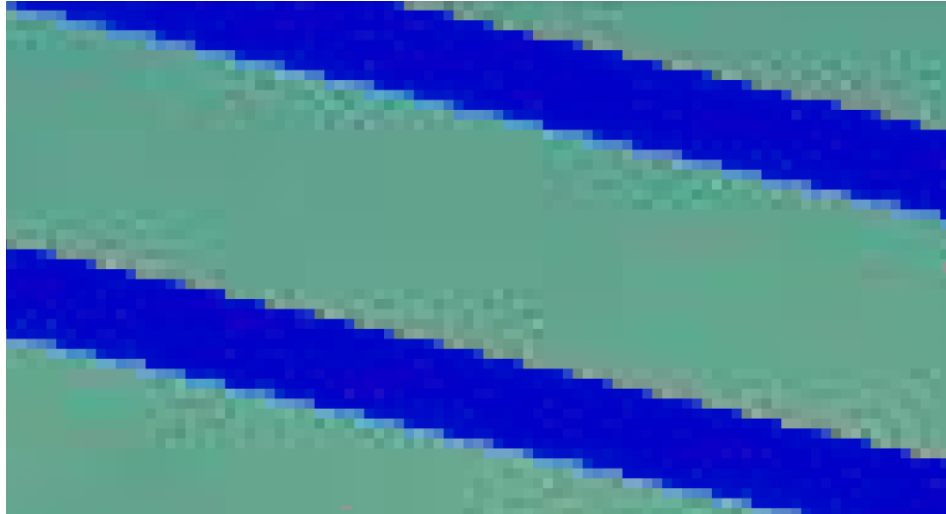
*Ilustración 12 Imagen Landsat, banda 3 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



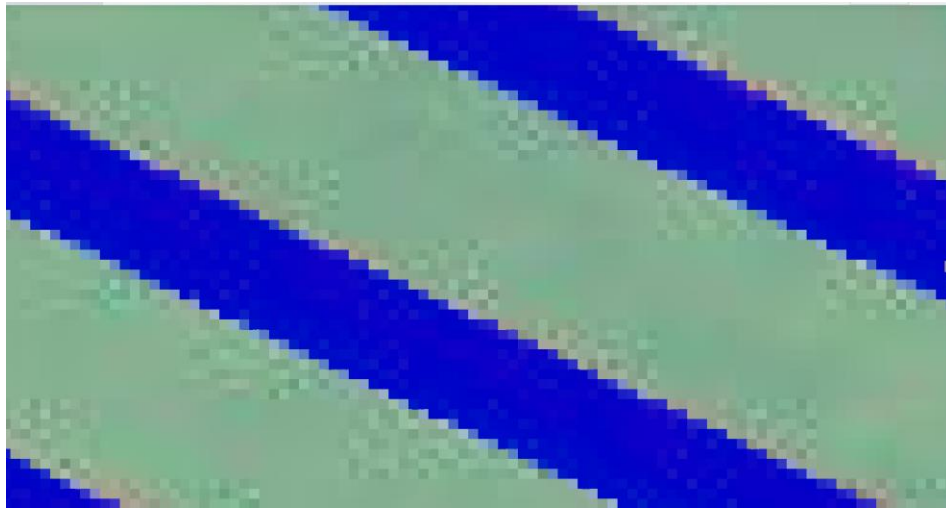
*Ilustración 13 Imagen Landsat tomada del documento del algoritmo de "Hough" (izquierda). Acercamiento a la misma imagen para mayor detalle (derecha).*



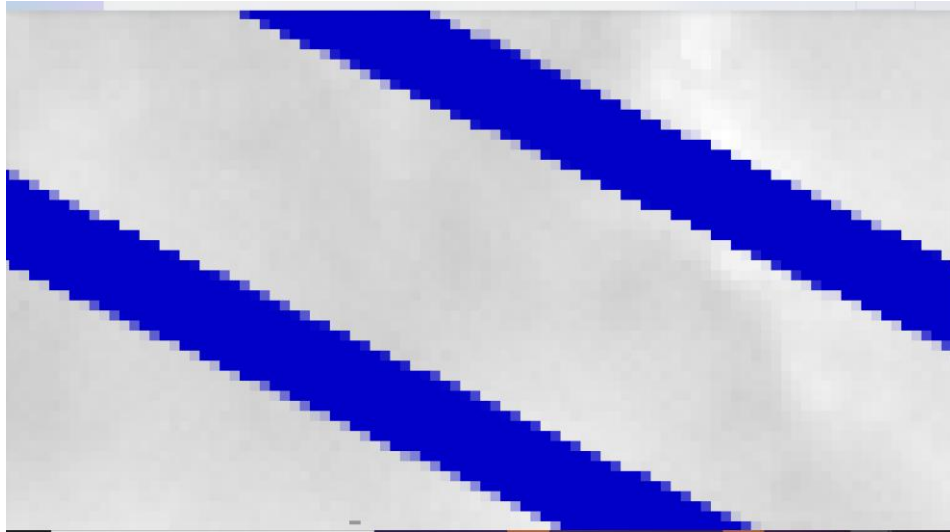
*Ilustración 14 Imagen Hough1 del documento del algoritmo de "Hough" donde se puede observar en la línea 2 y 4 como falla al reconocer gaps de diferente grosor.*



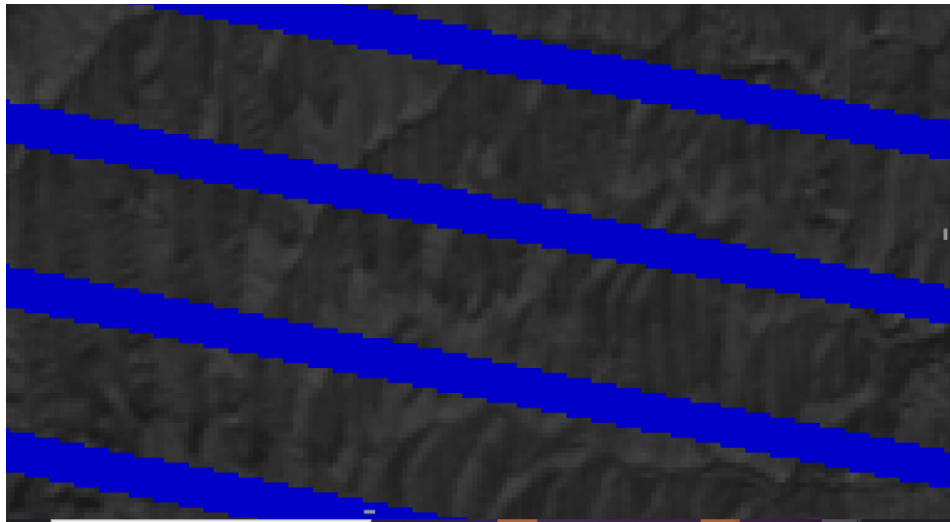
*Ilustración 15 Imagen Landsat14 generada por el procedimiento propuesto por este documento donde se puede apreciar su cubrimiento de líneas gap de diferente grosor (Banda Térmica).*



*Ilustración 16 Imagen Landsat15 generada por el procedimiento propuesto por este documento donde se puede apreciar su cubrimiento de líneas gap de diferente grosor (Banda Térmica).*



*Ilustración 17 Imagen Landsat16 generada por el procedimiento propuesto por este documento donde se puede apreciar su cubrimiento de líneas gap de diferente grosor (Banda 2).*



*Ilustración 18 Imagen Landsat 17 generada por el procedimiento propuesto por este documento donde se puede apreciar su cubrimiento de líneas gap de diferente grosor (Banda 3).*

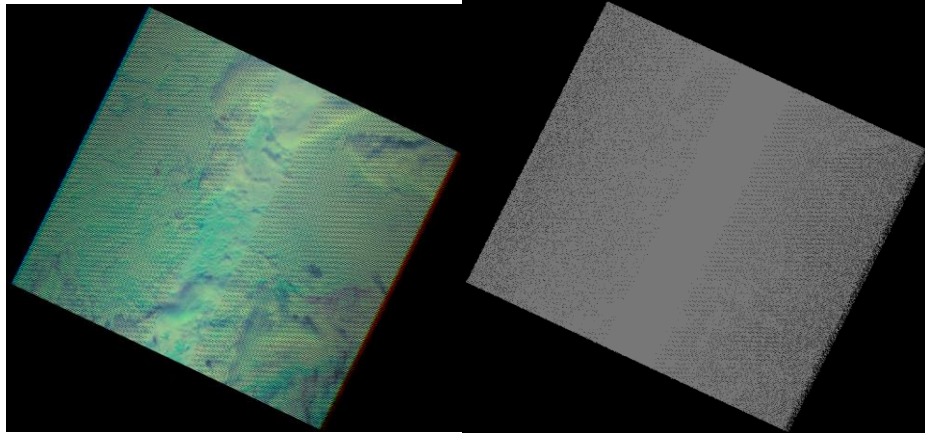
### **5.1.3 Resultados del procedimiento propuesto por cada banda procesada del satélite Landsat 7**

#### **5.1.3.1 Resultados en imágenes satelitales TIFF “LandsatLook Images with Geographic Reference”**

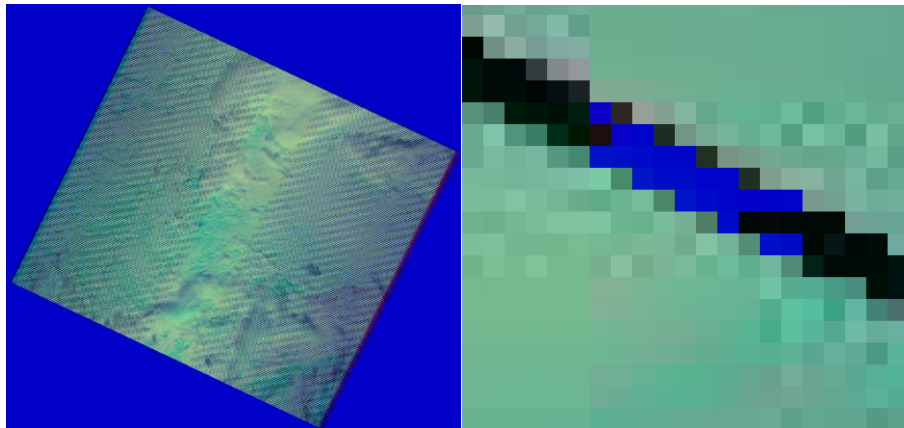
Después de realizar una serie de experimentos con el conjunto de imágenes “LandsatLook Images with Geographic Reference”, se puede llegar a la conclusión de que la mejor banda para obtener la mayor cantidad de gaps posibles es con la banda térmica. Con las bandas restantes, no se obtuvieron mejores resultados que al procesar la banda térmica.



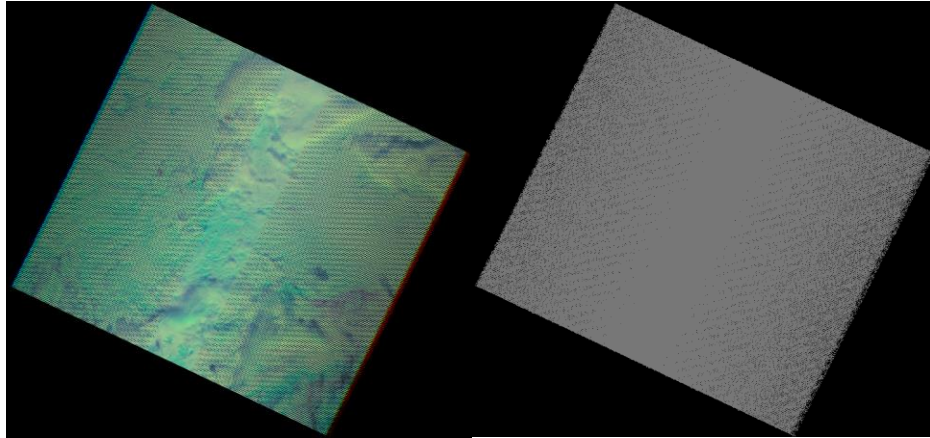
A continuación, el resultado de un conjunto de imágenes “LandsatLook Images with Geographic Reference” procesadas por el procedimiento propuesto por el presente documento.



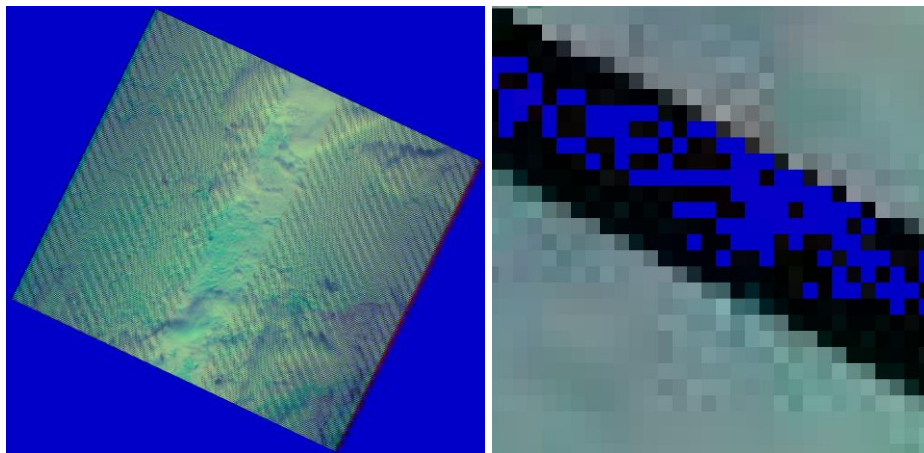
*Ilustración 19 Imagen Landsat, banda 1 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



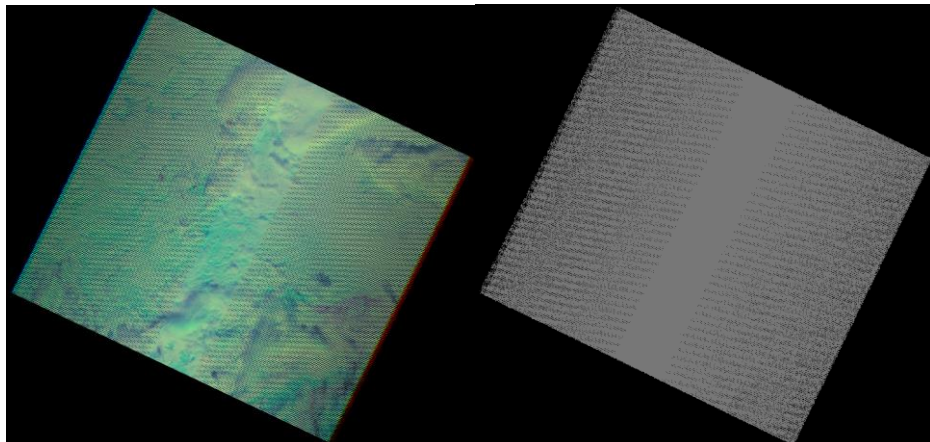
*Ilustración 20 Imagen Landsat rellenada con todos los gaps encontrados (color azul lado izquierdo), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda1)*



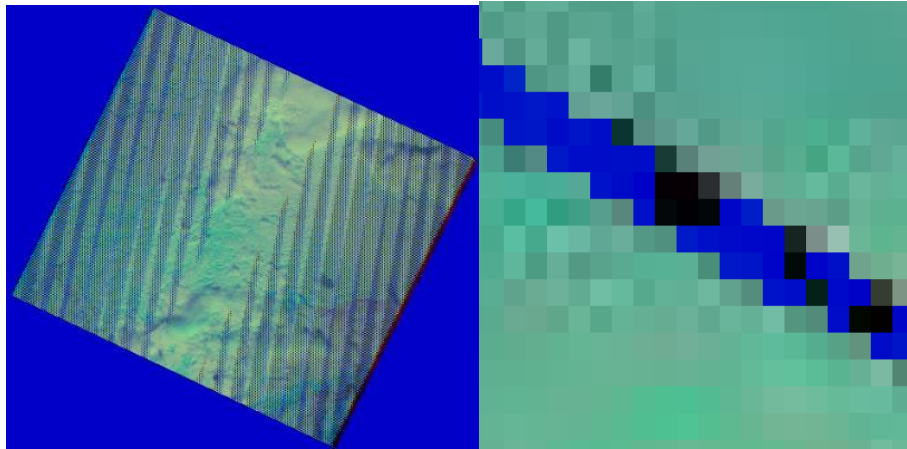
*Ilustración 21 Imagen Landsat, banda 2 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



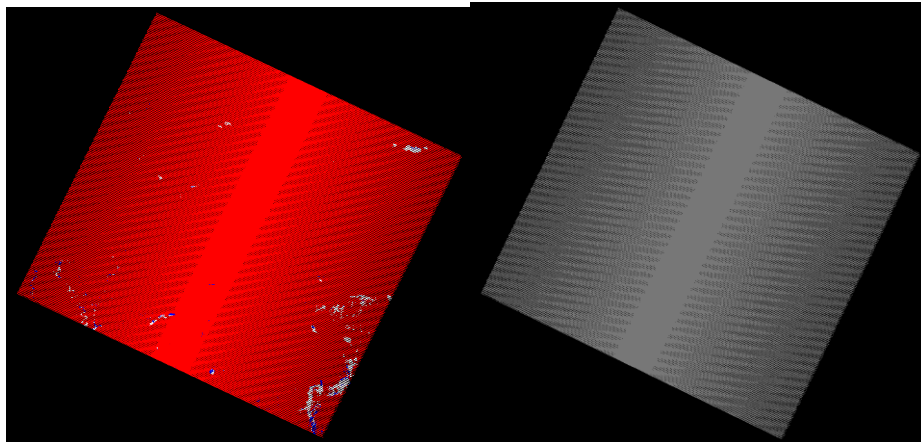
*Ilustración 22 Imagen Landsat rellenada con todos los gaps encontrados (color azul lado izquierdo), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda2)*



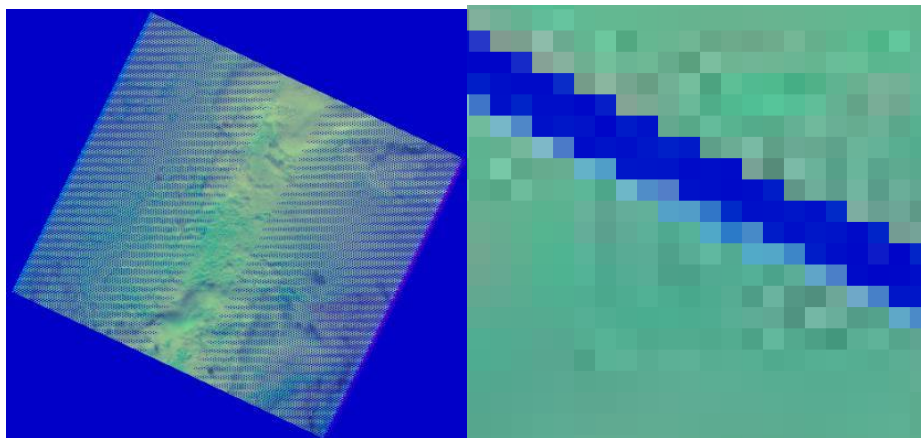
*Ilustración 23 Imagen Landsat, banda 3 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



*Ilustración 24 Imagen Landsat rellenada con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda3)*



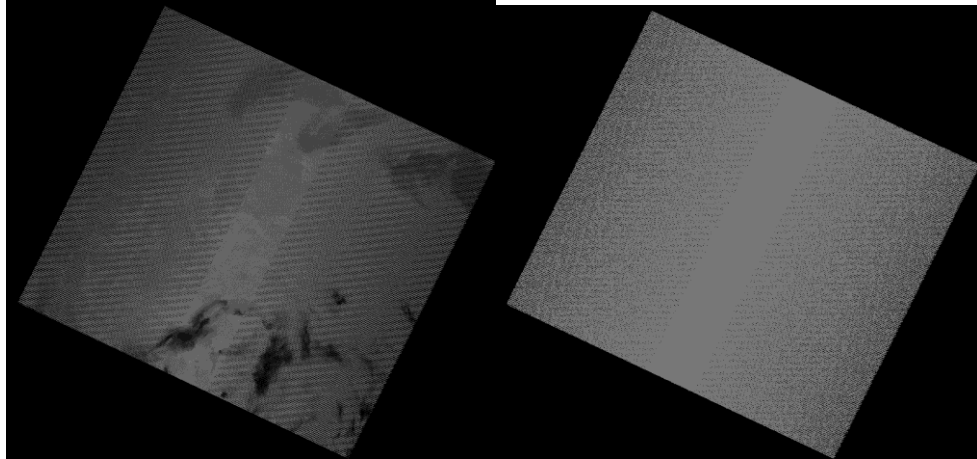
*Ilustración 25 Imagen Landsa, banda térmica (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



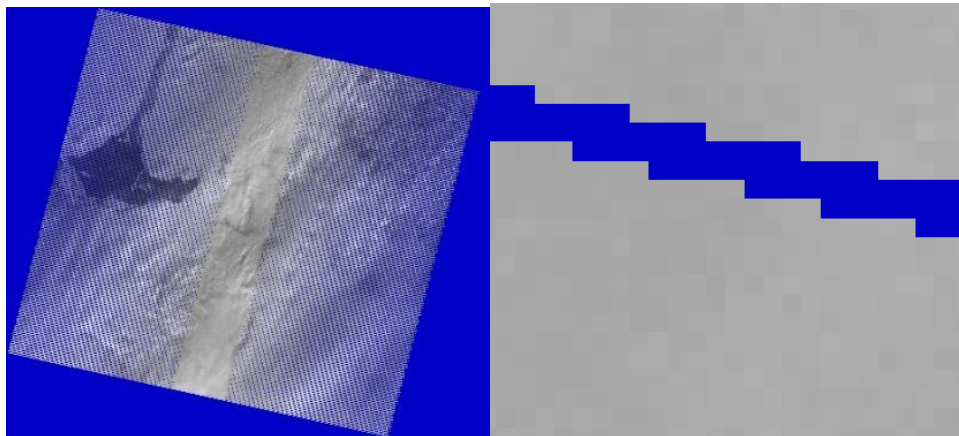
*Ilustración 26 Imagen landat rellenada con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda Térmica)*

### ***5.1.3.2 Resultados en imágenes TIFF “Level-1 GEOTIFF Data Product”***

De acuerdo con el United States Geological Survey, son las imágenes satelitales de más alta calidad [22], de la cual se encuentran disponibles las 8 bandas satelitales TIFF, sin compresión alguna y en su tamaño real de 8000 x 7000 píxeles aproximadamente. A continuación, se muestra el resultado de cada una de las bandas con el procedimiento propuesto por el presente documento, así como una tercera imagen que demuestra la gran calidad por parte de este algoritmo a la hora de identificar gaps sobre este conjunto de imágenes.

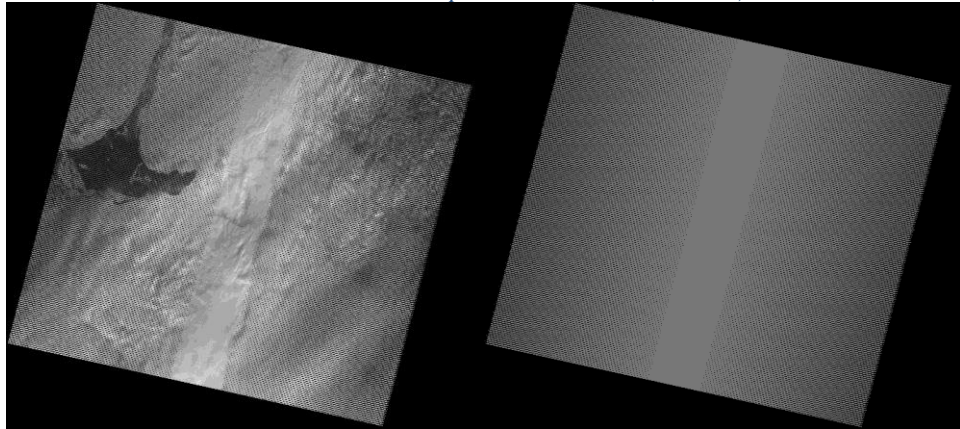


*Ilustración 27 Imagen Landsat, banda 1 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*

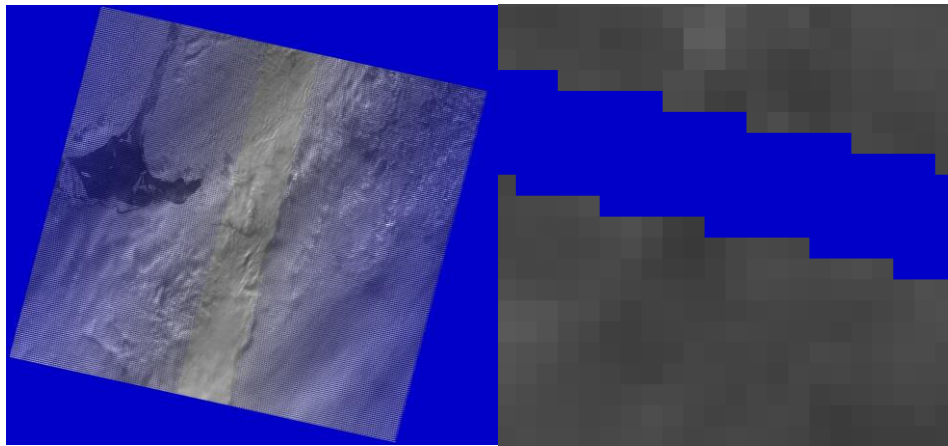




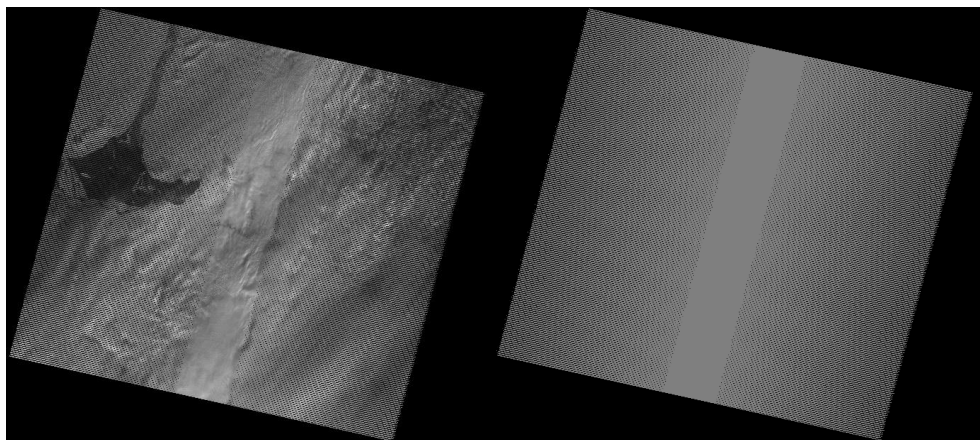
*Ilustración 28 Imagen Landsat rellenada con todos los gaps encontrados (color azul lado izquierdo), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 1)*



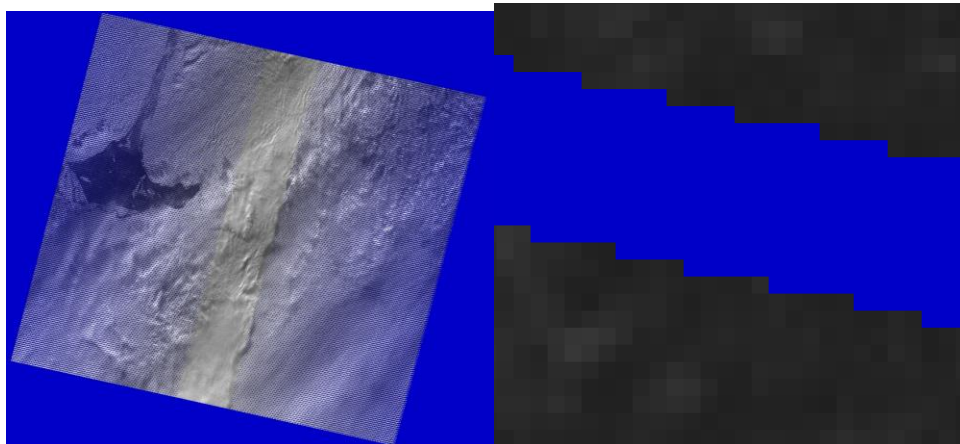
*Ilustración 29 Imagen Landsat, banda 2 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



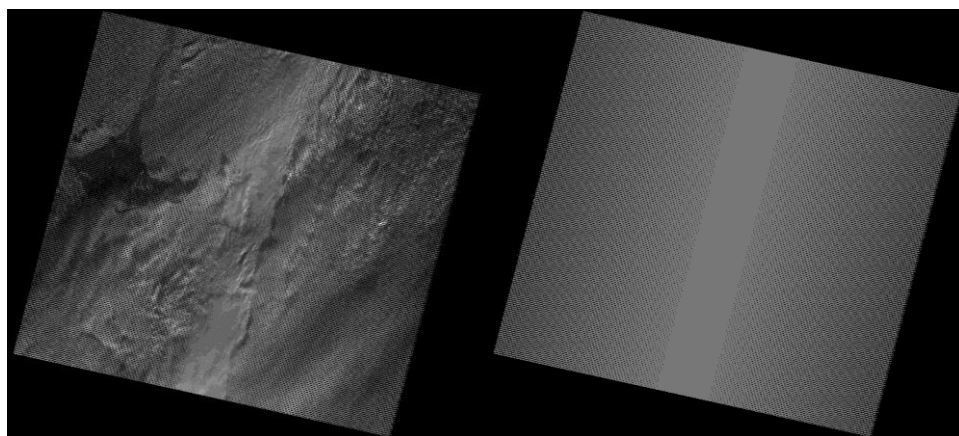
*Ilustración 30 Imagen Landsat rellenada con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 2)*



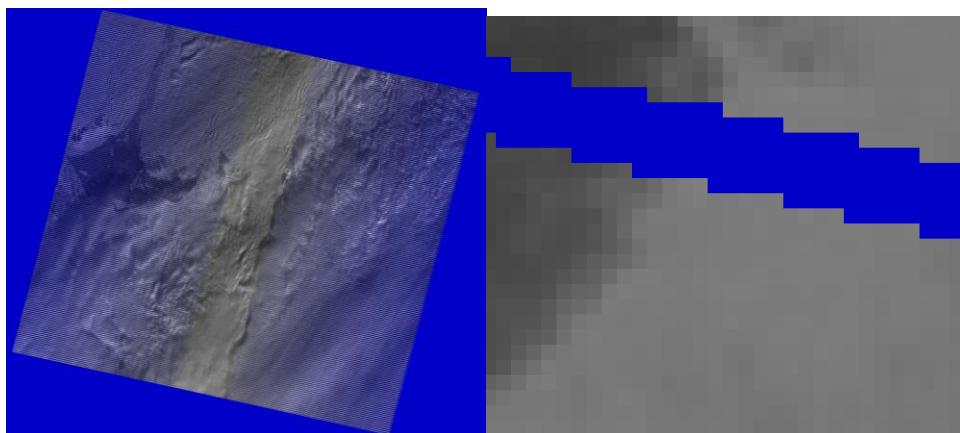
*Ilustración 31 Imagen Landsat, banda 3 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



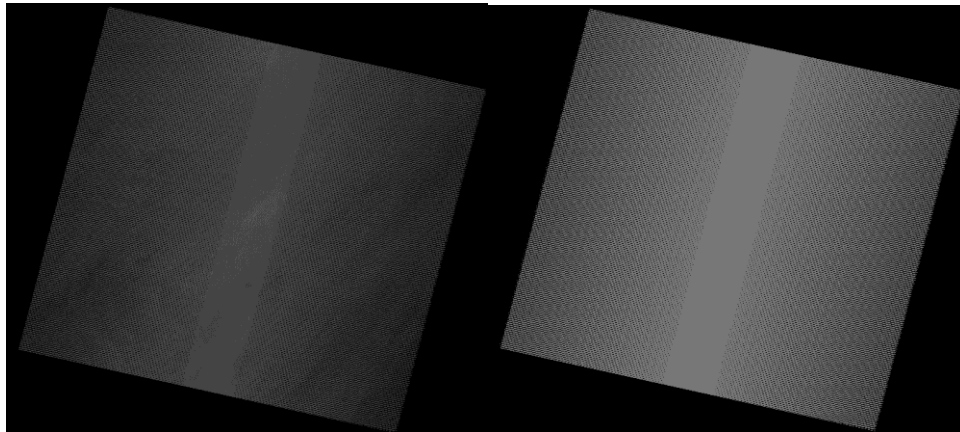
*Ilustración 32 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 3)*



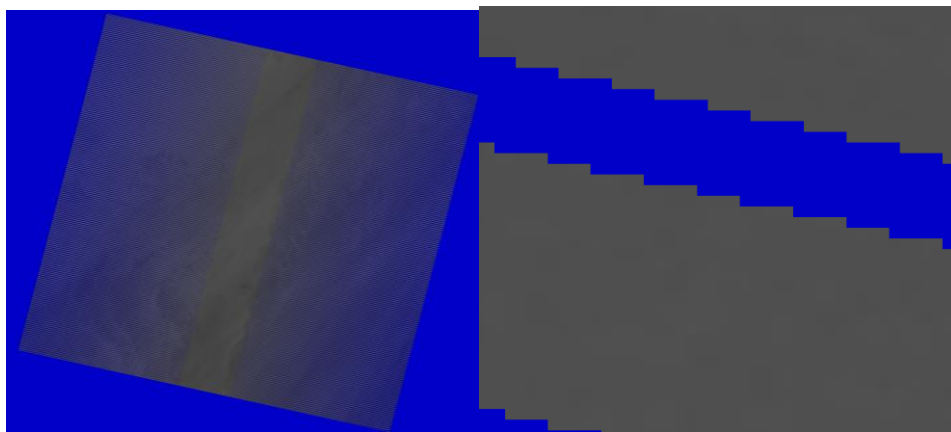
*Ilustración 33 Imagen Landsat, banda 4 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



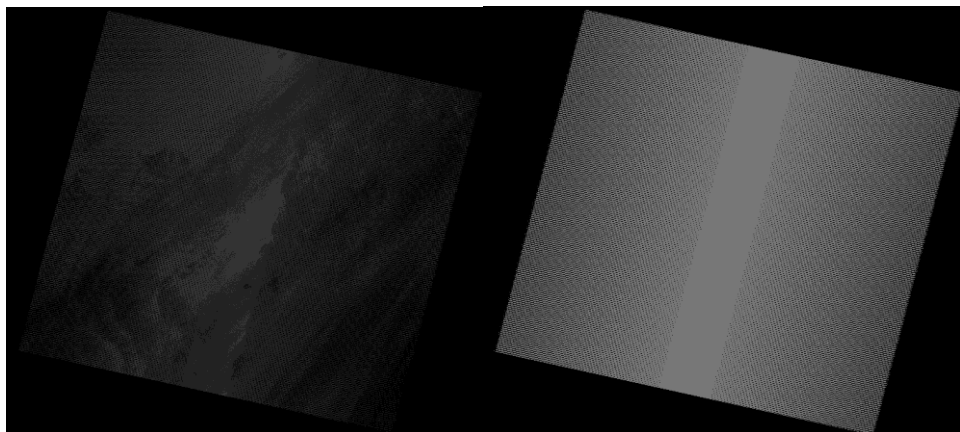
*Ilustración 34 Imagen Landsat rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 4)*



*Ilustración 35 Imagen Landsat, banda 5 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*

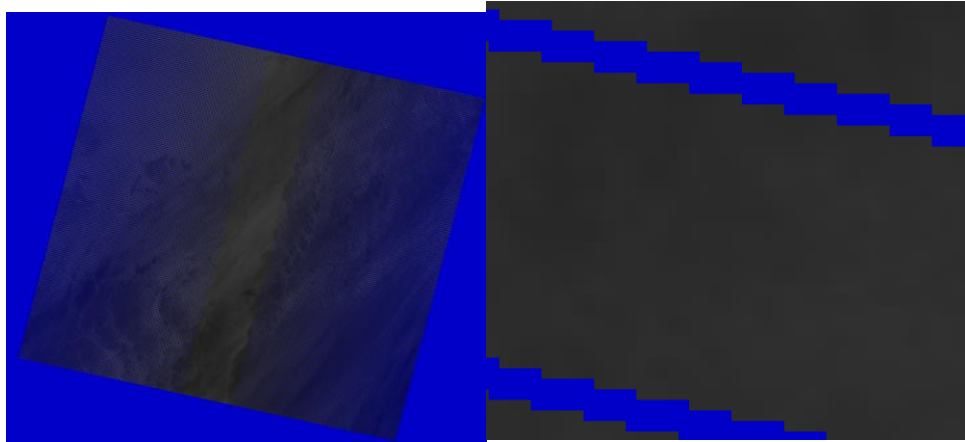


*Ilustración 36 Imagen Landsat rellenada con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 5)*

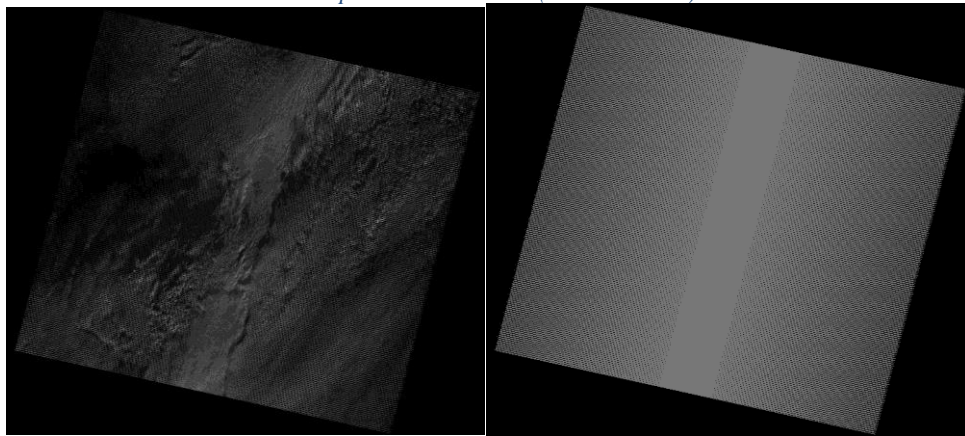


*Ilustración 37 Imagen Landsat, banda térmica (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*

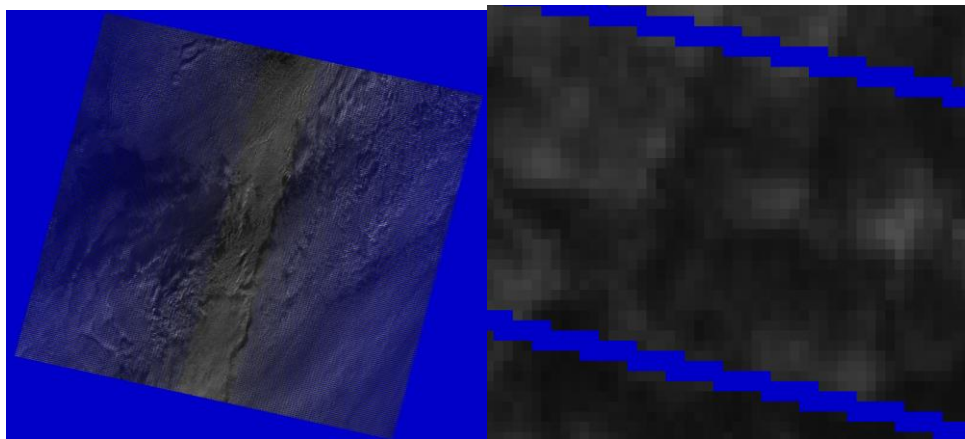




*Ilustración 38 Imagen Landsat37 rellena con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda térmica)*

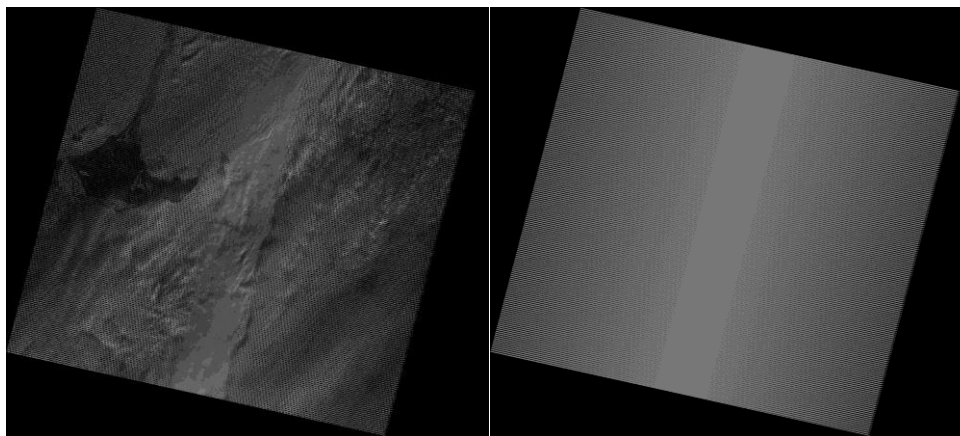


*Ilustración 39 Imagen Landsa, banda 7 (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*

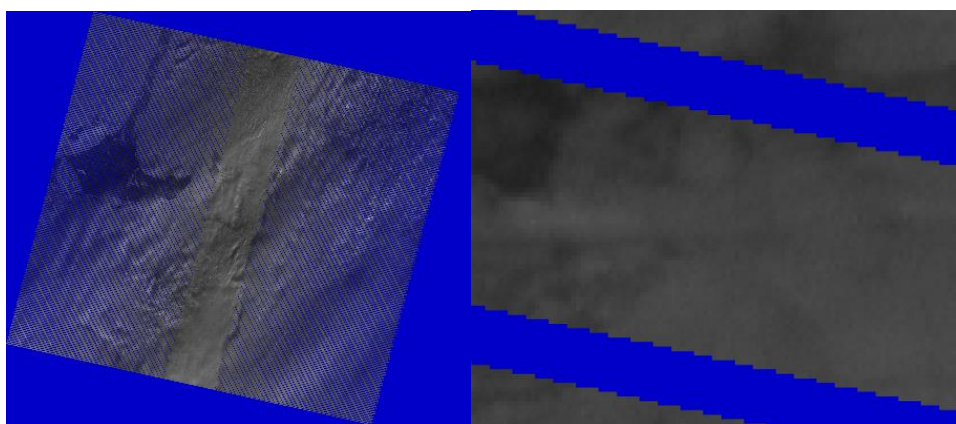


*Ilustración 40 Imagen Landsat con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda 7)*





*Ilustración 41 Imagen Landsat, banda pancromática (izquierda). Imagen de gaps producida (derecha)*



*Ilustración 42 Imagen Landsat rellenada con todos los gaps encontrados (color azul), a su derecha un acercamiento del resultado del presente documento (Banda pancromática)*

## 5.2 Discusión

De acuerdo con los diferentes experimentos realizados por el presente documento, se muestra el resultado, sin importar el conjunto de imágenes a utilizar, que dentro de la banda térmica es donde se puede obtener el mayor número de gaps de una imagen satelital. El presente documento se compara contra los dos algoritmos más representativos del estado del arte, “Algoritmo de Hough para reconocimiento de Gaps/Bordes” (2019) y “Algoritmo de segmentación binaria con Otsu multinivel” (2017).

Para el algoritmo de 2017, se mostraron los resultados que fueron mejores por el procedimiento propuesto en las diferentes medidas con las que el mismo documento se respalda que es la medición PSNR (grafico 1) y la medición RMSE (grafico 2), dando en ambos casos resultados mejores valores de calidad y un menor valor de error cuadrático. Cabe destacar que las ventajas del algoritmo presentado por este documento demuestra su eficacia con imágenes reales (imágenes satelitales Landsat 7) y sintéticas(imágenes satelitales Landsat 8 con gaps artificiales introducidos con algún

editor de imágenes) a diferencia del algoritmo de 2017 donde solo se hace uso de imágenes sintéticas Landsat 8 con gaps artificiales introducidos con algún editor de imágenes, así como un uso único del algoritmo de Otsu, donde el algoritmo de 2017 ejecuta un número N de veces, para a partir de este punto obtener un conjunto de N valores umbral y así generar un número N de imágenes. Para la generación de imágenes procesadas por Otsu el algoritmo de 2017 toma 2 valores umbrales de los obtenidos por las N iteraciones de Otsu, un valor umbral como mínimo y un valor umbral como máximo. Como último paso, las imágenes pasan a ser imágenes binarias para que posteriormente el algoritmo sea capaz de escoger la mejor entre el conjunto obtenido. El procedimiento propuesto por el presente documento no solo propone un mejor reconocimiento de gaps (Gráfico 1, Gráfico 2 y Tabla 3) sobre el algoritmo de 2017, además de una simplificación del mismo para un mejor resultado y demostrado con imágenes reales Landsat 7 y no solo imágenes sintéticas como su predecesor (“Algoritmo de segmentación binaria con Otsu multinivel” (2017)).

Para el algoritmo del 2019, se obtuvo un resultado superior en uno de sus apartados más débiles como es el identificar gaps de diferente grosor. El algoritmo de 2019 es incapaz de reconocer gaps de diferente grosor (imagen 14), a diferencia de los diferentes experimentos realizados por el presente trabajo (imágenes 13,15,16,17,18). Toda imagen de experimentación contenida dentro de este documento es válida para sostener este punto, además de la debilidad del algoritmo de 2019 para identificar las líneas gap del final de una imagen satelital [11].

---

## 6. CONCLUSIONES

---

***Resumen:** En este capítulo se presentan las conclusiones y trabajo futuro con relación a el presente trabajo recepcional*

## **6.1. Conclusiones**

Este trabajo recepcional presenta un procedimiento para la identificación de gaps en una imagen satelital Landsat 7. Por la experimentación realizada, se dedujo que de todas las bandas que componen la imagen, la banda térmica fue la que al procesarse ofreció los mejores resultados. Por esta cuestión, sobre esta banda se sugiere encontrar los gaps, para que una vez que estén identificados, se pueda trabajar sobre cualquier banda, o inclusive, sobre una imagen compuesta por diferentes bandas (RGB, por ejemplo). Se presenta una mejora sobre los algoritmos encontrados en el estado del arte, ya que el procedimiento propuesto, se mostró de forma experimental, robusto ante los diferentes grosores de las líneas de gaps, así como se mejoró en los valores de PSNR y RMSE manejados por otros algoritmos publicados. La herramienta propuesta, ofrece una mejora en la detección de gaps, lo cual permitirá una mayor precisión al aplicar el procedimiento de corrección de los mismos.

## **6.2. Trabajo Futuro**

Como trabajo futuro, se trabajará en el proceso posterior de corrección de los valores de los gaps, una vez identificados estos por el procedimiento generado. Además, se trabajará en cuestión del manejo del algoritmo de Otsu, para poder adecuarlo a otras bandas distintas a la térmica. También, se verá la posibilidad de paralelizar el algoritmo, en el supuesto caso de que se quisieran procesar lotes de imágenes satelitales en lugar de procesar una a una.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1]  
Loay Edwar George, Ghazali Sulong, and Asmaa Sadiq Abdul Jabar, "Survey on gap filling algorithms in Landsat 7 ETM+ images," May 2014.
- [2]  
Seulki Lee, Minji Cho, and Changwook Lee, "An Effective Gap Filtering Method for Landsat ETM+ SLC-Off Data," Dec. 2016.
- [3]  
Gaohong Yin, Gregoire Mariethoz, and Matthew F. McCabe, "Gap-Filling of Landsat 7 Imagery Using the Direct Sampling Method." MDPI, 17-Jul-2016.
- [4]  
Z. Xiaolin, L. Desheng, and C. Jin, "A new geostatistical approach for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images," Dec. 2011.
- [5]  
E. Tomppo, M. Haakana, M. Katila, and J. Peräsaari, Eds., *Multi-source national forest inventory: methods and applications*, 1. Ed. Berlin: Springer Netherland, 2008.
- [6]  
S. Jayaraman, S. Esakkirajan, and T. Veerakumar, *Digital image processing*. New Delhi; London: Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- [7]  
A. Botella Plana, A. Muñoz Bolas, A. Pérez Navarro, J. C. Olmedillas Hernández, J. Rodríguez Lloret, and R. Olivella González, *Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática*. Barcelona: Universitat Oberta de Catalunya, 2011.
- [8]  
A. F. Costa, G. Humpire-Mamani, and A. J. M. Traina, "An Efficient Algorithm for Fractal Analysis of Textures," in *2012 25th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images*, Ouro Preto, Brazil, Aug. 2012, pp. 39–46, doi: [10.1109/SIBGRAPI.2012.15](https://doi.org/10.1109/SIBGRAPI.2012.15).
- [9]  
L. Spirkovska, *A Summary of Image Segmentation Techniques*. Ames Research Center, 1993.
- [10]  
S. El Fellah, M. Rziza and M. El Haziti, "An Efficient Approach for Filling Gaps in Landsat 7 Satellite Images," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 62-66, Jan. 2017, doi: [10.1109/LGRS.2016.2626138](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2626138).

- [11]  
J. Miao, X. Zhou, T. Huang, T. Zhang and Z. Zhou, "A Novel Inpainting Algorithm for Recovering Landsat-7 ETM+ SLC-OFF Images Based on the Low-Rank Approximate Regularization Method of Dictionary Learning With Nonlocal and Nonconvex Models," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 57, no. 9, pp. 6741-6754, Sept. 2019, doi: 10.1109/TGRS.2019.2908381.
- [12]  
A. Rares, M. J. T. Reinders and J. Biemond, "Edge-based image restoration," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 14, no. 10, pp. 1454-1468, Oct. 2005, doi: 10.1109/TIP.2005.854466.
- [13]  
Yi-Wei Yu and Jung-Hua Wang, "Image segmentation based on region growing and edge detection," IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.99CH37028), Tokyo, Japan, 1999, pp. 798-803 vol.6, doi: 10.1109/ICSMC.1999.816653.
- [14]  
S. K. Setarehdan and S. Singh, *Advanced Algorithmic Approaches to Medical Image Segmentation: State-of-the-Art Applications in Cardiology, Neurology, Mammography and Pathology*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [15]  
"Información Técnica Resumida Landsat 7 ETM." GeoService Peru.
- [16]  
"Landsat 7 ETM+." Servicio de Teledetección. Área de Sistemas de Información Geocientífica.
- [17]  
S. Winkler, *Digital Video Quality: Vision Models and Metrics*. John Wiley & Sons, 2013.
- [18]  
A.N. Netravali and B.G. Haskell, *Digital Pictures: Representation, Compression, and Standards (2nd Ed)*, Plenum Press, New York, NY
- [19]  
M. Toscano, "Diseño e implementación de una calculadora de PSNR para evaluar las prestaciones de servicios de vídeo bajo demanda sobre redes MANET." Universidad Politecnica de Catalunya, Jul. 2008.
- [20]  
L. C. S. Ayçaguer, *Excursión a la regresión logística en ciencias de la salud*. Ediciones Díaz de Santos, 1994.

[21]

J. A. Gras, *Métodos y técnicas avanzadas de análisis de datos en ciencias del comportamiento*. Edicions Universitat Barcelona, 1996.

[22]

“Landsat Level-1 Processing Details.” <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-level-1-processing-details> (accessed Nov. 12, 2020).

[23]

“OpenCV: Image Thresholding.” [https://docs.opencv.org/3.4/d7/d4d/tutorial\\_py\\_thresholding.html](https://docs.opencv.org/3.4/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html) (accessed Nov. 14, 2020).

[24]

R. G. Pontius, O. Thontteh, and H. Chen, “Components of information for multiple resolution comparison between maps that share a real variable,” *Environ Ecol Stat*, vol. 15, no. 2, pp. 111–142, Jun. 2008, doi: [10.1007/s10651-007-0043-y](https://doi.org/10.1007/s10651-007-0043-y).