



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

PLUVIOREADER: UN PROGRAMA AUTOMÁTICO PARA LA DIGITALIZACIÓN DE PLUVIOGRAMAS

**(PLUVIOREADER: AN AUTOMATIC SOFTWARE FOR
DIGITIZING PLUVIOGRAPH STRIP CHARTS)**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
mención en Ingeniería Civil

ANDRÉS GONZALO BURBOA LIZAMA
CONCEPCIÓN-CHILE
2019

Profesor Guía: José Vargas Baecheler
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

En Chile, los registros continuos de precipitación provienen de estaciones que, utilizando pluviógrafos analógicos de flotador y sifón, generan pluviogramas semanales al trazar una línea sobre papel graduado. La extracción de valores de precipitación desde los pluviogramas se realiza comúnmente con técnicas manuales, pero estos métodos requieren de gran dedicación de tiempo y el observador puede introducir errores. En consecuencia, los registros suelen procesarse sólo de manera superficial, sin considerar la totalidad de los eventos de precipitación.

Para extraer toda la información contenida en los pluviogramas, se desarrolló un *software* automático de extracción de datos de precipitación, capaz de generar información de alta resolución temporal a partir de la imagen digital de un pluviograma semanal. El *software*, llamado PluvioReader, consiste en un conjunto de rutinas escritas en MATLAB, capaces de reconocer la línea en la imagen, trazar su posición, y convertirla en una serie de precipitación, entre otras cosas. El programa se basa en un método también propuesto en este trabajo, que se ajusta a la manera tradicional de medir la precipitación en las mejores estaciones meteorológicas de Chile.

En la implementación del *software* se utilizó una base de datos de 10 años de pluviogramas semanales, de los cuales nueve son de la estación El Tepual de Puerto Montt, y uno es de la estación Carriel Sur de Concepción. Para su elaboración, se propuso una versión preliminar del *software*, que fue probada y corregida con imágenes de la base de datos, mejorándola de forma iterativa hasta obtener los resultados esperados para los pluviogramas más complejos.

El *software* se ha empleado en pluviogramas de diferentes estaciones de Chile, obteniendo con éxito valores de precipitación con una resolución temporal de 5 min. Para medir su desempeño, un grupo de cinco usuarios digitalizó cinco pluviogramas diferentes con el programa PluvioReader, estimando además las precipitaciones máximas de forma manual. Los resultados del método manual presentaron diferencias de hasta 5.5 mm (14 %) entre un usuario y otro, mientras que con PluvioReader no superaron los 0.2 mm (4 %). Además, el tiempo de ejecución promedio de PluvioReader fue de sólo 2 minutos.



*It's better to burn out,
Than to fade away
(Neil Young)*

AGRADECIMIENTOS

El siguiente trabajo se desarrolló gracias al financiamiento del Proyecto CONICYT IDeA-FONDEF CA13I10190. Además, la Dirección Meteorológica de Chile facilitó la información necesaria para su desarrollo.

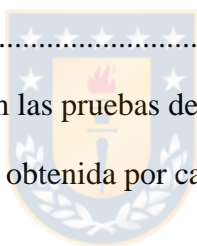
Le agradezco a Claudio Meier, quien fue mi profesor guía hasta hace más de un año atrás, por motivar y encaminar gran parte del desarrollo de este trabajo, y a José Vargas, mi profesor guía actual, por recibirme como su tesista en el cierre de este proceso. Del mismo modo, doy gracias a mis amigos, especialmente a los que participaron en las pruebas de PluvioReader o leyeron algunos pasajes de este trabajo; a Carolina, que también leyó y comentó parte del trabajo; y a mi familia, por su apoyo en general cuando decidí continuar mis estudios.

Por último, le doy las gracias a la Universidad de Concepción por su aporte en mi formación personal y profesional. En particular, a la Dirección de Postgrado, que me benefició con una beca de exención del arancel durante gran parte del desarrollo de este magíster; y a la Facultad de Ingeniería y Departamento de Ingeniería Civil, que junto a la Dirección de Postgrado financiaron la presentación de este trabajo en el XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Hipótesis de trabajo	2
1.3 Objetivo general	3
1.4 Objetivos específicos	3
1.5 Metodología de trabajo	3
1.6 Organización de la Tesis	4
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Introducción al procesamiento de imágenes digitales	6
2.2 Información utilizada en cada método	7
2.2.1 Características de los pluviogramas	8
2.2.2 Características de la imagen digital	10
2.2.3 Otros datos necesarios	10
2.3 Ventajas y desventajas de cada método	11
2.4 Descripción de procesos	12
2.4.1 Identificación de la línea	12
2.4.2 Trazado de la línea	14
2.4.3 Otros procesos relevantes	17
CAPÍTULO 3: EL SOFTWARE PLUVIOREADER	18
3.1 Método propuesto	18
3.1.1 Procesos previos	19

3.1.2	Identificación de la línea.....	25
3.1.3	Unión y eliminación de elementos	30
3.1.4	Trazado de la línea.....	41
3.1.5	Conversión a valores de precipitación.....	50
3.2	Características del software	52
CAPÍTULO 4: RESULTADOS		56
4.1	Desempeño del método.....	56
4.2	Pruebas de usuarios y precisión del método	62
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS		71
REFERENCIAS		73
ANEXOS		76
Anexo 3.1	Diagramas de flujo.....	76
Anexo 4.1	Imágenes utilizadas en las pruebas de usuarios	82
Anexo 4.2	Precipitación máxima obtenida por cada usuario	83



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Diferencias entre los pluviogramas utilizados en cada método.....	9
Tabla 2.2	Diferencias entre las imágenes digitales utilizadas en cada método	10
Tabla 4.1	Resumen de las características de las imágenes seleccionadas para la evaluación de desempeño de PluvioReader	56
Tabla 4.2	Precipitaciones máximas (mm) obtenidas para las tres imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila.....	60
Tabla 4.3	Resumen de las características de las imágenes seleccionadas para evaluar la precisión de PluvioReader	62
Tabla 4.4	Tiempos de ejecución del programa PluvioReader (mm:ss) para los cinco usuarios e imágenes. Se indican los tiempos promedio en la última fila y columna.....	63
Tabla 4.5	Promedio de las precipitaciones máximas (mm) obtenidas en las imágenes (Im.) con el método manual (M) y con el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos valores (Dif.), con su promedio en la última fila.....	64
Tabla 4.6	Mínimo (Min.), máximo (Max.) y promedio (Prom.) de las diferencias porcentuales de cada usuario (como valor absoluto)	65
Tabla 4.7	Rango de las precipitaciones máximas (mm) obtenidas en las imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR).....	67
Tabla 4.8	Desviación estándar de las precipitaciones máximas (mm) obtenidas en las imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la razón entre ambos valores (M/PR), con sus promedios en las últimas filas.....	68
Tabla 4.9	Cantidad de usuarios que obtuvo una precipitación menor con el método manual que con PluvioReader y su porcentaje respecto al total de valores calculados	69
Tabla A.4.2.1	Precipitaciones máximas (mm) obtenidas por el Usuario 1 en las cinco imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila.....	83
Tabla A.4.2.2	Precipitaciones máximas (mm) obtenidas por el Usuario 2 en las cinco imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila.....	84

Tabla A.4.2.3Precipitaciones máximas (mm) obtenidas por el Usuario 3 en las cinco imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila.....	85
Tabla A.4.2.4Precipitaciones máximas (mm) obtenidas por el Usuario 4 en las cinco imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila.....	86
Tabla A.4.2.5Precipitaciones máximas (mm) obtenidas por el Usuario 5 en las cinco imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila.....	87



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Detalle de un pluviograma semanal proveniente de una estación meteorológica en Chile (Estación Carriel Sur, desde el martes 7 hasta el domingo 12 de julio de 1987).....	5
Figura 2.2	Muestra de imagen en escala de gris (izquierda), con un primer acercamiento (centro) y un segundo acercamiento indicando los valores “ a_{ij} ” (derecha). Formato de 8-bit ...	6
Figura 2.3	Muestra de imagen en RGB (arriba) con su intensidad de rojo (abajo, izquierda), verde (abajo, centro) y azul (abajo, derecha). Formato de 24-bit.....	7
Figura 2.4	Diferencias entre pluviogramas procedentes de pluviógrafos de cubeta basculante (izquierda; Deidda <i>et al.</i> , 2007) y de flotador y sifón (derecha; Jaklič <i>et al.</i> , 2016)	8
Figura 2.5	Ejemplo del proceso de identificación de la línea, con una muestra de la imagen RGB (izquierda) y la imagen binaria resultante (derecha)	13
Figura 2.6	Ejemplo del proceso de trazado de la línea, con la imagen binaria antes (izquierda) y después (derecha) de su ejecución, mostrando además la línea resultante (verde)	14
Figura 3.1	Imagen binaria de la grilla “ BW_{grid} ” (arriba) y el patrón de <i>peaks</i> resultante de la suma vertical del valor de sus píxeles (abajo)	20
Figura 3.2	Muestras de tres pluviogramas, presentando los más comunes (izquierda), con colores más pálidos (centro) y con tonalidad de fondo amarilla (derecha)	20
Figura 3.3	Segmento de recta trazado sobre una imagen (izquierda) y perfil de intensidad de color de dicho segmento (derecha), resaltando las zonas del perfil que se encuentran sobre el fondo (flechas negras) y la grilla (flechas verdes).....	21
Figura 3.4	Ejemplo de una imagen de mínimos “ RGB_{min} ”	22
Figura 3.5	Izquierda: distribución de frecuencia acumulada de “ RGB_{min} ”, puntos asociados al 90, 70, 50, 30 y 10 % de los píxeles con menor intensidad (azul) y punto de cambio de tendencia (rojo). Derecha: imágenes binarias correspondientes a los puntos de la parte izquierda	23
Figura 3.6	Representación gráfica del cálculo de los <i>peaks</i> de columna (izquierda) y de fila (derecha), mostrando además la enumeración de cada uno de los <i>peaks</i>	25
Figura 3.7	Segmento de recta trazado sobre una imagen (izquierda) y su perfil de intensidad de color RGB (derecha), destacando los lugares donde el perfil cruza la línea (flechas azules) ..	26
Figura 3.8	Ejemplo de una imagen de diferencia de azul “ DIF^B ”.....	27

- Figura 3.9 Izquierda: distribución de frecuencia acumulada de “**DIF^B**”, puntos asociados al 90, 70, 50, 30 y 10 % de los píxeles con menor intensidad (azul) y punto de cambio de tendencia (rojo). Derecha: imágenes binarias correspondientes a los puntos de la parte izquierda 28
- Figura 3.10 Resultados de la identificación de la línea para tres tipos de pluviogramas: comunes (izquierda), con colores más pálidos (centro) y con tonalidad amarilla (derecha) 29
- Figura 3.11 Acercamiento de una imagen binaria (izquierda) y su matriz de etiquetas asociada (derecha), visualizada como imagen y con el detalle del valor de sus componentes 31
- Figura 3.12 Eliminación de elementos en la parte izquierda de una imagen: imagen original (izquierda), imagen binaria (centro), indicando zonas de eliminación (superior e inferior en rojo, izquierda en azul), e imagen binaria con elementos de borde eliminados (derecha) 32
- Figura 3.13 Ejemplo de cálculo de las coordenadas extremas de un elemento, con el elemento correspondiente (a), la primera etapa delimitando al elemento (b; en rojo) y la segunda etapa con los 8 píxeles finales (c; en azul) 36
- Figura 3.14 Representación de la búsqueda de puntos de llegada para cada tipo de unión: vertical hacia arriba y abajo (a), horizontal (b) y oblicua (c). Posibles puntos de llegada en gris, destacándolos en azul para cada tipo de unión. Distancia de unión $d = 7$ píxeles 37
- Figura 3.15 Representación de los cuatro tipos de uniones entre segmentos: (a) vertical hacia arriba, (b) vertical hacia abajo, (c) horizontal y (d) oblicua; con distintas distancias de unión en cada caso. Los píxeles de las rectas de unión se muestran en color rojo 40
- Figura 3.16 Ejemplo de línea de vaciamiento con retroceso, con detalle de su inicio y final (Estación El Tepual, 21 de abril de 2006, alrededor de las 20:00 horas) 42
- Figura 3.17 Representación de la búsqueda de zonas de vaciamiento, incluyendo la imagen binaria original (izquierda); la envolvente superior e inferior, los *peaks* de cada envolvente, y los *peaks* eliminados (centro); y un acercamiento al inicio y final de los vaciamientos (derecha) 45
- Figura 3.18 Representación del proceso de trazado de una línea, con el acercamiento a un pluviograma (a), los píxeles de línea identificados “ bw_{ij} ” (b), los factores de ponderación “ w_{ij} ” presentados como una imagen en escala de grises (c), y la línea trazada en color rojo (d) 47
- Figura 3.19 Comparaciones entre diferentes trazados de línea. A la izquierda: utilizando la media ponderada ($\beta = 3$, en rojo) o el centroide de los píxeles ($\beta = 0$, en verde). A la derecha: con correcciones de “ i_{up} ” e “ i_{dw} ” (en rojo) y sin correcciones (en verde) 48

Figura 3.20	Presentación de la GUI del programa, con su menú principal mostrando cada uno de sus submenús (izquierda), junto al primer submenú con sus opciones (derecha).....	53
Figura 3.21	Ejemplo de parte de una imagen antes (izquierda) y después (derecha) del uso de la herramienta de borrado, eliminando en este caso timbres y escritura a mano.....	54
Figura 4.1	Pluviograma original (a), línea identificada en negro (b), línea trazada en rojo (c) y precipitación acumulada en azul (d); para la Imagen 1.1	57
Figura 4.2	Pluviograma original (a), línea identificada en negro (b), línea trazada en rojo (c) y precipitación acumulada en azul (d); para la Imagen 1.2	58
Figura 4.3	Pluviograma original (a), línea identificada en negro (b), línea trazada en rojo (c) y precipitación acumulada en azul (d); para la Imagen 1.3	59
Figura A.3.1.1	Diagrama de flujo del pre-proceso de determinación de los márgenes de la grilla	76
Figura A.3.1.2	Diagrama de flujo del proceso de identificación de la línea	77
Figura A.3.1.3	Diagrama de flujo del proceso de unión y eliminación de elementos. Primera parte: Inicio de la rutina y procedimientos previos.....	78
Figura A.3.1.4	Diagrama de flujo del proceso de unión y eliminación de elementos. Segunda parte: Procedimiento iterativo de unión y fin de la rutina	79
Figura A.3.1.5	Diagrama de flujo del proceso de trazado de la línea	80
Figura A.3.1.6	Diagrama de flujo del proceso de conversión a valores de precipitación	81
Figura A.4.1.1	Pluviogramas utilizados en las pruebas de usuarios: Imagen 2.1 (a), Imagen 2.2 (b), Imagen 2.3 (c), Imagen 2.4 (d) e Imagen 2.5 (d)	82

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Diversas aplicaciones en hidrología e ingeniería requieren de series de precipitación de alta resolución temporal. La más común es la caracterización estadística de eventos extremos, que en general se presenta como curvas de intensidad-duración-frecuencia o IDF (Trefry *et al.*, 2005; Ben-Zvi, 2009; Haddad *et al.*, 2010). Por otro lado, también se utilizan en la calibración de modelos estocásticos de precipitación, como los de pulsos rectangulares (Koutsoyiannis y Onof, 2001; Cowpertwait *et al.*, 2007) o de cascada aleatoria (Molnar y Burlando, 2005; Licznar *et al.*, 2011). Además, otros usos relacionados a las curvas IDF son su proyección a futuro utilizando modelos climáticos (Mailhot *et al.*, 2007; De Paola *et al.*, 2014) o su obtención combinando series de baja y alta resolución temporal (Van de Vyver y Demarée, 2010).

Estos registros de precipitación provienen comúnmente de instrumentos de medición analógicos (pluviógrafos) y se encuentran en la forma de pluviogramas de papel. Por desgracia, transformar estos pluviogramas en valores de precipitación requiere de un post-proceso manual, que demanda gran dedicación de tiempo, pudiendo introducir errores de observación de un 5 a 7 % (Leonardi *et al.*, 2006). Con el fin de evitar dicho post-proceso, varios servicios meteorológicos a nivel mundial han reemplazado los aparatos de medición tradicionales por instrumentos digitales. Sin embargo, lo anterior no soluciona el problema por completo, ya que: (1) en otros sitios se sigue utilizando instrumentos analógicos, y (2) muchas estaciones meteorológicas, incluso aquellas que han reemplazado sus instrumentos, cuentan con décadas de registros antiguos que no han sido procesados.

La situación en Chile no es la excepción: los datos de precipitación de las mejores estaciones meteorológicas del país siguen registrándose en pluviogramas semanales, de papel, creados por instrumentos de flotador y sifón, y la gran mayoría de las estaciones llevan varias décadas de funcionamiento. En otras palabras, cada una de las estaciones en Chile crea un nuevo pluviograma todas las semanas, que se suma a las décadas de registros históricos (con miles, o decenas de miles de pluviogramas) almacenados en la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

Debido a lo anterior, se han desarrollado métodos computacionales para extraer la traza registrada desde la imagen digital de un pluviograma, entregando los valores de precipitación en archivos de texto o similares. Los mejores métodos son capaces de reconocer la línea del pluviograma y convertirla en precipitación de forma automática, solicitando sólo información como la posición de los ejes, el inicio y fin de la línea, o su color. De esta forma, se lograría una mayor precisión y un ahorro de tiempo significativo respecto al método manual, permitiendo digitalizar los registros históricos existentes para varias ciudades chilenas.

Sin embargo, la aplicación de estos métodos se encuentra limitada por las diferencias técnicas entre los pluviógrafos (y los pluviogramas) utilizados en cada país, ya que cada método se ha adaptado a los tipos de registros disponibles. La mayoría de los métodos (MEEDDM, 2014; Deidda *et al.*, 2007; Leonardi *et al.*, 2006) provienen de países donde se utilizan pluviógrafos de cubeta basculante, distintos a los de flotador y sifón existentes en Chile. Por otro lado, los métodos creados para pluviogramas de instrumentos de flotador y sifón (Jaklič *et al.*, 2016; Van Piggelen *et al.*, 2011), fueron desarrollados para registros diarios, lo cual no garantiza su correcto funcionamiento con pluviogramas semanales, cuya densidad de información es mucho mayor (las líneas están más cerca una de la otra, lo cual dificulta su lectura). Además, los métodos se implementan en programas computacionales que, en general, no son de libre disponibilidad, o son difíciles de usar si la interfaz gráfica de usuario (GUI, según sus siglas en inglés) es poco amigable.

Tomando en cuenta lo anterior, se ha desarrollado una herramienta digital para la extracción de valores de precipitación desde registros pluviográficos, adaptada a los pluviogramas típicos en Chile: registros semanales provenientes de pluviógrafos de flotador y sifón, con una línea de registro azul y una grilla verde de fondo. Se propone que los resultados de dicha herramienta son más precisos, alcanzando una resolución temporal mucho mayor a lo que es posible obtener mediante la extracción manual de la información.

1.2 Hipótesis de trabajo

El uso de herramientas computacionales para extraer valores de precipitación entrega resultados más precisos y reduce la cantidad y magnitud de los errores en comparación al método manual.

1.3 Objetivo general

Desarrollar un *software* que permita extraer valores de precipitación desde pluviogramas semanales obtenidos de instrumentos de flotador y sifón, facilitando el procesamiento de los registros históricos que posee la DMC.

1.4 Objetivos específicos

Realizar un análisis comparativo de los *softwares* existentes o los métodos documentados, identificando sus ventajas, así como brechas respecto al caso de estudio.

Comprender los procedimientos incorporados en los diferentes métodos, compararlos entre sí y, si fuera necesario, proponer procesos alternativos que se ajusten mejor a los tipos de registros chilenos.

Implementar el *software* y aplicarlo diferentes pluviogramas, comparando sus resultados con los obtenidos manualmente.



1.5 Metodología de trabajo

Se utilizó una base de datos de 10 años de imágenes digitales de pluviogramas semanales para la creación del *software*, compuesta por 319 imágenes (nueve años) de la estación El Tepual de Puerto Montt, y 53 imágenes (un año) de la estación Carriel Sur de Concepción. Las imágenes poseen una resolución de 300 puntos por pulgada (DPI, según sus siglas en inglés), con un tamaño aproximado de 5040 por 1060 píxeles.

Se agruparon las imágenes según características similares de la línea, partiendo por las que presentaban un trazado más simple (precipitaciones de intensidad baja, con pocos vaciamientos, y menor cantidad de errores de registro, manchas o discontinuidades en la línea). Se seleccionó imágenes representativas de cada grupo, implementando con ellas una versión preliminar del

software, con rutinas que permitían reconocer la línea en la imagen, unir trozos de línea separados, y trazar su posición en coordenadas cartesianas, principalmente.

En cuanto el *software* cumplía su función, se cambiaban las imágenes por las de otro grupo (con un trazado de línea más complejo), seleccionando sólo las imágenes más representativas del grupo. A éstas se aplicaban las rutinas anteriores, identificando errores o problemas del procedimiento, corrigiéndolos dentro del código y seleccionando luego un nuevo grupo de imágenes aún más complejas. Se mejoró el *software* de forma iterativa, repitiendo este proceso hasta conseguir resultados exitosos incluso con las imágenes más complejas de la base de datos.

Una vez finalizado el desarrollo del programa se puso a prueba su desempeño. En primer lugar, se utilizó el *software* en tres pluviogramas que aparentemente fueran difíciles de digitalizar, con una alta precipitación acumulada y vaciamientos muy cercanos entre sí, evaluando sus resultados de forma cualitativa. Por otra parte, un grupo de cinco personas probó el programa con cinco pluviogramas escogidos al azar, registrándose el tiempo dedicado a cada imagen. Además, los usuarios estimaron a mano las precipitaciones máximas para duraciones mayores a 2 horas, las que se compararon con los valores determinados con el *software*.

1.6 Organización de la Tesis

En el Capítulo 2 se analiza el problema de obtener valores de precipitación desde pluviogramas a partir de herramientas digitales, describiendo métodos relevantes para los objetivos de este trabajo e identificando ventajas y brechas de cada uno. El Capítulo 3 describe el *software* desarrollado y el método propuesto, con énfasis en los diferentes procedimientos, como reconocer la línea en la imagen, unir segmentos de línea separados, trazar su posición en coordenadas cartesianas y convertirla en precipitación. En el Capítulo 4 se muestran resultados del *software* PluvioReader al digitalizar registros de precipitación, analizándolos de forma cualitativa y cuantitativa. Finalmente, el Capítulo 5 presenta una discusión acerca del *software* y sus resultados, destacando posibles fortalezas y limitaciones, así como líneas de investigación futuras.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

Los métodos para extraer valores de precipitación desde pluviogramas incorporan dos procesos fundamentales. El primero es la identificación de la línea, donde se utiliza una técnica de segmentación de imagen para agrupar píxeles con características similares, como el tono o la intensidad de color de la línea. El segundo es el trazado de línea, donde se reproduce la forma de la línea identificada anteriormente. En general, esto último se logra asignando a cada columna de píxeles una coordenada única de fila, tal que sea representativa de la línea.

La cantidad de métodos documentados es baja y, aunque todos buscan el mismo objetivo, existen diferencias considerables. Éstas se deben principalmente a que cada método se ha adaptado a la información pluviográfica disponible, es decir, al tipo de pluviograma existente en su país de origen. Por este motivo, algunos métodos incorporan procedimientos que podrían ser una buena base para extraer valores desde pluviogramas chilenos (Figura 2.1), mientras que otros son de difícil aplicabilidad o presentan brechas respecto a nuestro caso.

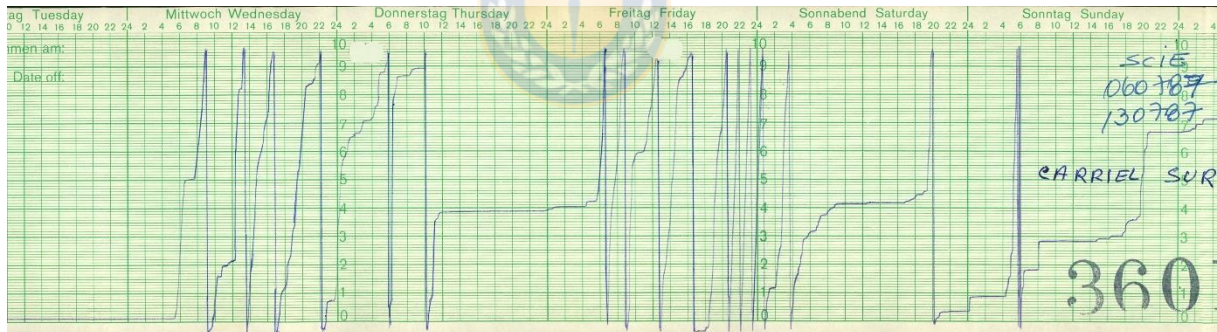


Figura 2.1 Detalle de un pluviograma semanal proveniente de una estación meteorológica en Chile (Estación Carriel Sur, desde el martes 7 hasta el domingo 12 de julio de 1987)

A continuación, se describen los procesos de identificación y trazado de línea para aquellos métodos que presentan una mayor similitud con el caso planteado en este trabajo. Se caracteriza la información requerida por los distintos métodos, observando las ventajas y desventajas de cada uno, y definiendo en base a esto cuáles serían de mayor relevancia. Previamente, se introducen conceptos básicos de digitalización de imágenes, con el fin de aclarar ciertas nociones sobre su procesamiento y presentar la notación matemática elemental del trabajo.

2.1 Introducción al procesamiento de imágenes digitales

Una imagen puede describirse matemáticamente como una función bidimensional “ $f(x, y)$ ”, donde “ f ” es la intensidad de color (o escala de gris, en el caso de imágenes en “blanco y negro”) en las coordenadas del plano “ (x, y) ”. Cuando “ f ”, “ x ” e “ y ” toman valores finitos y discretos, se habla de una imagen digital (Gonzalez y Woods, 2002). En otras palabras, una imagen digital puede definirse como un arreglo matricial “ A ”, donde cada elemento de la matriz se conoce como píxel de la imagen y su valor “ a_{ij} ” corresponde a la intensidad en la fila “ i ” y columna “ j ”.

Las filas varían entre $i = 1, \dots, N_i$, mientras las columnas lo hacen entre $j = 1, \dots, N_j$, donde “ N_i ” y “ N_j ” son el número de filas y columnas de la imagen, respectivamente. Los valores que puede tomar “ a_{ij} ” dependen del formato de almacenamiento de la imagen, con un valor mínimo de cero y un máximo que depende de dicho formato. Por ejemplo, una imagen en formato de 8-bit puede tomar $2^8 = 256$ valores distintos (entre cero y 255) en cada píxel.

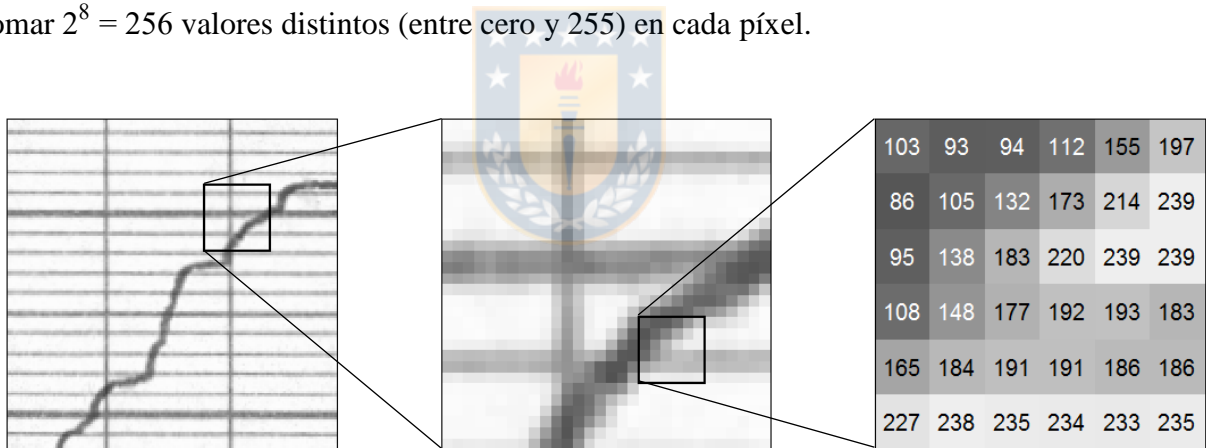


Figura 2.2 Muestra de imagen en escala de gris (izquierda), con un primer acercamiento (centro) y un segundo acercamiento indicando los valores “ a_{ij} ” (derecha). Formato de 8-bit

Una imagen digital a color es un poco más compleja, componiéndose de tres o más matrices como la descrita anteriormente, lo que dependerá del modelo de color utilizado. El esquema más común es el modelo de color RGB (sigla en inglés de *red*, *green*, *blue*; rojo, verde, azul), que utiliza tres matrices con intensidades de rojo, verde y azul para representar por adición una amplia gama de colores. La matriz de intensidad de rojo “ R ” presenta un valor de “ r_{ij} ” en el píxel “ (i, j) ”, del mismo

modo que las matrices de intensidad de verde “**G**” y de azul “**B**” poseen valores de “ g_{ij} ” y “ b_{ij} ” en el píxel “(i, j)”, respectivamente.

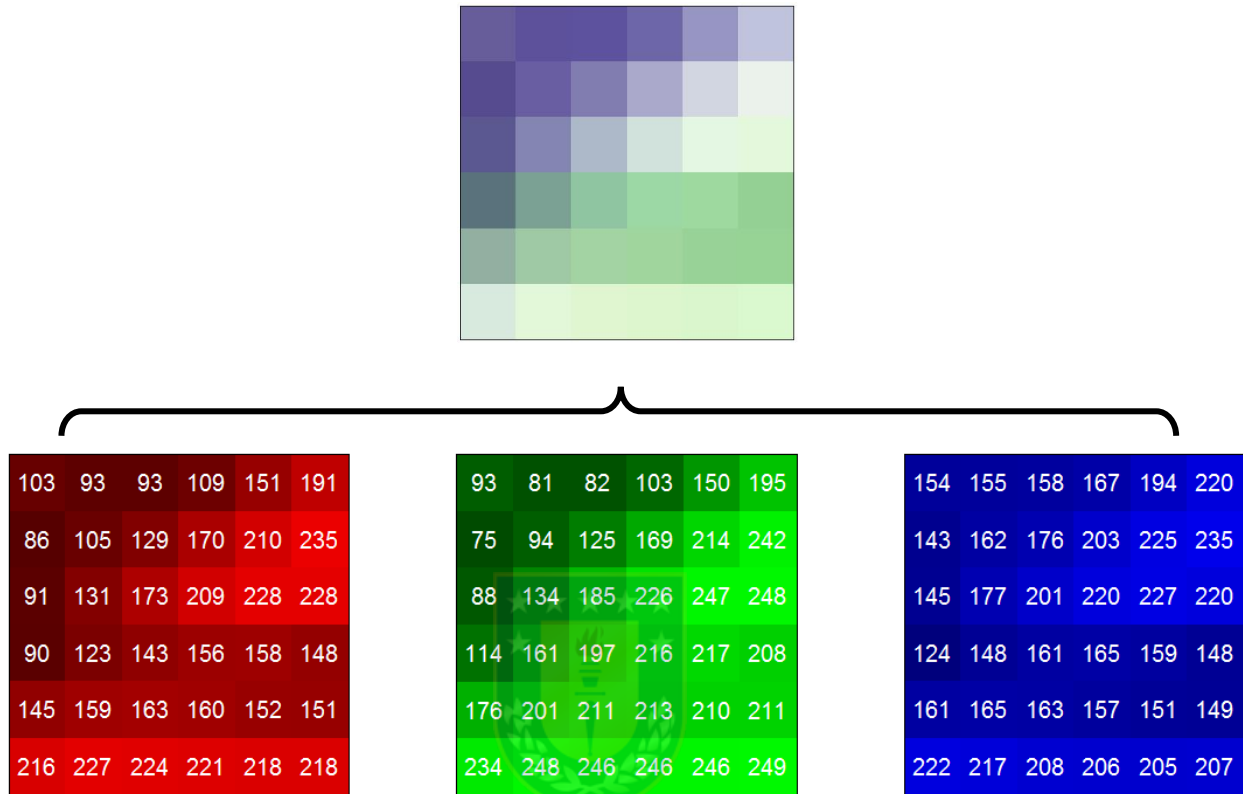


Figura 2.3 Muestra de imagen en RGB (arriba) con su intensidad de rojo (abajo, izquierda), verde (abajo, centro) y azul (abajo, derecha). Formato de 24-bit

Finalmente, una imagen binaria (o lógica) corresponde a una imagen formada por píxeles blancos y negros puros, sin escala de grises intermedios. La matriz “**BW**” que describe a una imagen binaria, tiene un valor de intensidad “ bw_{ij} ” en el píxel “(i, j)” con sólo dos opciones, cero para el color negro y uno para el blanco (aunque es común invertir dichos colores).

2.2 Información utilizada en cada método

En la búsqueda de literatura sobre digitalización de registros pluviográficos analógicos (o bien, de *softwares* creados para este fin) se encontraron cinco métodos, cada uno con diferentes características según sean los tipos de pluviogramas utilizados, la imagen digital asociada, o la información de entrada requerida. Además, se halló mención a un programa creado en Chile para

los pluviogramas del país, en un trabajo del Dr. Roberto Pizarro y sus colaboradores (UNESCO, 2013), sin embargo, la información encontrada es vaga y sólo da fe de la existencia del programa. Por no encontrarse detalles de este último método ni tener acceso a su *software*, a continuación sólo se describen las características de los cinco métodos mencionados en primer lugar.

2.2.1 Características de los pluviogramas

Los cinco métodos se emplean en pluviogramas provenientes de dos tipos distintos de pluviógrafos: aquellos propuestos por Jaklič *et al.* (2016) y Van Piggelen *et al.* (2011) sirven para pluviógrafos de flotador y sifón, mientras que los demás autores (MEEDDM, 2014; Deidda *et al.*, 2007; Leonardi *et al.*, 2006) desarrollaron sus métodos para pluviógrafos de cubeta basculante. Éstos últimos poseen una grilla recta en el eje temporal, pero con arcos de circunferencia en el eje de la precipitación, a diferencia de los primeros, con ejes temporales y de precipitación rectos. Las diferencias entre ambos tipos de pluviograma se observan en la Figura 2.4.

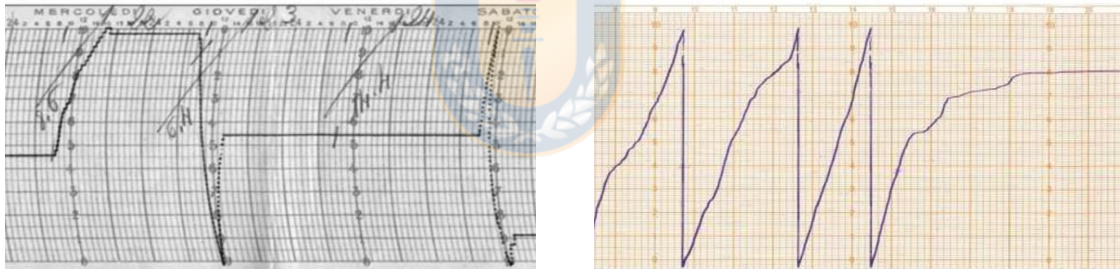


Figura 2.4 Diferencias entre pluviogramas procedentes de pluviógrafos de cubeta basculante (izquierda; Deidda *et al.*, 2007) y de flotador y sifón (derecha; Jaklič *et al.*, 2016)

Esta diferencia se debe a los mecanismos de registro de cada instrumento: a medida que se desplaza el pluviograma, los mecanismos de los pluviógrafos de cubeta basculante realizan movimientos en arco de circunferencia, mientras los de flotador y sifón realizan movimientos verticales. Además, llegando al extremo superior en el eje de la precipitación, los pluviógrafos de cubeta basculante normalmente invierten su sentido de registro, trazando una línea descendente después de llegar a la parte superior (y ascendente al llegar a la parte inferior). Esto difiere de lo que ocurre en pluviógrafos de flotador y sifón, que trazan una vertical hacia abajo al vaciar su depósito, reiniciando el registro de precipitación desde el extremo inferior (Figura 2.4).

En general, el color de línea de los pluviogramas es azul, pero Van Piggelen *et al.* (2011) trabajan pluviogramas con una línea roja, mientras que MEEDDM (2014) permite cualquier color de línea que sea diferenciable del fondo. Por otra parte, los colores de grilla de Jaklič *et al.* (2016) y Leonardi *et al.* (2006) son rojos, los de Deidda *et al.* (2007) son café en su mayoría, y los demás autores utilizan pluviogramas con una grilla verde. Los pluviogramas mostrados por todos estos autores, al igual que los analizados en el presente trabajo, poseen marcas de timbres o escritura a mano, generalmente en un color similar al de la línea.

El tamaño de los pluviogramas utilizados es similar para todos los métodos, con unos 44 cm de largo por unos 8 o 9 cm de alto. Sin embargo, Van Piggelen *et al.* (2011) utilizaron además rollos de gran tamaño, con unos 40 m de largo y una altura variable entre 14 y 29 cm, capaces de registrar una ventana temporal de 15 días. Debido a la gran diferencia entre estos rollos y los pluviogramas típicos, no se considerarán de aquí en adelante.

Tabla 2.1 Diferencias entre los pluviogramas utilizados en cada método

Método	Pluviógrafos utilizados	Color de línea	Color de grilla	Ventana de tiempo
Deidda <i>et al.</i> (2007)	Cubeta basculante	<i>Azul</i>	Café	<i>Semanal</i>
Jaklič <i>et al.</i> (2016)	<i>Flotador y sifón</i>	<i>Azul</i>	Rojo	Diaria
Leonardi <i>et al.</i> (2006)	Cubeta basculante	<i>Azul</i>	Rojo	<i>Semanal</i>
MEEDDM (2014)	Cubeta basculante	<i>Cualquiera</i>	<i>Verde</i>	<i>Cualquiera</i>
Van Piggelen <i>et al.</i> (2011)	<i>Flotador y sifón</i>	Rojo	<i>Verde</i>	Diaria

Finalmente, todos los pluviogramas registran la precipitación en un eje vertical que va desde cero a 10 mm. Los pluviogramas utilizados por Deidda *et al.* (2007) y Leonardi *et al.* (2006), poseen una ventana temporal de una semana, mientras que los de Jaklič *et al.* (2016) y Van Piggelen *et al.* (2011) corresponden a pluviogramas diarios. La Tabla 2.1 resume estas diferencias, mostrando en cursiva las características en común con los pluviogramas típicos de Chile.

2.2.2 Características de la imagen digital

La gran mayoría de los autores hace uso de imágenes en modelo de color RGB, y de éstos, tres especifican el uso de formato en 24-bit (Deidda *et al.*, 2007; Leonardi *et al.*, 2006; Van Piggelen *et al.*, 2011). Sólo Jaklič *et al.* (2016) utilizan el modelo de color CIELAB, que tiene la ventaja de ser perceptivamente lineal, es decir, un cambio de valor de color genera un cambio de similar importancia visual. Sin embargo, su conversión a modelos de color más comunes (como el RGB) es dificultosa matemáticamente hablando.

Por otra parte, la mayoría de los métodos han sido creados con imágenes de resolución 300 DPI, con excepción de Van Piggelen *et al.* (2011), que utilizan una resolución de 600 DPI, y Leonardi *et al.* (2006), con una resolución entre los 150 y 200 DPI. En la Tabla 2.2 se exponen las diferencias entre las imágenes digitales, mostrando en cursiva las características en común con las imágenes empleadas en este trabajo.

Tabla 2.2 Diferencias entre las imágenes digitales utilizadas en cada método

Método	Modelo de color	Resolución (DPI)
Deidda <i>et al.</i> (2007)	<i>RGB</i>	<i>300</i>
Jaklič <i>et al.</i> (2016)	CIELAB	<i>300</i>
Leonardi <i>et al.</i> (2006)	<i>RGB</i>	150-200
MEEDDM (2014)	<i>RGB</i>	<i>300</i>
Van Piggelen <i>et al.</i> (2011)	<i>RGB</i>	600

2.2.3 Otros datos necesarios

Todos los métodos requieren de la fecha y hora de colocación y retiro del pluviograma, o por lo menos su ventana temporal de registro. Además, los métodos necesitan información del color de línea para su identificación, que en general se encuentra predeterminada por las características del método. Sin embargo, la propuesta de MEEDDM (2014) permite identificar cualquier color de línea mediante la definición de sus umbrales de color en formato 24-bit RGB.

Por otra parte, los programas normalmente necesitan conocer los bordes de la grilla de fondo. Mientras métodos como los de Jaklič *et al.* (2016) y Leonardi *et al.* (2006) aplican transformaciones matemáticas sobre la imagen para identificar la grilla de manera automática, el programa de MEEDDM (2014) requiere el ingreso manual de las esquinas extremas de la grilla, navegando a través de la imagen con el cursor.

Una excepción a lo anterior es el método de Van Piggelen *et al.* (2011), que, suponiendo porcentajes de cobertura de grilla y papel, además de utilizar procesos de agrupación (*clustering* en inglés) y aplicar conceptos estadísticos de verosimilitud al color de la imagen, puede identificar la línea y grilla de la imagen sin requerir de más información.

2.3 Ventajas y desventajas de cada método

Se estableció que un método (o más bien, alguno de los procesos que lo compone) ofrece una ventaja respecto a los demás si los pluviogramas que utiliza (o las imágenes digitales correspondientes) presentan características en común con los registros en Chile, ya que esto facilitaría su aplicabilidad en dichos pluviogramas. Por el contrario, se descartó los métodos con características que dificultan su aplicación en los registros chilenos, incluyendo algunos métodos que no presentan una descripción matemática detallada de su funcionamiento, como los de Leonardi *et al.* (2006) y el programa de MEEDDM (2014). Sin embargo, considerando los datos requeridos por el *software* de MEEDDM (2014) pueden inferirse algunas características de su método, especialmente en su planteamiento del proceso de identificación de la línea.

Por otro lado, los supuestos de cobertura de grilla y papel utilizados por Van Piggelen *et al.* (2011) se cumplen en pluviogramas diarios (o en los rollos largos de 15 días), pero no necesariamente en pluviogramas semanales (con una mayor densidad de líneas), lo que dificultaría también su utilización como base. Del mismo modo, lo propuesto por Jaklič *et al.* (2016) para la identificación de la línea no es adaptable, debido a la utilización del modelo de color CIELAB.

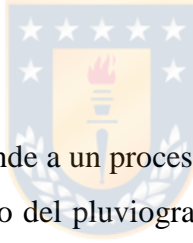
Según lo anterior, los métodos que presentan una mayor ventaja comparativa son los de MEEDDM (2014), sólo para la identificación de línea, Jaklič *et al.* (2016) para el trazado de línea, y Deidda

et al. (2007) en ambos procesos. No obstante, debe recordarse que Jaklič *et al.* (2016) no utilizan pluviogramas semanales, sino diarios, mientras que los pluviogramas utilizados por Deidda *et al.* (2007) provienen de pluviógrafos de cubeta basculante, y no de flotador y sifón.

Por último, de los dos métodos que utilizan pluviógrafos de flotador y sifón, el de Van Piggelen *et al.* (2011) es el único capaz de trabajar con líneas de vaciamiento que no son exactamente verticales, como debería ocurrir en teoría, sino que bajan con un leve retroceso. Para ello, realiza una transformación espacial a la imagen digital, desplazando hacia la izquierda los píxeles de la parte superior del vaciamiento, mientras mantiene fijos los de la parte inferior. Este hecho es de gran importancia, ya que un número no despreciable de pluviogramas en Chile posee dicho problema, convirtiéndose en la principal brecha de casi todos los métodos estudiados.

2.4 Descripción de procesos

2.4.1 Identificación de la línea



La identificación de la línea corresponde a un proceso de segmentación de imagen, cuyo objetivo es diferenciar entre la línea y el fondo del pluviograma. El resultado del proceso es una imagen binaria “**BW**” (Figura 2.5), con la línea de color blanco y el fondo negro (o viceversa). Por lo general, esto se consigue definiendo umbrales de color que caractericen a la línea y descarten el fondo. En la siguiente sección se enuncian los dos procesos de identificación más relevantes para el desarrollo de este trabajo.

Para empezar, el *software* de MEEDDM (2014) permite que el usuario ingrese los umbrales de color de línea en formato de 24-bit RGB, tal como se mencionó anteriormente. Las entradas de la imagen binaria resultante se definen como:

$$bw_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } r^- \leq r_{ij} \leq r^+ \wedge g^- \leq g_{ij} \leq g^+ \wedge b^- \leq b_{ij} \leq b^+ \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.1)$$

Donde “ r^- ”, “ r^+ ”, “ g^- ”, “ g^+ ”, “ b^- ” y “ b^+ ” son los umbrales menor y mayor definidos por el usuario, para las intensidades de color rojo, verde y azul de la línea, respectivamente. Se aprecia que la idea es simple e intuitiva, pero tomando en cuenta que son seis umbrales y se calibran mediante ensayo y error, en la práctica puede ser un proceso repetitivo y lento.

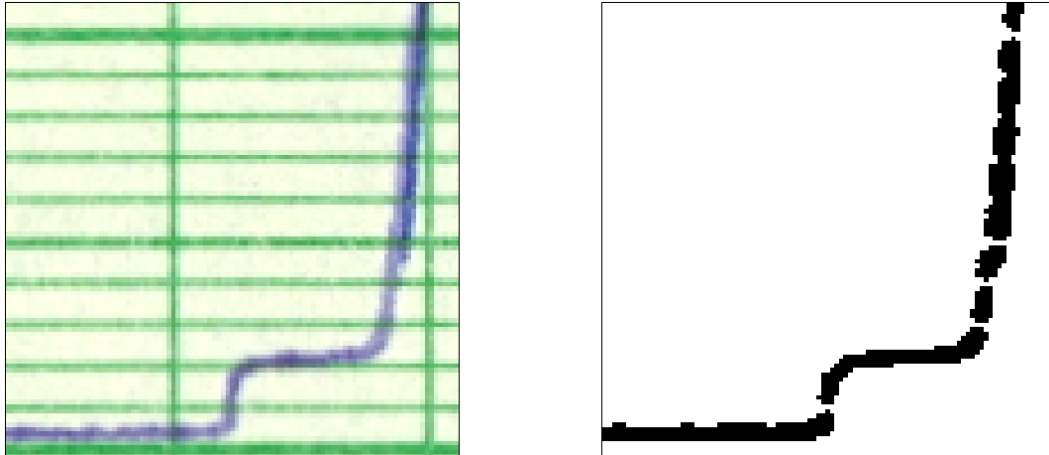


Figura 2.5 Ejemplo del proceso de identificación de la línea, con una muestra de la imagen RGB (izquierda) y la imagen binaria resultante (derecha)

Por otra parte, Deidda *et al.* (2007) sólo identifican líneas azules, utilizando un primer criterio de intensidad de rojo, para imágenes 24-bit RGB. Éste se basa en la observación de componentes rojas mayores a 130 para el fondo y la grilla del pluviograma, y mayores a 70 para la línea. El segundo criterio utiliza el modelo de color HSV (sigla en inglés de *hue, saturation, value*; matiz, saturación, valor). Este modelo está definido por tres matrices, de las que utilizan sólo la matriz “**H**”, que representa el tono del color. En la matriz “**H**” se establecen umbrales que limitan el tono azul, el color de línea en este caso, expresándose las entradas de la imagen como:

$$bw_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } 70 \leq r_{ij} \leq 130 \wedge h^- \leq h_{ij} \leq h^+ \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.2)$$

Donde “ h_{ij} ”, “ h^- ” y “ h^+ ” son el valor de “**H**” en el píxel “(i, j)” y los valores del umbral menor y mayor para el tono azul, respectivamente.

Se advierte que, tal como se han planteado los procesos de identificación, casi siempre se reconocerán como línea otros elementos no deseados que son parecidos en color (como timbres, manchas de tinta o escritura a mano). Esto debe asumirse como parte inevitable del proceso, pudiendo eliminar estos elementos después de la identificación de la línea y antes de su trazado, o bien, omitir su existencia en la misma etapa de trazado.

2.4.2 Trazado de la línea

El trazado de la línea consiste en la representación en coordenadas cartesianas de la línea en la imagen binaria “**BW**” proveniente del proceso de identificación anterior. Los resultados de este proceso son las coordenadas “ y_j ” únicas para cada columna “ j ” (Figura 2.6), que generalmente se calculan como el centroide de los píxeles binarios en la vertical, ya sea para una ventana acotada de columnas, o bien para una columna única.

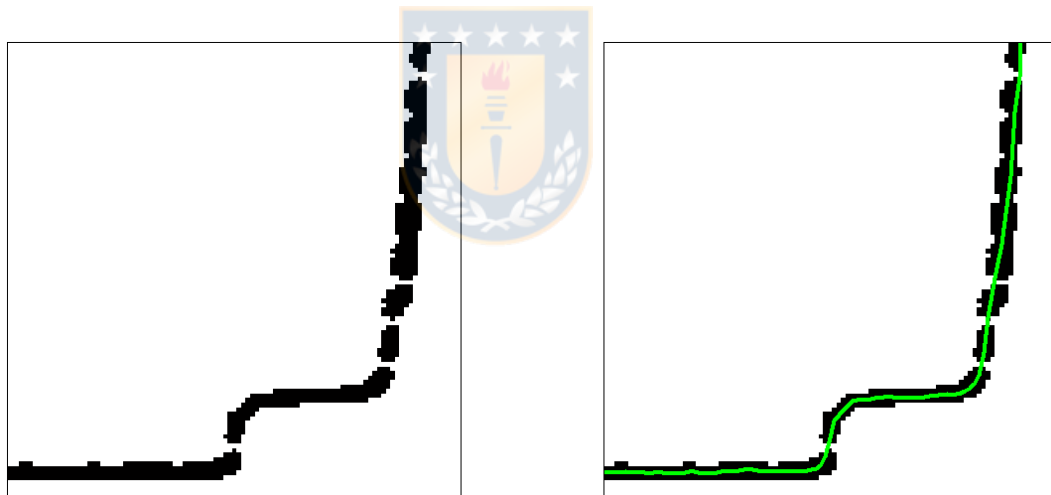


Figura 2.6 Ejemplo del proceso de trazado de la línea, con la imagen binaria antes (izquierda) y después (derecha) de su ejecución, mostrando además la línea resultante (verde)

No obstante, este cálculo pierde precisión al reconocer como línea elementos que no lo sean, lo que, tal como se explicó antes, ocurre regularmente. Los dos procesos presentados a continuación intentan omitir dichos elementos durante el trazado, calculando una primera aproximación de las coordenadas de línea, la cual luego es refinada en una segunda etapa.

En primer lugar, Deidda *et al.* (2007) proponen calcular un valor inicial tentativo “ \tilde{y}_j ” en una ventana de cinco columnas centrada en “ j ”, lo que reduciría la influencia de pequeñas manchas. Este cálculo preliminar se define según las ecuaciones:

$$\tilde{y}_j = \frac{1}{\tilde{n}_j} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=j-2}^{j+2} bw_{ik} \cdot i \quad (2.3)$$

$$\tilde{n}_j = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=j-2}^{j+2} bw_{ik} \quad (2.4)$$

Donde “ \tilde{n}_j ” es la cantidad de pixeles de línea en la ventana de cinco columnas y “ k ” varía entre la columna de inicio y la de término de la línea. Esta primera aproximación se encontrará bastante alejada de la línea si se presentan manchas de gran tamaño, siendo necesario un segundo cálculo de centroides “ y_j ” basado en el cálculo anterior, según:

$$y_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=u_j}^{l_j} bw_{ij} \cdot i \quad (2.5)$$

$$n_j = \sum_{i=u_j}^{l_j} bw_{ij} \quad (2.6)$$

Donde “ l_j ” y “ u_j ” son índices inferior y superior, equidistantes a \tilde{y}_j , encargados de limitar entre qué valores de “ i ” se promedia en cada columna “ j ”; y “ n_j ” es el número de pixeles identificados entre estos límites. Deidda *et al.* (2007) encontraron buenos resultados al definir la diferencia $|u_j - l_j|$ como tres veces la cantidad total de pixeles identificados por columna, es decir:

$$l_j = \tilde{y}_j + 1.5 \cdot \sum_{i=1}^{N_i} bw_{ij} \quad (2.7)$$

$$u_j = \tilde{y}_j - 1.5 \cdot \sum_{i=1}^{N_i} bw_{ij} \quad (2.8)$$

Por otro lado, Jaklič *et al.* (2016) también proponen un cálculo de “ y_j ” en dos etapas para abordar el problema de las manchas. Parten por una aproximación “ \tilde{y}_j ” definida según:

$$\tilde{y}_j = \frac{1}{\tilde{n}_j} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} bw_{ik} \cdot i \quad (2.9)$$

$$\tilde{n}_j = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} bw_{ik} \quad (2.10)$$

Donde “ W ” es la ventana de columnas centrada en “ j ” para el cálculo del primer valor, igual a 7 píxeles en este caso. Ya obtenida la primera aproximación, el proceso continúa con la segunda etapa de cálculo, que se define según:

$$y_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=\tilde{y}_j-\frac{H_j}{2}}^{\tilde{y}_j+\frac{H_j}{2}} \sum_{k=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} bw_{ik} \cdot i \quad (2.11)$$

$$n_j = \sum_{i=\tilde{y}_j-\frac{H_j}{2}}^{\tilde{y}_j+\frac{H_j}{2}} \sum_{k=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} bw_{ik} \quad (2.12)$$

$$H_j = \max\left(2 \cdot W, \frac{\tilde{n}_j}{W}\right) \quad (2.13)$$

Donde “ H_j ” es la ventana de filas en que se calculará la coordenada vertical, definida como el valor más alto entre los dos siguientes: dos veces la ventana de columnas “ W ”, o el número de píxeles de la primera etapa “ \tilde{n}_j ” dividido por el tamaño de la ventana “ W ”.

Es importante señalar que ambos procesos plantean alternativas de cálculo en caso de no encontrar píxeles de línea en una cierta columna, es decir, que “ \tilde{n}_j ” o “ n_j ” sean iguales a cero. Por ejemplo, si solamente “ n_j ” es cero, es probable que “ \tilde{y}_j ” esté muy alejado de la línea, sugiriéndose utilizar el “ \tilde{y}_j ” de una columna adyacente que no tenga tal problema. Por otro lado, si “ \tilde{n}_j ” es cero, el grupo de columnas en cuestión está vacío, siendo la mejor opción interpolar linealmente entre los “ y_j ” más cercanos.

2.4.3 Otros procesos relevantes

La digitalización de la información contenida en los pluviogramas puede requerir también de otros procesos, los que deben realizarse antes o después de los ya descritos. Uno de ellos es el encuadre de la imagen, que consiste en la rotación del pluviograma en el caso que éste no se encuentre horizontal, y, si es posible, la corrección de deformaciones de la imagen asociadas al efecto de la humedad sobre el papel o a problemas durante el escaneo. Se consigue esto aplicando transformaciones espaciales a la imagen, de forma tal que el eje del tiempo sea horizontal y el eje de la precipitación vertical (o curvo en los pluviogramas de cubeta basculante).

Lo anterior implica conocer la posición de la grilla (sus bordes o vértices extremos), ya que éstos definen los ejes horizontal y vertical del pluviograma. Mientras para algunos métodos la grilla corresponde a información de entrada, ingresada a través de la selección manual de sus vértices, para otros involucra un nuevo pre-proceso, que generalmente utiliza transformaciones matemáticas para reconocer el patrón de líneas presente en la grilla.

Finalmente, como última etapa es necesario convertir la línea trazada a valores de precipitación. En este caso, lo primero es encontrar las líneas de vaciamiento en los pluviogramas de flotador y sifón (o puntos de inversión en los de cubeta basculante). Entre cada par de vaciamientos debe definirse el valor equivalente de un píxel en milímetros de precipitación, que, en general, se considera proporcional a la diferencia entre la posición “ i ” del píxel más bajo del vaciamiento anterior y el más alto del vaciamiento siguiente. Una descripción más detallada de estos procesos se encuentra en el Capítulo 3.

CAPÍTULO 3: EL SOFTWARE PLUVIOREADER

El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de un *software* que permita obtener valores de precipitación empleando imágenes digitales de los pluviogramas semanales utilizados en Chile. Para lograrlo, se ha ideado un grupo de procesos adaptados a dichos pluviogramas, los que constituyen la parte fundamental del programa. Esta serie de procesos conforman el método desarrollado, siendo el *software* simplemente su representación computacional.

El método propuesto se compone de cuatro procesos principales: la identificación de la línea, la unión o eliminación de elementos identificados, el trazado de la línea, y la conversión de la línea trazada a valores de precipitación. Por otro lado, el *software* PluvioReader incorpora estos cuatro procesos, reconocibles en la GUI del programa, además de otras características, que van desde aspectos básicos como la selección de la imagen o exportación de los resultados, así como la edición de la imagen, ya sea borrando áreas o dibujando segmentos de línea.

En el presente capítulo se entrega una descripción del método propuesto e implementado en el programa PluvioReader, además de las características propias del *software*. Sobre el método se describen los cuatro procesos mencionados, junto a otras etapas previas, mientras que respecto al programa se explican aspectos como la información que utiliza, las opciones que ofrece, los resultados que entrega, y la interfaz de usuario que presenta.

3.1 Método propuesto

El método incorpora cuatro procesos principales. Los objetivos de tres de éstos ya han sido descritos en el Capítulo 2, explicando en detalle los dos más importantes. No obstante, en el método propuesto se han introducido varios cambios e innovaciones respecto a lo presentado en la literatura existente. Además, se proponen procesos como el de unión y eliminación de elementos, que no ha sido planteado anteriormente, con el propósito de facilitar el posterior trazado de la línea; o el pre-proceso de identificación de la grilla, que permite reconocer los ejes del pluviograma sin navegar manualmente con el cursor. A continuación se describe cada uno de los cuatro procesos que constituyen el método, partiendo por una presentación de sus pre-procesos.

3.1.1 Procesos previos

El principal pre-proceso del método es la determinación de los márgenes de la grilla, que son los bordes extremos que circunscriben a la línea de registro, es decir, limitan el recorrido teórico del instrumento sobre el eje temporal (de las abscisas) y de precipitación (de las ordenadas). En general, dichos márgenes corresponden a la fecha de colocación y retiro del pluviograma en el eje del tiempo, que en este caso serían las 8 AM de un día lunes y las 8 AM del lunes siguiente, y a los 0 y 10 mm en el eje de la precipitación.

Por simplicidad, los márgenes de la grilla normalmente se han representado a partir de los cuatro vértices que se forman en sus intersecciones. En versiones anteriores del método los márgenes correspondían a información de entrada y se identificaban seleccionando sus esquinas mediante la navegación manual sobre la imagen. Sin embargo, tomando en cuenta que el ingreso de dicha información podía ser lento o confuso para el usuario, se decidió agregar un pre-proceso de definición automática de márgenes.

La definición automática de márgenes funciona de la siguiente forma: suponiendo que la grilla puede representarse como una imagen binaria, llamada “**BW**^{grid}”, donde los pixeles de la grilla valen 1 y los del fondo 0, al sumar el valor de los pixeles en cada una de las columnas de “**BW**^{grid}” se presentará un patrón de *peaks* por cada línea vertical de la grilla (Figura 3.1). Uno de esos *peaks* correspondería a las 8 AM de colocación del pluviograma y otro a las 8 AM de su retiro. Realizando un proceso análogo con la suma de cada fila, se determinarían los cuatro vértices que definen los márgenes del pluviograma.

De esta forma, el problema se reduce a la caracterización de la imagen binaria “**BW**^{grid}”. Al igual que “**BW**” en la identificación de la línea, “**BW**^{grid}” debe generarse a partir de un proceso de segmentación de imagen, distinguiendo en este caso a la grilla por sobre el resto del pluviograma. Normalmente esto se realizaría definiendo un umbral de color fijo que caracterice a la grilla y descarte al fondo. Sin embargo, la definición de un valor fijo no garantiza la correcta identificación de la grilla en todas las imágenes, ya que los colores de la grilla y del fondo pueden presentar diferencias leves (pero no despreciables) entre un pluviograma y otro.

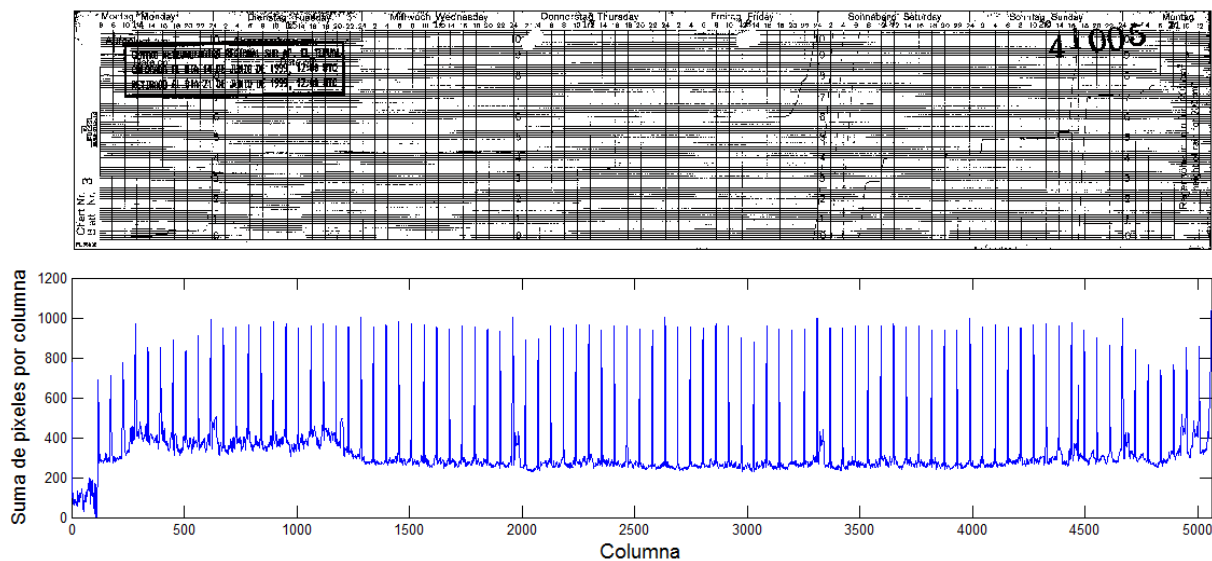


Figura 3.1 Imagen binaria de la grilla “**BW**grid” (arriba) y el patrón de *peaks* resultante de la suma vertical del valor de sus pixeles (abajo)

En efecto, a pesar de que los pluviogramas chilenos poseen una grilla de color verde y un fondo blanco, dichas características pueden presentar variaciones, encontrándose registros más pálidos o con tonalidades de amarillo (lo que se debería al envejecimiento del papel). En la Figura 3.2 se aprecian algunas de las diferencias de color que pueden presentar los pluviogramas chilenos.

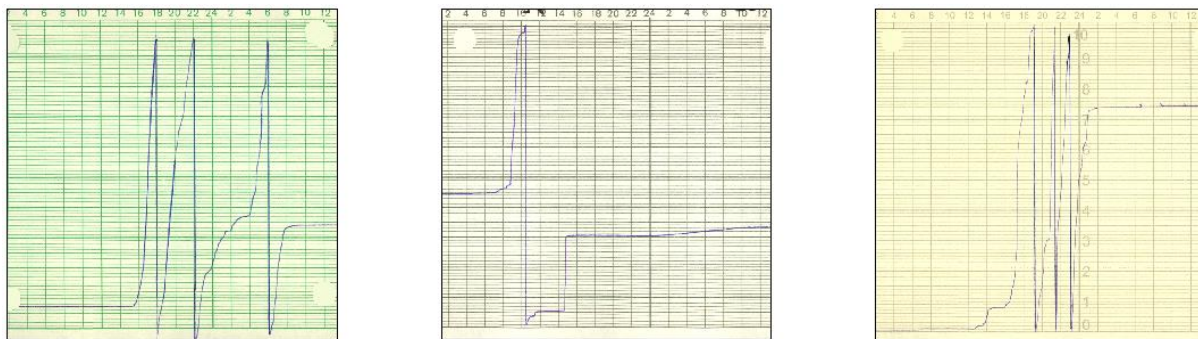


Figura 3.2 Muestras de tres pluviogramas, presentando los más comunes (izquierda), con colores más pálidos (centro) y con tonalidad de fondo amarilla (derecha)

Por esta razón, el umbral característico de la grilla debe determinarse de forma automática, considerando algún rasgo general que destaque a la grilla del fondo. En este sentido, la principal diferencia entre ambos es que el fondo, al asemejarse al color blanco, presenta una alta intensidad de los tres colores que componen el modelo RGB; en cambio la grilla, por ser verde, tiene una

menor intensidad de azul y rojo. Esta diferencia se observa en la Figura 3.3, que muestra un segmento de recta trazado sobre un pluviograma, junto a la variación espacial de las componentes RGB a lo largo de dicho segmento, lo que se conoce como perfil de intensidad de color.

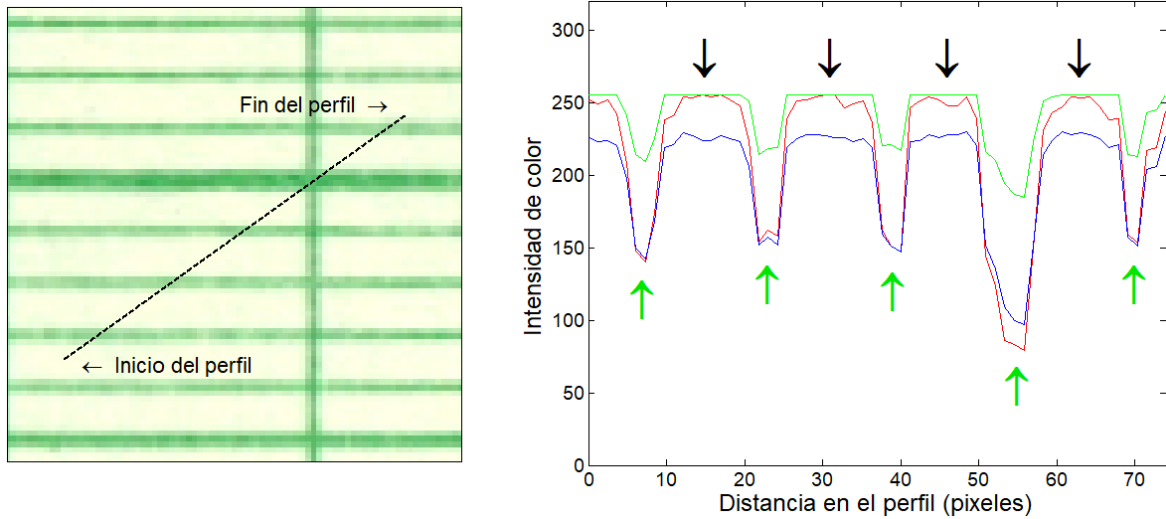


Figura 3.3 Segmento de recta trazado sobre una imagen (izquierda) y perfil de intensidad de color de dicho segmento (derecha), resaltando las zonas del perfil que se encuentran sobre el fondo (flechas negras) y la grilla (flechas verdes)

Se advierte que las intensidades de color de fondo son aproximadamente 250, 250 y 230 para el rojo, verde y azul, respectivamente, mientras que sobre la grilla las intensidades son 150, 220 y 150 para los mismos colores (llegando incluso a valores de 100 para el rojo y azul). En general, es posible afirmar que la menor de las intensidades en un píxel de grilla será mucho más baja que la menor de las intensidades en un píxel de fondo. El concepto anterior se ha representado en una imagen en escala de grises, compuesta por la menor intensidad de color RGB en cada píxel. Esta imagen de mínimos, llamada “**RGB^{min}**”, se define según:

$$rgb_{ij}^{\min} = \min(r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}) \quad (3.1)$$

Donde “ rgb_{ij}^{\min} ” corresponde al valor de “**RGB^{min}**” en el píxel “(i, j)”. Siendo así, la imagen de mínimos presenta un fondo claro y una grilla oscura, tal como se muestra en la Figura 3.4.

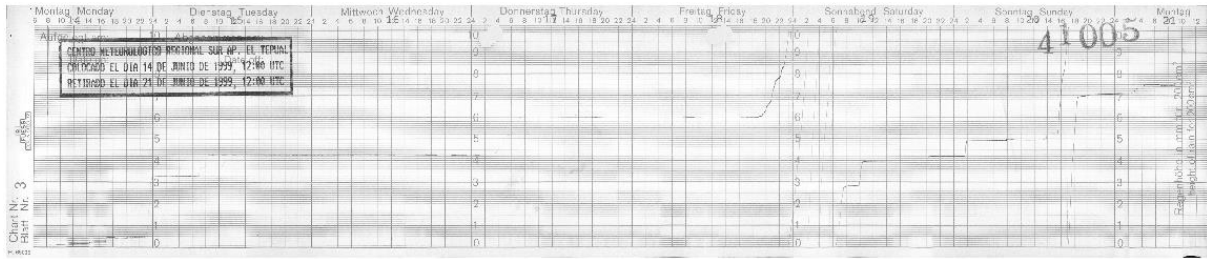


Figura 3.4 Ejemplo de una imagen de mínimos “**RGB^{min}**”

El umbral característico de la grilla se calcula a partir de “**RGB^{min}**”, ya que ofrece un mayor contraste entre la grilla y el fondo a partir de una imagen a escala de grises (con una sola componente de color), es decir, simplifica la definición de umbrales típica de una imagen RGB (con tres componentes). Para obtener el umbral característico se determina el porcentaje de píxeles de “**RGB^{min}**” que posee una intensidad menor o igual a un cierto valor “x”, repitiendo este cálculo para diferentes valores de intensidad. Lo anterior resulta en una distribución de frecuencia acumulada asociada al color de “**RGB^{min}**”, que se define a partir de las ecuaciones:

$$F(x) = \frac{1}{N_i \cdot N_j} \cdot \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} f_{ij}(x) \tag{3.2}$$

$$f_{ij}(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } \text{rgb}_{ij}^{\text{min}} \leq x \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{3.3}$$

Donde “F” es la función de distribución de frecuencia acumulada, “x” corresponde a la intensidad asociada a cada porcentaje de la distribución (entre 0 y 255 para imágenes de 8-bit), y “f_{ij}” es la función binaria que determina si el píxel “(i, j)” posee una intensidad menor o igual a “x”. A su vez, “f_{ij}” describe por extensión a la imagen binaria que selecciona a todos los píxeles menores o iguales a “x”. Un ejemplo de la función de distribución se encuentra en la Figura 3.5, que ha sido calculada para la imagen “**RGB^{min}**” que se mostró anteriormente.

En la función de la Figura 3.5 se destacan los puntos correspondientes al 90, 70, 50, 30 y 10 % de los píxeles con menor intensidad de color (en azul), incluyendo las imágenes binarias asociadas a cada uno de estos porcentajes de selección. Se aprecia que la función de distribución presenta dos

tramos con una tendencia prácticamente lineal: el primero entre $F(x) = 0.10$ y 0.30 , y el segundo entre $F(x) = 0.40$ y 0.90 . En la transición que une a ambos tramos se encuentra un punto en particular, un poco más cerca del primer tramo, que ha sido llamado “punto de cambio de tendencia” o “PCT” (en rojo). La particularidad del PCT es que su intensidad corresponde al umbral característico de la grilla.

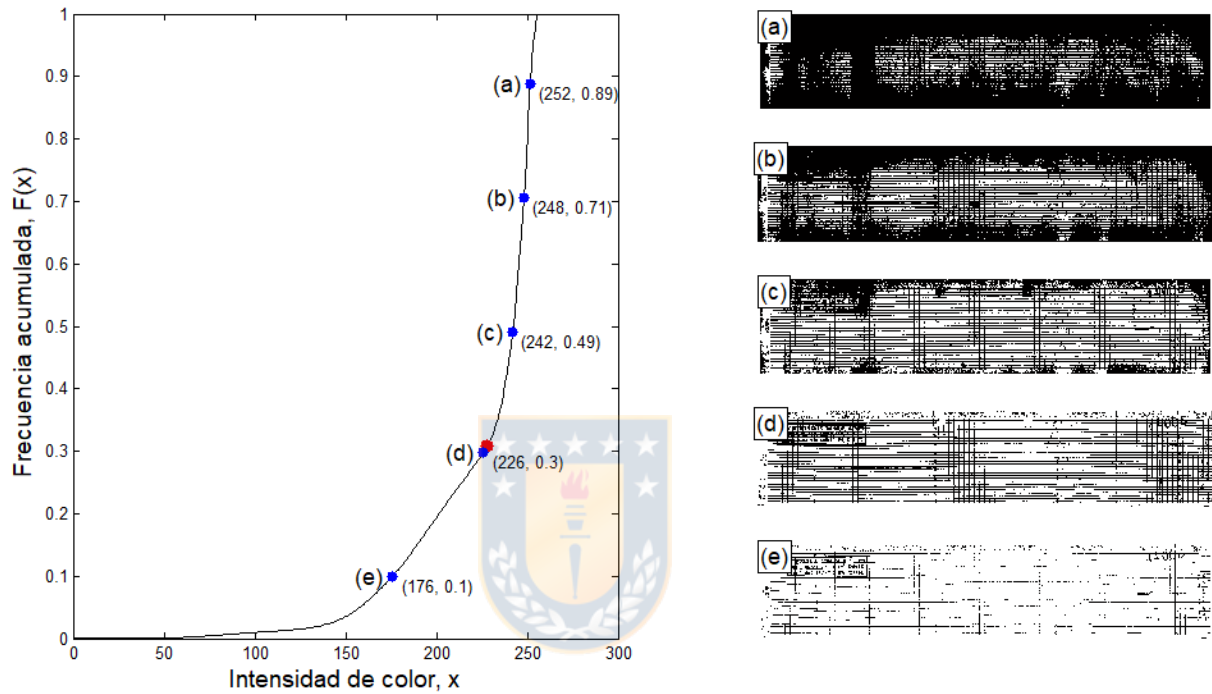


Figura 3.5 Izquierda: distribución de frecuencia acumulada de “ RGB^{min} ”, puntos asociados al 90, 70, 50, 30 y 10 % de los píxeles con menor intensidad (azul) y punto de cambio de tendencia (rojo). Derecha: imágenes binarias correspondientes a los puntos de la parte izquierda

La existencia de los dos tramos “lineales” rodeando al PCT ha sido verificada en todos los pluviogramas estudiados. Para encontrar el PCT se han establecido condiciones relacionadas al valor de “ $F(x)$ ”, de su pendiente y de la variación de su pendiente, o en otras palabras, de su primera y segunda derivada numérica. La coordenada “ x ” del PCT, es decir, el valor del umbral característico de la grilla, se calcula a partir de la ecuación:

$$umb^{grid} = \max \left(\left\{ x : F(x) \leq \alpha_0 \wedge \frac{\Delta F(x)}{\Delta x} \leq \alpha_1 \wedge \frac{\Delta^2 F(x)}{\Delta x^2} \leq \alpha_2 \right\} \right) \quad (3.4)$$

Donde “ umb^{grid} ” es el umbral característico de la grilla, y “ α_0 ”, “ α_1 ” y “ α_2 ” corresponden a los valores máximos admisibles para “ $F(x)$ ”, su primera y su segunda derivada, respectivamente. Así, “ umb^{grid} ” será el mayor valor de “ x ” tal que su distribución de frecuencia sea menor o igual a “ α_0 ”, su pendiente sea menor o igual a “ α_1 ” y la variación de su pendiente sea menor o igual a “ α_2 ”. Se ha establecido que $\alpha_0 = 0.5$, $\alpha_1 = 10^{-2}$ y $\alpha_2 = 5 \cdot 10^{-4}$, basado en la observación de la función de distribución de múltiples imágenes. Una vez obtenido “ umb^{grid} ” es posible determinar la imagen binaria de la grilla “ $\mathbf{BW}^{\text{grid}}$ ”, definiendo sus componentes según:

$$\text{bw}_{ij}^{\text{grid}} = \begin{cases} 1, & \text{si } \text{rgb}_{ij}^{\text{min}} \leq \text{umb}^{\text{grid}} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.5)$$

Con la imagen “ $\mathbf{BW}^{\text{grid}}$ ” es posible calcular la suma del valor de sus columnas y observar el patrón de *peaks* mencionado en un comienzo. El resultado de cada suma es almacenado en un vector llamado “ S^c ”, cuya componente “ S_j^c ” corresponde al valor de la suma en la columna “ j ”. De forma análoga se obtiene la suma del valor de sus filas, registrando sus resultados en un vector “ S^r ”, que posee un valor de “ S_i^r ” en la fila “ i ”.



Los *peaks* se definen en base a dos criterios: (1) que sean máximos locales sobre una ventana de valores cercanos, y (2) que sean mayores a un cierto valor límite. En los *peaks* de columnas esta ventana es de 50 valores, mientras que en los *peaks* de filas es de 80 valores (donde la ventana de columnas representa la separación típica entre las líneas verticales de la grilla, de igual forma para la ventana de filas y las líneas horizontales). Del mismo modo, el valor límite para los *peaks* corresponde al promedio de “ S^c ” para las columnas y de “ S^r ” para las filas. En la Figura 3.6 se representa la definición de los *peaks*, mostrando parte de la gráfica de “ S^c ” (izquierda) y de “ S^r ” (derecha), sus promedios (negro), sus *peaks* (verde), y otros máximos locales que no cumplen las condiciones para ser un *peak* (rojo).

A continuación se enumeran los *peaks* de la suma de filas y de columnas (Figura 3.6), registrando su posición “ i ” o “ j ” correspondiente. Los márgenes izquierdo y derecho se encuentran en la posición “ j ” asociada a los *peaks* de columna N° 2 y N° 86, respectivamente, ya que la segunda

línea de la grilla corresponde a las 8 AM y en una semana hay 85 líneas verticales. Del mismo modo, los márgenes inferior y superior corresponden a los *peaks* N° 1 y N° 11 de la suma de filas, ya que son 11 las marcas de graduación principales entre los 0 y 10 mm.

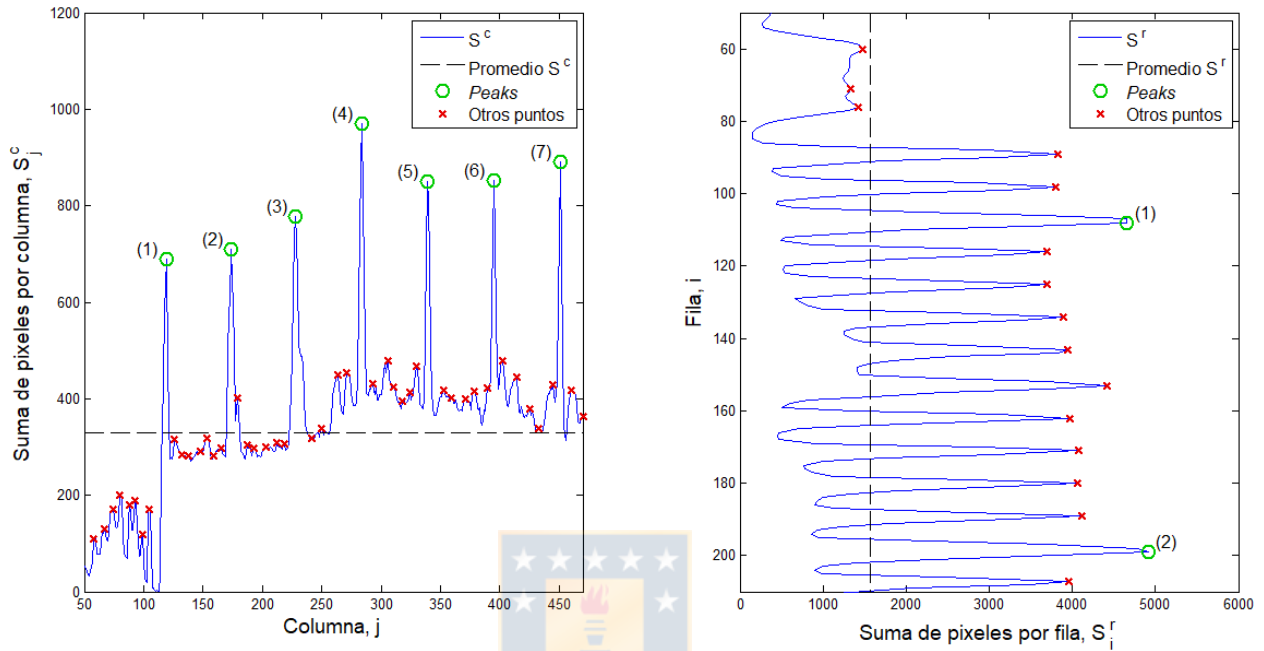


Figura 3.6 Representación gráfica del cálculo de los *peaks* de columna (izquierda) y de fila (derecha), mostrando además la enumeración de cada uno de los *peaks*

Finalmente, se definen las coordenadas “(i, j)” de los puntos de intersección de los márgenes, denominados como “ j_n^{grid} ” en el eje horizontal e “ i_n^{grid} ” en el eje vertical; donde $n = 1, 2, 3, 4$ corresponde al número asignado a cada punto según el siguiente orden: superior izquierdo, superior derecho, inferior izquierdo e inferior derecho. Después de unos pequeños ajustes en la ubicación de cada intersección el cálculo de los márgenes ha terminado. En el Anexo 3.1 se encuentra un diagrama de flujo de este pre-proceso.

3.1.2 Identificación de la línea

La identificación de la línea tiene por objetivo que ésta se destaque por sobre el resto de la imagen, normalmente, mediante la definición de umbrales de color que la caractericen. En este caso se plantean algunos cambios a la forma tradicional de identificación, optando por un enfoque similar

al utilizado anteriormente en el reconocimiento de la grilla. Según este nuevo enfoque, el proceso de identificación de la línea constará de las siguientes cuatro etapas: crear una imagen en escala de grises que destaque a la línea, calcular su distribución de frecuencia acumulada de color, determinar el umbral característico de la línea (a partir del punto de cambio de tendencia) y obtener la imagen binaria “**BW**” que representa a la línea.

Partiendo por la imagen a escala de grises, la principal característica de la línea es que su color es azul en los pluviogramas chilenos. Siendo así, es intuitivo pensar que los píxeles de línea presentarán una mayor intensidad de color azul que de rojo y verde. En la Figura 3.7 se verifica lo anterior, observándose un segmento de recta sobre una imagen (izquierda), junto a su perfil de intensidad de color (derecha).

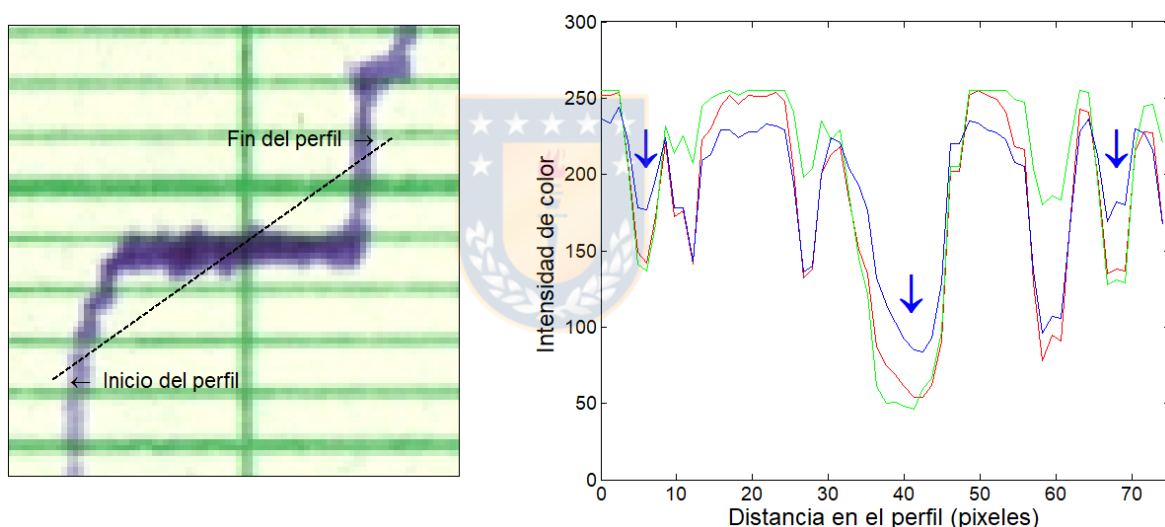


Figura 3.7 Segmento de recta trazado sobre una imagen (izquierda) y su perfil de intensidad de color RGB (derecha), destacando los lugares donde el perfil cruza la línea (flechas azules)

Se aprecia que el segmento cruza tres veces por la línea azul, del mismo modo que la intensidad de azul supera a la de rojo y verde en tres zonas del perfil, alrededor de los 6, 42 y 68 píxeles de distancia (marcados con flechas azules). En base a esto, podría plantearse la creación de “**BW**” simplemente como la selección de los píxeles donde la intensidad de color azul es mayor a la de rojo y verde. Sin embargo, como se mencionó antes, los pluviogramas pueden presentar diferencias no despreciables en su color (Figura 3.2), lo que influye en el color de la línea y restringe su identificación a partir de una idea como ésta. Los pluviogramas pálidos o de tono amarillo son un

claro ejemplo de aquello, ya que poseen pixeles de línea con un color azul que puede ser mayor al rojo o al verde, pero que no siempre es mayor a ambos.

Una característica más general para la identificación se relaciona a la diferencia entre las intensidades de color. En concreto, la diferencia entre el color azul y el rojo es alta en los pixeles de línea, mientras que en la grilla y el fondo dicha diferencia es baja (de hecho, normalmente es menor a cero), observándose algo similar para la diferencia entre el color azul y el verde. Esta nueva propuesta ha sido representada en una imagen llamada “**DIF^B**”, en escala de grises, cuyas componentes “ dif_{ij}^B ” se definen a partir de las ecuaciones:

$$\text{dif}_{ij}^{\text{aux}} = b_{ij} - r_{ij} + b_{ij} - g_{ij} \quad (3.6)$$

$$\text{dif}_{ij}^B = 255 \cdot \left[\frac{\text{dif}_{ij}^{\text{aux}} - \min(\mathbf{DIF}^{\text{aux}})}{\max(\mathbf{DIF}^{\text{aux}}) - \min(\mathbf{DIF}^{\text{aux}})} \right] \quad (3.7)$$

Donde “ $\text{dif}_{ij}^{\text{aux}}$ ” es una variable auxiliar que calcula la diferencia entre la intensidad de azul y rojo más la diferencia entre la intensidad de azul y verde para el píxel “(i, j)”, almacenando todos sus valores en la matriz “**DIF^{aux}**”. Para determinar “**DIF^B**” se normalizan los valores de “**DIF^{aux}**”, multiplicándolos luego por 255 para obtener una imagen de 8-bit (es decir, una matriz con valores entre 0 y 255). La Figura 3.8 presenta el ejemplo de una imagen “**DIF^B**”, con una línea de color oscuro y un fondo un poco más claro.

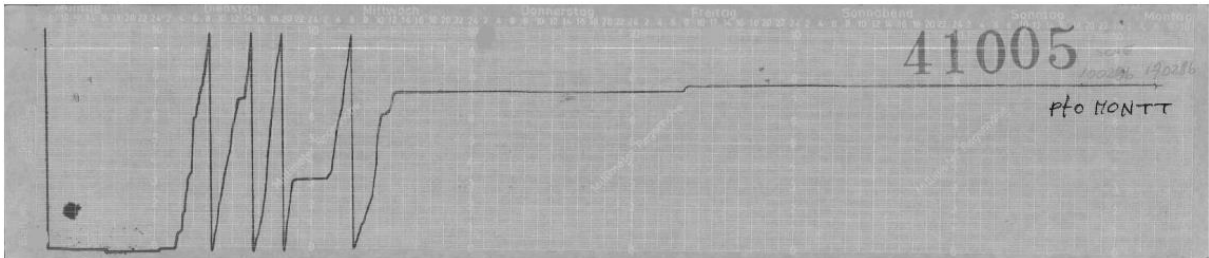


Figura 3.8 Ejemplo de una imagen de diferencia de azul “**DIF^B**”

El umbral característico de la línea se determina de la misma forma que el de la grilla, calculando en primer lugar la distribución de frecuencia acumulada de color de la imagen “**DIF^B**”, y

encontrando luego la ubicación del punto de cambio de tendencia o PCT. Las ecuaciones que representan dicha distribución son las siguientes:

$$F(x) = \frac{1}{N_i \cdot N_j} \cdot \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} f_{ij}(x) \tag{3.8}$$

$$f_{ij}(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } \text{dif}_{ij}^B \leq x \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{3.9}$$

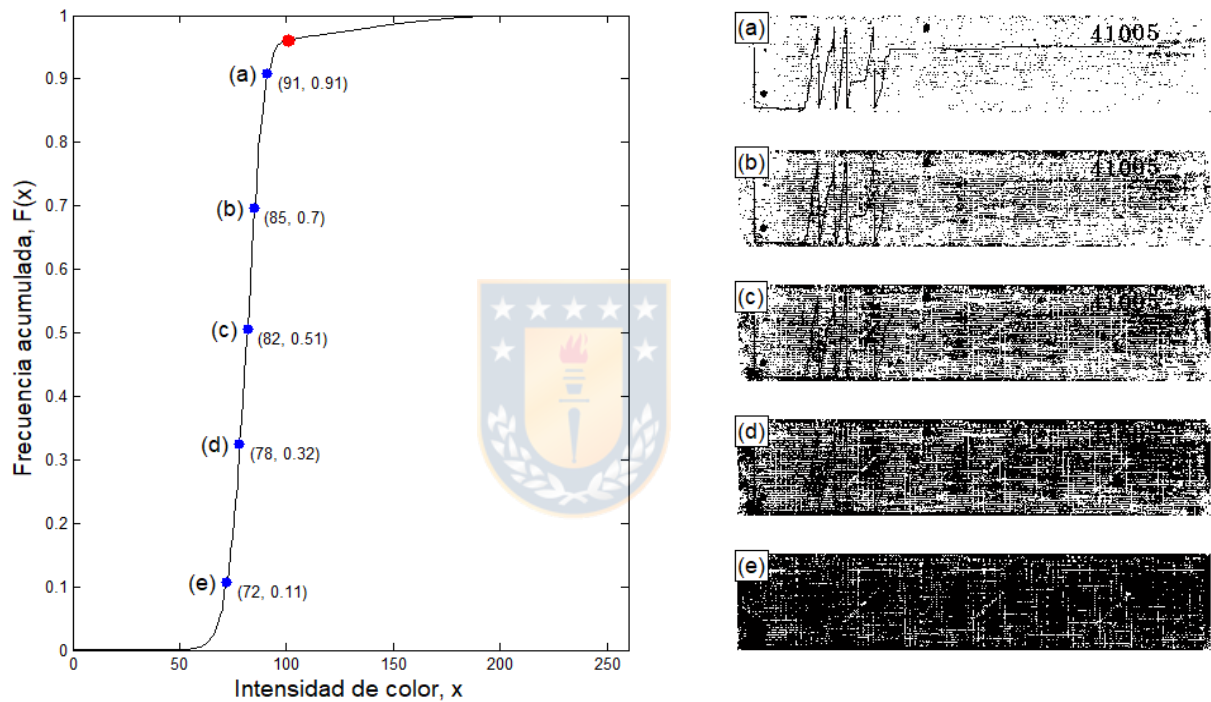


Figura 3.9 Izquierda: distribución de frecuencia acumulada de “**DIF^B**”, puntos asociados al 90, 70, 50, 30 y 10 % de los pixeles con menor intensidad (azul) y punto de cambio de tendencia (rojo). Derecha: imágenes binarias correspondientes a los puntos de la parte izquierda

Donde “F” es la función de distribución de frecuencia acumulada, “x” corresponde a la intensidad asociada a cada porcentaje de la distribución, y “f_{ij}” es la función binaria que determina si el píxel “(i, j)” de la imagen posee una intensidad menor o igual a “x”. En la Figura 3.9 se presenta la distribución de frecuencia acumulada de la imagen “**DIF^B**” anterior, destacando los puntos correspondientes al 10, 30, 50, 70 y 90 % de los pixeles con mayor intensidad de color (en azul), además de la posición del PCT (en rojo).

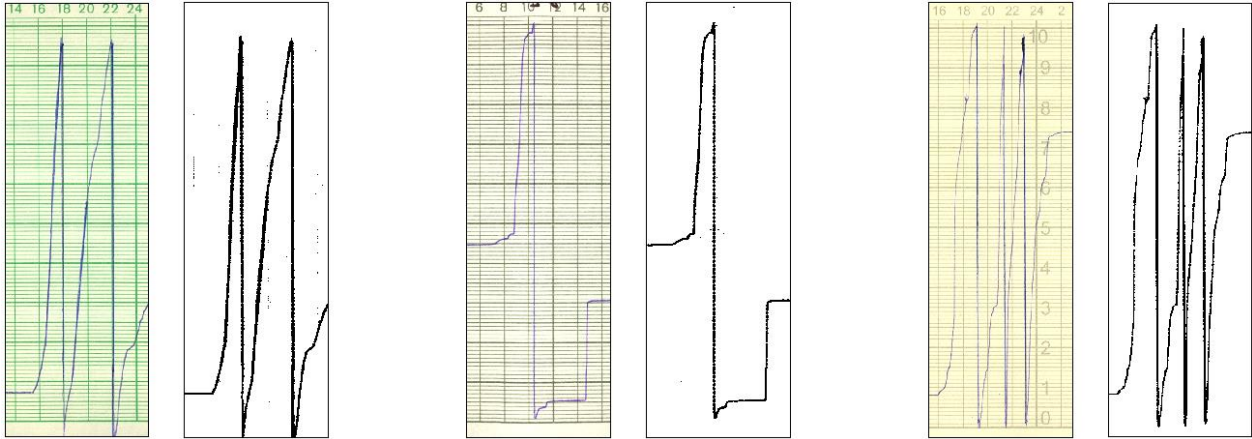


Figura 3.10 Resultados de la identificación de la línea para tres tipos de pluviogramas: comunes (izquierda), con colores más pálidos (centro) y con tonalidad amarilla (derecha)

El PCT se encuentra en la parte alta de la distribución de frecuencia, por sobre $F(x) = 0.90$. Esto se debe a que la grilla y el fondo constituyen más del 90 % de la imagen, mientras la línea representa a la fracción restante (entre un 2 a 5 % de los píxeles más intensos de “ DIF^B ”). Como se observa, su reconocimiento visual es mucho más fácil que el de la grilla, ya que los dos tramos “lineales” poseen pendientes muy distintas entre sí. La intensidad asociada al PCT, es decir, el umbral característico de la línea, se determina a partir de la ecuación:

$$umb = \min \left(\left\{ x : F(x) \geq \alpha_0 \wedge \frac{\Delta F(x)}{\Delta x} \leq \alpha_1 \wedge \frac{\Delta^2 F(x)}{\Delta x^2} \leq \alpha_2 \right\} \right) \quad (3.10)$$

Donde “umb” es el umbral característico de la línea, “ α_0 ” es el valor mínimo para “ $F(x)$ ”, y “ α_1 ” y “ α_2 ” son los máximos para la primera y la segunda derivada numérica de “ $F(x)$ ”, respectivamente. Así, “umb” es el menor “ x ” tal que su distribución de frecuencia es mayor o igual a “ α_0 ”, su pendiente es menor o igual a “ α_1 ”, y la variación de su pendiente es menor o igual a “ α_2 ”. La experiencia con diferentes imágenes indica que $\alpha_0 = 0.5$, $\alpha_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ y $\alpha_2 = 5 \cdot 10^{-4}$. Finalmente, se obtiene la imagen binaria de la línea “ BW ” definiendo sus componentes “ bw_{ij} ” según:

$$bw_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } dif_{ij}^B \geq umb \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.11)$$

A diferencia del planteamiento actual, en las versiones preliminares del método se definía una alternativa de identificación distinta para cada tonalidad de pluviograma (los comunes, pálidos o amarillentos), concediendo al usuario la responsabilidad de elegir la opción que representaba mejor a la línea. Con esta nueva propuesta se ofrece una solución única, general, al proceso de identificación (Figura 3.10), en lugar de las tres soluciones particulares de la versión preliminar, lo que simplifica la labor del usuario y evita la subjetividad de reconocer el tipo de pluviograma. Una vez definida la imagen binaria “**BW**”, se puede continuar con la unión y eliminación de elementos. En el Anexo 3.1 se incluye un diagrama de flujo del proceso de la identificación de la línea.

3.1.3 Unión y eliminación de elementos

Este proceso consiste en la unión de segmentos de línea que quedaron separados en la identificación, y en la eliminación de elementos no deseados que hayan sido seleccionados (manchas, escritura a mano, timbres, etc.). Su objetivo es que no existan columnas vacías al momento de realizar el trazado de la línea, evitando a su vez la introducción de ruido procedente de los elementos no deseados. El resultado esperado es una actualización de la imagen binaria “**BW**” donde se ha unido con segmentos de recta los distintos elementos de la línea, borrando al mismo tiempo todo lo que no forme parte de ella.

Para su ejecución, es necesario conocer si un elemento en la imagen binaria es distinto de otro, lo que se consigue etiquetando a cada uno. El etiquetado de elementos consiste en la creación de una matriz “**LAB**”, del mismo tamaño de “**BW**”, cuyos elementos “ lab_{ij} ” contienen números enteros con un número único para cada elemento identificado. En otras palabras, todos los “ (i, j) ” que pertenezcan a un elemento aislado tendrán el mismo “ lab_{ij} ”. Una representación de la matriz de etiquetas “**LAB**” se encuentra en la Figura 3.11.

Una vez creada la matriz de etiquetas, debe realizarse una serie de procedimientos antes de poder unir los elementos, como por ejemplo: eliminar los elementos en “**BW**” ubicados en los bordes de la imagen, identificar la etiqueta de los segmentos de línea inicial y final, seleccionar los píxeles que serán posibles puntos de partida para la unión de elementos, etc.

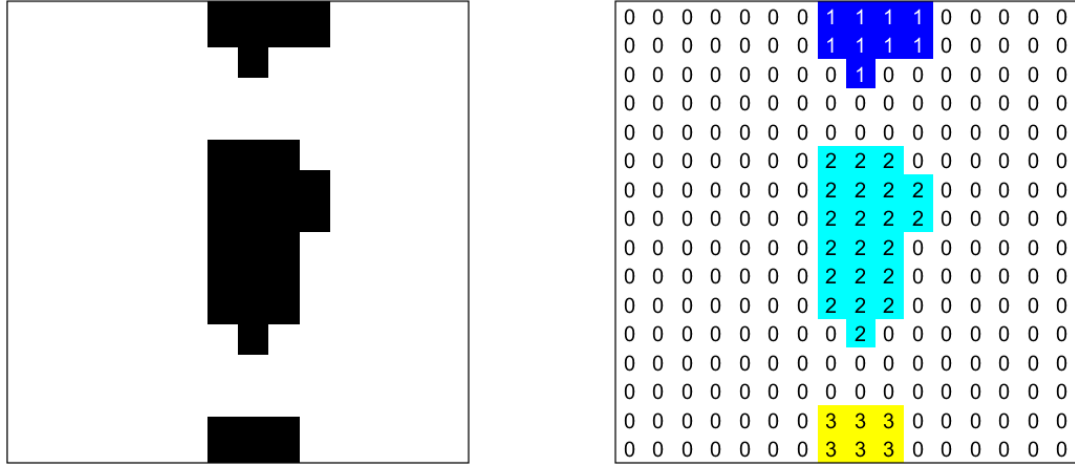


Figura 3.11 Acercamiento de una imagen binaria (izquierda) y su matriz de etiquetas asociada (derecha), visualizada como imagen y con el detalle del valor de sus componentes

Para empezar, se eliminan de la imagen binaria aquellos elementos que poseen uno o más de sus píxeles en los bordes superior e inferior, lo que queda definido por:

$$bw_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{si } lab_{ij} \in L_1^{edge} \\ bw_{ij}, & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{3.12}$$

$$L_1^{edge} = \{ lab_{ij} : (i = 1 \vee i = N_i) \wedge j = 1, \dots, N_j \} \tag{3.13}$$

Donde “ L_1^{edge} ,” es el conjunto de etiquetas “ lab_{ij} ” en los bordes superior e inferior de la imagen, es decir, en la primera y última fila para todas las columnas.

Distinto será el caso de los bordes izquierdo y derecho, donde la eliminación no sólo incluirá a la primera y última columna, sino que a todos los elementos que se encuentren completamente a la izquierda de la coordenada de columna “ j_1^{grid} ” o a la derecha de “ j_2^{grid} ” (bordes verticales de la grilla que se estimaron en la determinación de sus márgenes), conservando los elementos que estén total o parcialmente entre dichas columnas. Esta vez, el proceso de eliminación se define según:

$$bw_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{si } lab_{ij} \in L_2^{edge} \\ bw_{ij}, & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{3.14}$$

$$L_2^{edge} = \{ lab_{ij} \notin L^{aux} : i = 1, \dots, N_i \wedge (j < j_1^{grid} \vee j > j_2^{grid}) \} \tag{3.15}$$

$$L^{aux} = \{ lab_{ij} : i = 1, \dots, N_i \wedge (j > j_1^{grid} \wedge j < j_2^{grid}) \} \quad (3.16)$$

Donde “ L_2^{edge} ” es el conjunto de etiquetas “ lab_{ij} ” de los elementos que se encuentran a la izquierda de “ j_1^{grid} ” y a la derecha de “ j_2^{grid} ”, y “ L^{aux} ” es el conjunto de etiquetas que sí están entre dichas columnas. Efectuando estas dos etapas, se elimina una serie de elementos que no pertenecen a la línea, evitando así errores en etapas posteriores (como la caracterización de los segmentos de línea inicial y final). La Figura 3.12 muestra el procedimiento de eliminación de bordes, indicando en color rojo los elementos eliminados de los bordes superior e inferior, y en color azul la zona a la izquierda de “ j_1^{grid} ” (o sea, antes de las 8 horas de inicio del pluviograma).

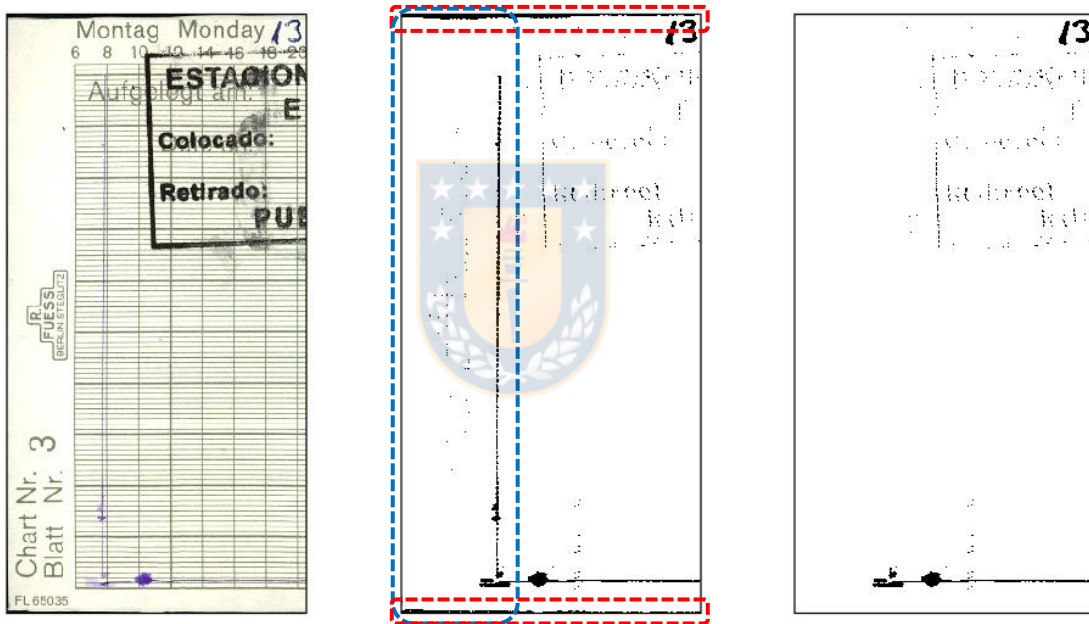


Figura 3.12 Eliminación de elementos en la parte izquierda de una imagen: imagen original (izquierda), imagen binaria (centro), indicando zonas de eliminación (superior e inferior en rojo, izquierda en azul), e imagen binaria con elementos de borde eliminados (derecha)

Posteriormente, se establece entre qué filas “ i ”, arriba y abajo, se unirán segmentos de línea, para no recorrer toda la imagen al realizar las uniones. Una buena aproximación sería escoger las filas “ i_1^{grid} ” e “ i_3^{grid} ”, asociadas a los bordes horizontales de la grilla, sin embargo, en un gran número de pluviogramas la línea sobrepasa los bordes de la grilla, lo que probablemente se debe a problemas de calibración del instrumento de medición. Por esta razón, se define a “ i_1^{lim} ” e “ i_2^{lim} ” como las filas

que delimitarán la zona de unión de segmentos en la parte de arriba y abajo de la imagen, respectivamente. Para determinarlas, se establece como criterio de búsqueda que cada una posea cinco filas consecutivas (por encima de “ i_1^{lim} ” y por debajo de “ i_2^{lim} ”) sin elementos identificados. En el caso de “ i_1^{lim} ”, lo anterior se expresa como:

$$i_1^{lim} = \max(I_1) \tag{3.17}$$

$$I_1 = \left\{ i_0 : i_0 < \frac{i_3^{grid} - i_1^{grid}}{2} \wedge \sum_{i=i_0-5}^{i_0} \sum_{j=1}^{N_j} bw_{ij} = 0 \right\} \tag{3.18}$$

Donde “ I_1 ” es el conjunto de filas “ i_0 ” que se encuentran en la mitad superior de la imagen y poseen una suma de “ bw_{ij} ” igual a cero para cinco filas consecutivas hasta “ i_0 ”. El máximo valor contenido en “ I_1 ” corresponde al de “ i_1^{lim} ”. De la misma forma, “ i_2^{lim} ” se determina según la expresión:

$$i_2^{lim} = \min(I_2) \tag{3.19}$$

$$I_2 = \left\{ i_0 : i_0 > \frac{i_3^{grid} - i_1^{grid}}{2} \wedge \sum_{i=i_0}^{i_0+5} \sum_{j=1}^{N_j} bw_{ij} = 0 \right\} \tag{3.20}$$

No está de más señalar que el valor límite de la parte superior “ i_1^{lim} ” es menor al de la parte inferior “ i_2^{lim} ”, ya que los índices en una matriz aumentan en forma descendente.

Luego, se calculan las etiquetas inicial y final de la línea en el pluviograma. Para esto, se busca entre las etiquetas “ lab_{ij} ” cercanas de los bordes (izquierdo y derecho) la que posea más entradas en la matriz de etiquetas. En otras palabras, se definirá como etiqueta inicial (final) a la que esté en una vecindad del borde izquierdo (derecho) y cuente con la mayor “área” en pixeles. Así, la etiqueta inicial “ $lab_{inicial}$ ” será la única que cumpla con:

$$\sum_{i=i_1^{lim}}^{i_2^{lim}} \sum_{j=1}^{N_j} area_{ij}(lab_{inicial}) \geq \sum_{i=i_1^{lim}}^{i_2^{lim}} \sum_{j=1}^{N_j} area_{ij}(lab_x), \quad lab_{inicial}, lab_x \in L_1 \tag{3.21}$$

$$L_1 = \{ lab_{ij} : i = i_1^{lim}, \dots, i_2^{lim} \wedge j = j_1^{grid}, \dots, j_1^{grid} + \Delta j_{inicial} \} \tag{3.22}$$

Donde “ lab_x ” pertenece al conjunto de etiquetas “ L_1 ” cercanas al borde izquierdo. La vecindad de búsqueda queda limitada por “ $\Delta j_{inicial}$ ” como distancia a la derecha del borde izquierdo. Se ha conseguido una buena identificación de la etiqueta inicial con $\Delta j_{inicial} = 20$ pixeles. Además, la función binaria “ $area_{ij}$ ” indica si una cierta etiqueta “ lab_x ” es igual a la etiqueta presente en las coordenadas “ (i, j) ” de la matriz “**LAB**”, según la expresión:

$$area_{ij}(lab_x) = \begin{cases} 1, & \text{si } lab_x = lab_{ij} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.23)$$

En forma análoga, la etiqueta final “ lab_{final} ” será la única que cumpla lo siguiente:

$$\sum_{i=i_1^{lim}}^{i_2^{lim}} \sum_{j=1}^{N_j} area_{ij}(lab_{final}) \geq \sum_{i=i_1^{lim}}^{i_2^{lim}} \sum_{j=1}^{N_j} area_{ij}(lab_x), \quad lab_{final}, lab_x \in L_2 \quad (3.24)$$

$$L_2 = \{ lab_{ij} : i = i_1^{lim}, \dots, i_2^{lim} \wedge j = j_2^{grid} - \Delta j_{final}, \dots, j_2^{grid} \} \quad (3.25)$$

En este caso, $\Delta j_{final} = 25$ pixeles ha ofrecido buenos resultados. Conociendo las etiquetas inicial y final, es posible determinar las coordenadas de inicio y término de la línea. El inicio corresponderá a los índices “ (i, j) ” que se encuentren más a la izquierda en la imagen y posean una etiqueta “ $lab_{inicial}$ ”, mientras el término corresponderá a aquellos índices más a la derecha con una etiqueta “ lab_{final} ”. Para su cálculo, se recorren las columnas y filas de la matriz “**LAB**” hasta encontrar las coordenadas correspondientes, que se denominan como “ $(i_{inicial}, j_{inicial})$ ” e “ (i_{final}, j_{final}) ”.

Después de definir las etiquetas inicial y final, junto a sus índices de inicio y fin, se pueden unir los segmentos de la línea. La forma más simple de realizar la unión sería recorriendo las filas y columnas de la imagen binaria “**BW**” en busca de pares de elementos cercanos y distintos entre sí. Sin embargo, recorrer todos los $i = 1, \dots, N_i$ y $j = 1, \dots, N_j$ buscando dichos pares de elementos sería ineficiente y presentaría un alto costo computacional. Lo anterior se debe a que gran parte de la superficie de la imagen no contiene elementos, y además, en un segmento de línea dado no todos los pixeles son posibles puntos de partida (o llegada) para una unión: sólo lo son aquellos que se encuentran en la periferia de un elemento o en los extremos de éste.

Por esta razón, antes de unir los elementos se propone calcular los puntos extremos de cada uno de ellos, probando así sólo esas coordenadas y no la imagen completa. Para lograrlo, se define como “e” a cada elemento individual reconocido en la imagen binaria (con $e = 1, \dots, N_e$; donde “ N_e ” es el número total de elementos en “**BW**”), los que tendrán una etiqueta “ $lab^{(e)}$ ” asociada. Con esa etiqueta se pueden conocer las coordenadas “ $(i_p^{(e)}, j_p^{(e)})$ ” de todos los pixeles que pertenecen al elemento “e” (con $p = 1, \dots, N_p^{(e)}$, donde “ $N_p^{(e)}$ ” es el total de pixeles del elemento “e”), recorriendo la imagen de forma similar a lo sugerido en un comienzo.

Una vez obtenidas dichas coordenadas, se calculan las posiciones de los ocho puntos extremos que rodean a cada elemento (Figura 3.13). El procedimiento posee dos etapas, siendo la primera el cálculo de las filas que limitan al elemento por arriba y abajo, y de las columnas que cumplen lo mismo por izquierda y derecha (Figura 3.13, parte b). Así, la primera etapa sólo entrega una de las dos coordenadas de cada punto, definidas según:

$$i_{ext, 1}^{(e)} = i_{ext, 2}^{(e)} = \min(i_p^{(e)}), \quad i_{ext, 5}^{(e)} = i_{ext, 6}^{(e)} = \max(i_p^{(e)}) \quad (3.26)$$

$$j_{ext, 3}^{(e)} = j_{ext, 4}^{(e)} = \max(j_p^{(e)}), \quad j_{ext, 7}^{(e)} = j_{ext, 8}^{(e)} = \min(j_p^{(e)}) \quad (3.27)$$

Donde “ $(i_{ext, n}^{(e)}, j_{ext, n}^{(e)})$ ” son las coordenadas de los extremos, con $n = 1, \dots, 8$. La segunda etapa consiste en calcular la columna más a la izquierda y a la derecha de cada fila límite, y la fila más arriba y más abajo de cada columna límite (Figura 3.13, parte c). De esta forma, se obtienen las coordenadas faltantes a partir de:

$$j_{ext, 1}^{(e)} = \min(j_{1,2}^{(e)}), \quad j_{ext, 2}^{(e)} = \max(j_{1,2}^{(e)}), \quad \text{donde } j_{1,2}^{(e)} = \{j_p^{(e)} : i_p^{(e)} = i_{ext, 1}^{(e)}\} \quad (3.28)$$

$$j_{ext, 5}^{(e)} = \max(j_{5,6}^{(e)}), \quad j_{ext, 6}^{(e)} = \min(j_{5,6}^{(e)}), \quad \text{donde } j_{5,6}^{(e)} = \{j_p^{(e)} : i_p^{(e)} = i_{ext, 5}^{(e)}\} \quad (3.29)$$

$$i_{ext, 3}^{(e)} = \min(i_{3,4}^{(e)}), \quad i_{ext, 4}^{(e)} = \max(i_{3,4}^{(e)}), \quad \text{donde } i_{3,4}^{(e)} = \{i_p^{(e)} : j_p^{(e)} = j_{ext, 3}^{(e)}\} \quad (3.30)$$

$$i_{ext, 7}^{(e)} = \max(i_{7,8}^{(e)}), \quad i_{ext, 8}^{(e)} = \min(i_{7,8}^{(e)}), \quad \text{donde } i_{7,8}^{(e)} = \{i_p^{(e)} : j_p^{(e)} = j_{ext, 7}^{(e)}\} \quad (3.31)$$

Para terminar, ya definidas las coordenadas de los puntos extremos para todos los elementos, éstas se almacenan en un único par de vectores “ I_{ext} ” y “ J_{ext} ”, con la forma:

$$I_{ext} = \left(i_{ext, 1}^{(1)}, \dots, i_{ext, 8}^{(1)}, \dots, i_{ext, 1}^{(e)}, \dots, i_{ext, 8}^{(e)}, \dots, i_{ext, 1}^{(N_e)}, \dots, i_{ext, 8}^{(N_e)} \right) \quad (3.32)$$

$$J_{ext} = \left(j_{ext, 1}^{(1)}, \dots, j_{ext, 8}^{(1)}, \dots, j_{ext, 1}^{(e)}, \dots, j_{ext, 8}^{(e)}, \dots, j_{ext, 1}^{(N_e)}, \dots, j_{ext, 8}^{(N_e)} \right) \quad (3.33)$$

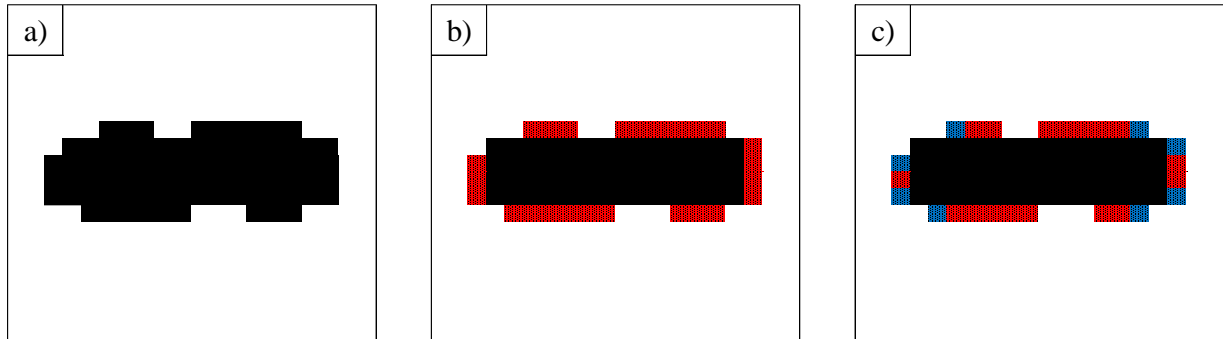


Figura 3.13 Ejemplo de cálculo de las coordenadas extremas de un elemento, con el elemento correspondiente (a), la primera etapa delimitando al elemento (b; en rojo) y la segunda etapa con los 8 pixeles finales (c; en azul)

Despreciando la notación con el índice extremo y el elemento al que pertenece, se denominará a las componentes de cada vector “ I_{ext} ” y “ J_{ext} ” como “ $i_{ext, m}$ ” y “ $j_{ext, m}$ ”, respectivamente, con “ m ” yendo entre uno y la cantidad de componentes de cada vector (en primera instancia, hasta $8 \cdot N_e$). De esta forma, ya se cumplen todas las condiciones para unir los segmentos de línea, siendo “ I_{ext} ” y “ J_{ext} ” los vectores con las coordenadas de partida de todas las posibles uniones.

Lo que faltaría en estos momentos es determinar si un posible punto de partida puede unirse con otro elemento de llegada. Para esto, se define una distancia de unión de elementos “ d ”, en pixeles, que irá desde un píxel hasta un cierto valor máximo de distancia de unión (es decir, $d = 1, \dots, d_{max}$; donde “ d_{max} ” es la distancia máxima mencionada). Así, la unión empezará por los elementos más cercanos, finalizando con los que estén separados por la distancia máxima.

De esta forma, partiendo desde $d = 1$ píxel, se buscan todos los pixeles que podrían unirse al punto de partida “ $(i_{ext, m}, j_{ext, m})$ ”. Se han clasificado las uniones en cuatro tipos: vertical hacia arriba,

vertical hacia abajo, horizontal y oblicua (Figura 3.14). Por simplicidad, en la definición de los tipos de uniones se expresan como $i_1 = i_{\text{ext}, m}$ y $j_1 = j_{\text{ext}, m}$ a las coordenadas de partida, mientras que “ i_2 ” y “ j_2 ” son las coordenadas de llegada. Así, una de las condiciones más importantes que debe cumplir cada uno de los cuatro tipos de uniones es la siguiente:

$$bw_{i_2j_2} = 1 \quad \wedge \quad lab_{i_1j_1} \neq lab_{i_2j_2} \tag{3.34}$$

Es decir, el punto de llegada “ (i_2, j_2) ” debe ser uno de los pixeles identificados en la imagen binaria, y además debe tener una etiqueta distinta al punto de partida. Nótese que no es relevante verificar si “ (i_1, j_1) ” fue identificado en la imagen binaria, ya que dicha condición fue asegurada por la forma en que se definieron “ I_{ext} ” y “ J_{ext} ”

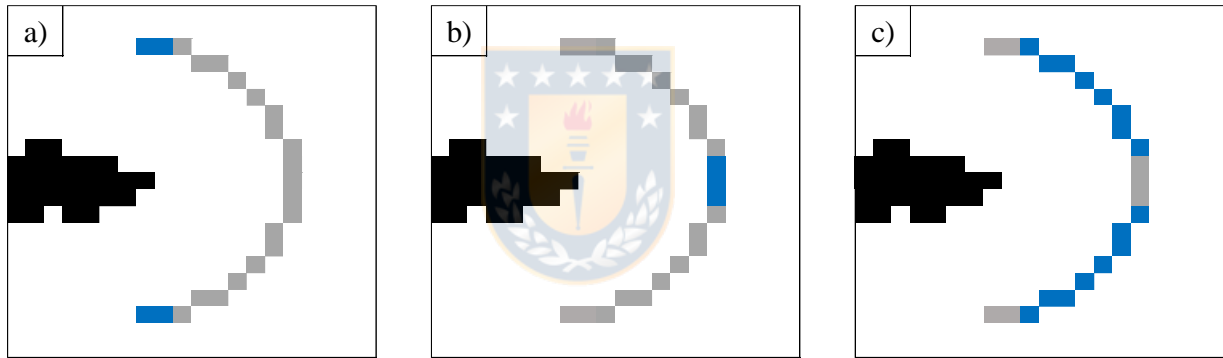


Figura 3.14 Representación de la búsqueda de puntos de llegada para cada tipo de unión: vertical hacia arriba y abajo (a), horizontal (b) y oblicua (c). Posibles puntos de llegada en gris, destacándolos en azul para cada tipo de unión. Distancia de unión $d = 7$ pixeles

Se comienza probando si es posible una unión vertical. En este caso, la Ecuación (3.34) es una condición suficiente para garantizar una correcta unión. Las expresiones de “ (i_2, j_2) ” para una unión hacia arriba y una unión hacia abajo son:

$$i_2 = i_1 - d - 1 \quad \wedge \quad (j_2 = j_1 \vee j_2 = j_1 + 1) \tag{3.35}$$

$$i_2 = i_1 + d + 1 \quad \wedge \quad (j_2 = j_1 \vee j_2 = j_1 + 1) \tag{3.36}$$

Se observa que pueden unirse verticalmente elementos que estén en la misma columna, pero también los que se encuentren desplazados un píxel hacia la derecha.

Si no es posible la unión vertical, se pone a prueba la unión horizontal. Ésta es más compleja, ya que debe impedirse la unión de líneas verticales muy cercanas, como ocurre cuando la intensidad de precipitación es alta, o en particular, en zonas de vaciamiento del instrumento. En casos como este, si sólo se verificara la Ecuación (3.34), las líneas verticales cercanas podrían terminar unidas por una recta horizontal, lo que seguramente estaría incorrecto.

Por lo tanto, deben reconocerse estos casos e impedirse las uniones horizontales en estas zonas, siendo la suma de “**BW**” en la vertical un buen indicador para su reconocimiento. En otras palabras, durante la unión horizontal de dos elementos debe comprobarse que la suma vertical de “**BW**” se encuentra bajo un cierto umbral para las columnas asociadas a los puntos de unión y, por seguridad, también para un cierto número de columnas vecinas. La condición mencionada y las coordenadas “ (i_2, j_2) ” de la unión horizontal se definen como:

$$\sum_{i=i_1^{\text{lim}}}^{i_2^{\text{lim}}} bw_{ij} \leq \text{sum}_v, \quad j = j_1 - \Delta j, \dots, j_2 + \Delta j \quad (3.37)$$

$$(i_2 = i_1 - 1 \vee i_2 = i_1 \vee i_2 = i_1 + 1) \wedge j_2 = j_1 + d + 1 \quad (3.38)$$

Donde “ sum_v ” es el valor límite que debe cumplir la suma de cada columna, para un grupo de columnas comprendido entre “ Δj ” a la izquierda del punto de partida y “ Δj ” a la derecha del punto de llegada. Un valor límite de $\text{sum}_v = 50$ y una vecindad de $\Delta j = 5$ píxeles han entregado los mejores resultados. Siendo así, si se cumplen las condiciones expuestas en las Ecuaciones (3.34) y (3.37), la unión de elementos de forma horizontal no presentará errores. Por último, tal como en la unión vertical, la Ecuación (3.38) muestra que la unión horizontal se realiza sobre la misma fila inicial, pero también una fila más arriba o más abajo.

Si ninguna de las uniones anteriores encuentra un elemento de llegada, se recurre a la unión oblicua. Dejar esta unión para el final no es algo al azar, sino que se debe a los costos computacionales

asociados a cada tipo de unión. Las uniones horizontales y verticales prueban pocas coordenadas de llegada para una cierta distancia, mientras la unión oblicua debe recorrer todas las posiciones que no se probaron anteriormente, siendo más lenta. Como se puede suponer, las coordenadas “ (i_2, j_2) ” en este caso corresponden a la posición de todos los pixeles que componen el arco de circunferencia de radio “ d ”, entre los ángulos de 90° y -90° (sin incluir a dichos ángulos ni al de 0° , ya que fueron evaluados por las uniones anteriores).

Las condiciones a cumplir podrían ser las mismas que en la unión horizontal, sin embargo, la condición de la Ecuación (3.37) es muy restrictiva, e impide uniones oblicuas con ángulos cercanos a 90° y -90° (para éstos, la suma en columnas es normalmente mayor a “ sum_v ”). Por tanto, en estos casos se ha permitido la opción de cumplir una de dos condiciones: la expuesta en la Ecuación (3.37), o bien la siguiente:

$$|\theta| = \left| \text{atan} \left(\frac{i_2 - i_1}{j_2 - j_1} \right) \right| \geq \theta_{\min} \quad (3.39)$$

Esto quiere decir que la magnitud del ángulo “ θ ” formado por la unión oblicua debe ser mayor a un cierto ángulo mínimo “ θ_{\min} ”. La experiencia ha sugerido un ángulo $\theta_{\min} = 70^\circ$.

Es importante señalar que los pixeles que componen la recta de unión entre los puntos “ (i_1, j_1) ” e “ (i_2, j_2) ” no deben formar parte de ningún segmento de línea, es decir, debe cumplirse que $\text{bw}_{ij} = 0$ para todos los “ (i, j) ” que forman dicha recta. De no tomar en cuenta esta condición, las uniones podrían crear líneas que intersectan los segmentos ya existentes. Por otra parte, las componentes “ i_1 ” e “ i_2 ” deben estar entre $i_1^{\text{lim}, \text{“”}}$ e “ $i_2^{\text{lim}, \text{“”}}$ para todas las uniones descritas.

Una vez que se probaron las uniones para una cierta distancia y para todas las posibles coordenadas de partida, se actualiza la matriz de etiquetas “**LAB**” junto al valor de las etiquetas “ $\text{lab}_{\text{inicial}}$ ” y “ $\text{lab}_{\text{final}}$ ” (debido a los cambios en “**BW**”); definiendo las nuevas etiquetas como los valores de “**LAB**” en “ $(i_{\text{inicial}}, j_{\text{inicial}})$ ” e “ $(i_{\text{final}}, j_{\text{final}})$ ”. A continuación, se aumenta la distancia de unión “ d ” en 1 píxel y se recorren nuevamente todos los posibles puntos de partida, buscando para cada uno un potencial punto de llegada.

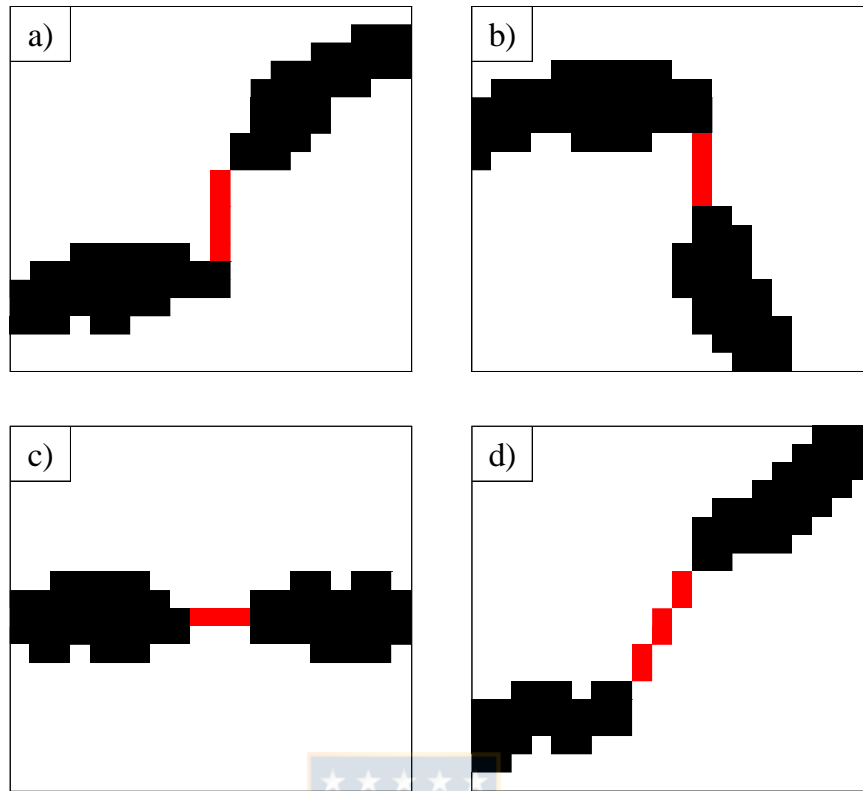


Figura 3.15 Representación de los cuatro tipos de uniones entre segmentos: (a) vertical hacia arriba, (b) vertical hacia abajo, (c) horizontal y (d) oblicua; con distintas distancias de unión en cada caso. Los pixeles de las rectas de unión se muestran en color rojo

Se observa que al siguiente recorrido de “ I_{ext} ” y “ J_{ext} ” no es necesario probar las coordenadas que ya formaron una unión, por lo tanto, éstas son eliminadas de ambos vectores. Algo similar ocurre a medida que aumenta la distancia “ d ” y crece el tamaño de los segmentos de línea, en particular, para los segmentos inicial y final. Para aclarar esto último, el aumento de tamaño del segmento inicial descartará de posibles uniones a todos los puntos de partida que posean coordenadas “ $j_{ext, m}$ ” menores a la columna más a la derecha de dicho segmento. En otras palabras, con el avance del segmento inicial se desprecian los puntos de partida que han ido quedando atrás, por lo que también se eliminan de “ I_{ext} ” y “ J_{ext} ”.

Para dar forma a esta idea, se define a “ $j_{inicial}^*$ ” y “ j_{final}^* ” como la columna más a la derecha donde llega el segmento inicial y la columna más a la izquierda donde llega el segmento final, respectivamente, utilizando las etiquetas “ $lab_{inicial}$ ” y “ lab_{final} ” para su cálculo. Una vez calculadas ambas columnas, todos los índices de “ J_{ext} ” que sean menores a “ $j_{inicial}^*$ ” y mayores “ j_{final}^* ” son

eliminados (junto con sus índices “ I_{ext} ” respectivos). De este modo, se minimizan las posibilidades de unir elementos en forma errada, al mismo tiempo que el proceso se vuelve más eficiente.

Esta etapa del proceso de unión se repite de forma iterativa, aumentando la distancia “ d ” hasta encontrarse en uno de dos casos: (1) que se haya unido todos los segmentos en una línea continua, o (2) que la distancia “ d ” haya superado su valor máximo de unión. El caso (1) se relaciona a que “ $J_{inicial}^*$ ” sea mayor o igual a “ J_{final}^* ”, ya que esto sucederá sólo cuando la línea esté completamente unida. Por otro lado, el caso (2) ocurrirá cuando la distancia de unión llegue al valor de “ d_{max} ”, impidiendo uniones demasiado grandes. Se propone $d_{max} = (i_3^{grid} - i_1^{grid})/2$ como distancia límite para unir elementos, lo que corresponde a la mitad de la altura de la grilla. De encontrarse en este caso, se recomienda que el usuario revise la imagen y la corrija manualmente.

Finalmente, se conservan sólo los elementos de “**BW**” que poseen un área mayor a un cierto valor “ $area_{min}$ ”, borrando los demás. La experiencia sugiere eliminar todos los elementos que cuenten con un área menor a $area_{min} = 1.5 \cdot (i_2^{lim} - i_1^{lim})$ pixeles, donde “ $(i_2^{lim} - i_1^{lim})$ ” equivale a la superficie que tendría una línea de vaciamiento de grosor 1 píxel. De esta forma, sólo se guardarán los elementos de gran tamaño, como la línea del pluviograma, eliminando manchas u otros objetos seleccionados durante la identificación. Completado este proceso con éxito, se poseerá una imagen “**BW**” sin columnas vacías ni ruido, pudiendo utilizarla en el trazado de línea. Para un mejor entendimiento del proceso, su diagrama de flujo se encuentra en el Anexo 3.1.

3.1.4 Trazado de la línea

El objetivo del trazado de la línea es representar en coordenadas cartesianas a la línea de la imagen “**BW**” que proviene del proceso de unión y eliminación de elementos. En general, el trazado entrega como resultado coordenadas “ y_j ” únicas para cada columna “ j ” de la línea, sin embargo, en los pluviogramas chilenos es común encontrarse con líneas de vaciamiento que descienden con un cierto retroceso (Figura 3.16), y, en consecuencia, las zonas del vaciamiento requieren más de un valor “ y_j ” por cada columna para su correcto trazado. Por otra parte, en el cálculo de las coordenadas otros autores han utilizado sólo el centroide de los pixeles binarios, pero en este

trabajo se ha empleado una media ponderada de su posición, que otorga mayor importancia a los pixeles de línea en función de su intensidad del color azul.

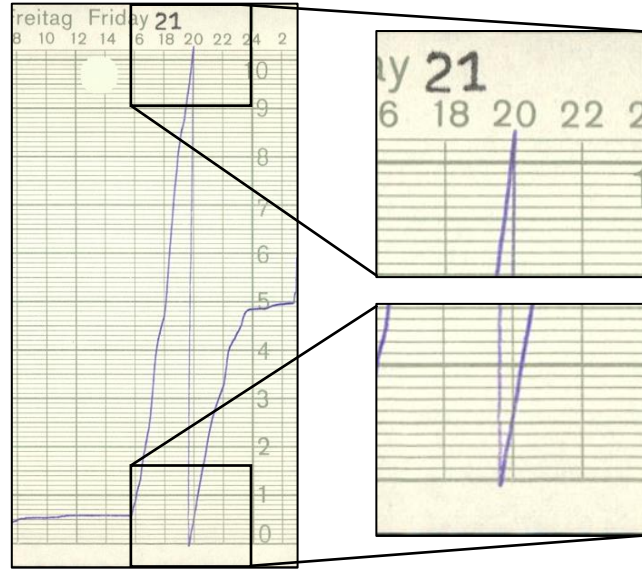


Figura 3.16 Ejemplo de línea de vaciamiento con retroceso, con detalle de su inicio y final (Estación El Tepual, 21 de abril de 2006, alrededor de las 20:00 horas)

Antes que nada, es necesario detectar los instantes de vaciamiento en el pluviograma. Para ello, primero se calcula la posición de los pixeles de la línea que se encuentran más arriba y más abajo en cada columna, creando una envolvente de los pixeles identificados en “**BW**”. Los índices “*i*” de estos pixeles se almacenan en dos vectores, “ I^{up} ” para la parte de arriba de la envolvente e “ I^{dw} ” para la parte de abajo, definiéndolos según las siguientes expresiones:

$$i_j^{up} = \min(\{i : bw_{ij} = 1\}) \tag{3.40}$$

$$i_j^{dw} = \max(\{i : bw_{ij} = 1\}) \tag{3.41}$$

Donde “ i_j^{up} ” e “ i_j^{dw} ” son las componentes de “ I^{up} ” e “ I^{dw} ” en la columna “*j*”.

Entre los menores valores de “ I^{up} ” se encontrará el inicio de un vaciamiento (su punto más alto en la imagen), mientras que su final se hallará entre los mayores valores de “ I^{dw} ” (su punto más bajo). De esta forma, se plantea que el cálculo del inicio y final de los vaciamientos sea similar a la

definición de los *peaks* en el reconocimiento de la grilla, buscando puntos extremos que cumplan con ciertas condiciones. Así, se definen los “*peaks*” de “ I^{up} ” como los mínimos locales que son menores a un valor límite “ i_{up}^* ”, del mismo modo que los “*peaks*” de “ I^{dw} ” son los máximos locales mayores a un valor “ i_{dw}^* ”; obteniéndose “ i_{up}^* ” e “ i_{dw}^* ” a partir de:

$$i_{up}^* = r^* \cdot [\max(I^{up}) - \min(I^{up})] + \min(I^{up}) \quad (3.42)$$

$$i_{dw}^* = (1 - r^*) \cdot [\max(I^{dw}) - \min(I^{dw})] + \min(I^{dw}) \quad (3.43)$$

Donde “ r^* ” corresponde a la fracción superior e inferior de la línea donde se encontraría el inicio y final de un vaciamiento. Observando la posición general de los vaciamientos se ha establecido que $r^* = 0.3$, es decir, el inicio y final de un vaciamiento se localizan en el 30 %, superior e inferior, de la longitud vertical de la línea completa. Las coordenadas “(i, j)” de los “*peaks*” de “ I^{up} ” se almacenan en los vectores “ I^{sup} ” y “ J^{sup} ”, al igual que los “*peaks*” de “ I^{dw} ” se almacenan en los vectores “ I^{inf} ” y “ J^{inf} ”.

Sin embargo, el cálculo de los *peaks* no es suficiente para definir los puntos de vaciamiento de forma correcta, ya que la línea puede presentar otros máximos y mínimos locales, debido a, por ejemplo, irregularidades en el movimiento del instrumento de medición. Aunque algunos de estos *peaks* son descartados mediante la definición de “ i_{up}^* ” e “ i_{dw}^* ”, aún podrían existir otros extremos dentro de la fracción superior e inferior. Por esto debe definirse otra característica que identifique a los puntos de vaciamiento y descarte a los demás *peaks*.

En este sentido, la principal condición que comparten los vaciamientos es que, entre dos vaciamientos consecutivos, el índice “i” de los pixeles de la línea varía bastante, alcanzando valores muy alejados del índice “i” del inicio o final de un vaciamiento (ya que entre dos vaciamientos la línea debe bajar a 0 y subir a 10 mm). Por el contrario, si uno de esos *peaks* es otro tipo de máximo o mínimo, su índice “i” estará relativamente cerca del índice “i” más lejano de la línea. En concreto, un *peak* superior corresponderá al inicio de un vaciamiento si, entre este *peak* y el siguiente, existe algún valor de “ I^{up} ” significativamente mayor a su índice en “ I^{sup} ”. Igualmente, un *peak* inferior corresponderá al final de un vaciamiento si, entre este *peak* y el anterior, existe algún valor de “ I^{dw} ”

significativamente menor a su índice en “ I^{inf} ”. Matemáticamente, las condiciones que deben cumplir el inicio y final de un vaciamiento son:

$$i_k^{\text{sup}} - \max(i_J^{\text{up}}) \geq \Delta i, \quad J = j_k^{\text{sup}}, \dots, j_{k+1}^{\text{sup}}, \quad k = 1, \dots, N_k^{\text{sup}} - 1 \quad (3.44)$$

$$\min(i_J^{\text{dw}}) - i_k^{\text{inf}} \geq \Delta i, \quad J = j_{k-1}^{\text{inf}}, \dots, j_k^{\text{inf}}, \quad k = 2, \dots, N_k^{\text{inf}} \quad (3.45)$$

Donde “ i_k^{sup} ” es el índice “ i ” del *peak* superior número “ k ”, e “ i_J^{up} ” son los valores de la envolvente “ I^{up} ” en el intervalo “ J ”, comprendido entre “ j_k^{sup} ” y “ j_{k+1}^{sup} ”. Paralelamente, “ i_k^{inf} ” es el índice “ i ” del *peak* inferior “ k ”, e “ i_J^{dw} ” son los valores de “ I^{dw} ” entre “ j_{k-1}^{inf} ” y “ j_k^{inf} ”. Además, “ N_k^{sup} ” y “ N_k^{inf} ” son el número de *peaks* superiores e inferiores, y “ Δi ” es la separación mínima que debe existir entre el inicio (o final) de un vaciamiento y el píxel más lejano del segmento de la línea. Se ha establecido que $\Delta i = 10$ píxeles, tomando en cuenta que en vaciamientos muy cercanos la línea suele superponerse, reduciéndose notoriamente la separación entre los puntos de vaciamiento y la línea identificada. La Figura 3.17 representa la definición del inicio y el final de un vaciamiento, incluyendo a los otros máximos y mínimos locales.

Los *peaks* superiores que no cumplen con la Ecuación (3.44) son eliminados de “ I^{sup} ” y “ J^{sup} ”, al igual que los *peaks* inferiores que no cumplen con la Ecuación (3.45) son eliminados de “ I^{inf} ” y “ J^{inf} ”. Así, los nuevos vectores poseen la misma cantidad de componentes superiores e inferiores, que son tantas como la cantidad de vaciamientos en la imagen. Para simplificar la notación matemática, las coordenadas “ $(i_v^{\text{sup}}, j_v^{\text{sup}})$ ” e “ $(i_v^{\text{inf}}, j_v^{\text{inf}})$ ” corresponderán al inicio y final del vaciamiento “ v ”, donde $v = 1, \dots, N_v$ y “ N_v ” es el total de veces que se vació el instrumento (o sea, $N_k^{\text{sup}} = N_k^{\text{inf}} = N_v$ después de la eliminación).

Una vez identificados los vaciamientos, es posible representar la línea en coordenadas cartesianas. Se define como “ X ” al vector de coordenadas horizontales, mientras que “ Y ” es el vector de coordenadas verticales. Un primer aspecto a considerar es el número de elementos de ambos vectores, lo que depende principalmente de la presencia de líneas de vaciamiento con retroceso.

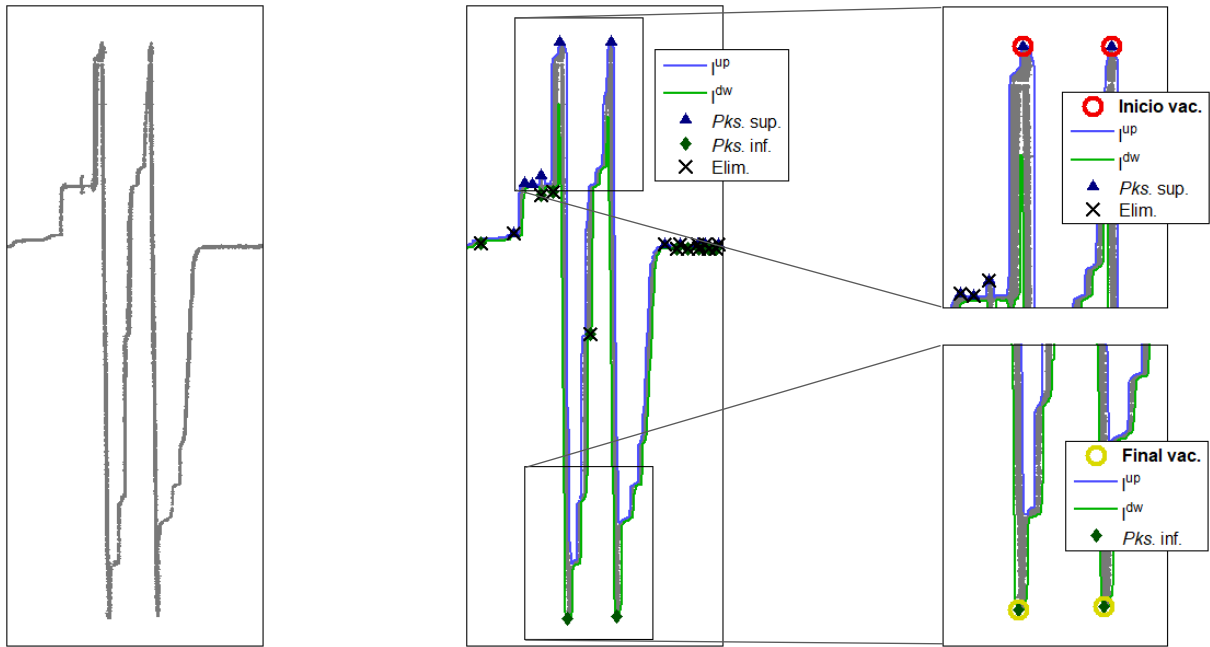


Figura 3.17 Representación de la búsqueda de zonas de vaciamiento, incluyendo la imagen binaria original (izquierda); la envolvente superior e inferior, los *peaks* de cada envolvente, y los *peaks* eliminados (centro); y un acercamiento al inicio y final de los vaciamientos (derecha)

Cuando no ocurren vaciamientos con retroceso, $j_v^{sup} < j_v^{inf}$ para los “ N_v ” vaciamientos, y el tamaño de los vectores “X” e “Y” es simplemente la longitud horizontal de la línea, en píxeles. En cambio, cuando existe alguna bajada con retroceso, $j_v^{sup} \geq j_v^{inf}$ para un cierto vaciamiento “v”, debiendo incluirse esta diferencia en el tamaño de “X” e “Y”. Siendo así, el número de elementos de “X” e “Y”, llamado “ N_{xy} ”, será:

$$N_{xy} = (j_{final} - j_{inicial} + 1) + \sum_{v=1}^{N_v} \max(j_v^{sup} - j_v^{inf} + 1, 0) \quad (3.46)$$

Donde el primer término entre paréntesis representa la longitud de la línea, mientras que la sumatoria corresponde al total de píxeles que retrocedió la línea debido a la ocurrencia de vaciamientos (de no haber ningún vaciamiento se desprecia este último término). Luego, es posible definir el vector de coordenadas horizontales “X”, que, dependiendo del caso, se representará a partir de:

$$X = \begin{cases} (j_{\text{inicial}}, \dots, j_{\text{final}}), & \text{si } N_v = 0 \\ (j_{\text{inicial}}, \dots, j_v^{\text{sup}}, \dots, j_v^{\text{inf}}, \dots, j_{\text{final}}), & \text{si } j_v^{\text{sup}} < j_v^{\text{inf}} \\ (j_{\text{inicial}}, \dots, j_v^{\text{sup}}, j_v^{\text{inf}}, \dots, j_{\text{final}}), & \text{si } j_v^{\text{sup}} \geq j_v^{\text{inf}} \end{cases} \quad (3.47)$$

Aquí se distingue entre tres situaciones: (1) no hay vaciamentos, (2) “ j_v^{sup} ” está detrás de “ j_v^{inf} ” (en el vaciamento “v” no hay retroceso), teniendo que agregar componentes de avance entre las dos coordenadas “j”; o (3) “ j_v^{sup} ” está delante de “ j_v^{inf} ” (en el vaciamento “v” hay retroceso), encontrándose ambos como elementos consecutivos de “X”.

Creado este vector, resta obtener sus coordenadas “Y” correspondientes. Para esto se recorre cada componente “ x_m ” del vector “X”, calculando los “ y_m ” asociados (con $m = 1, \dots, N_{xy}$) a partir de un promedio ponderado de las coordenadas “i” de la línea para una cierta columna “j”. La media ponderada tiene como objetivo otorgar mayor importancia a los pixeles cuyo color azul sea más intenso que el rojo y verde, mejorando así la precisión del trazado. Tomando en cuenta lo anterior, el cálculo de “ y_m ” se define según las siguientes ecuaciones:

$$y_m = \frac{1}{W_m} \sum_{i=i_{\text{up}}}^{i_{\text{dw}}} w_{ij} \cdot b_{w_{ij}} \cdot i, \quad j = x_m \quad (3.48)$$

$$W_m = \sum_{i=i_{\text{up}}}^{i_{\text{dw}}} w_{ij} \cdot b_{w_{ij}}, \quad j = x_m \quad (3.49)$$

$$w_{ij} = \left(\max(b_{ij} - r_{ij}, 0) + \max(b_{ij} - g_{ij}, 0) + 1 \right)^\beta \quad (3.50)$$

Donde “ w_{ij} ” es el factor de ponderación asociado al píxel “(i, j)”, que está formado por la diferencia de la intensidad de color azul respecto la de rojo y verde en dicho píxel, además de un exponente “ β ” que permite manipular la magnitud de los factores mediante la calibración de un solo parámetro. Igualmente, “ W_m ” es la suma de los factores de ponderación que forman parte de la línea para una cierta columna $j = x_m$, y los índices “ i_{up} ” e “ i_{dw} ” que limitan a las sumatorias corresponden al valor de las envolventes “ i_j^{up} ” e “ i_j^{dw} ” en la misma columna $j = x_m$. La Figura 3.18

muestra en forma gráfica el proceso de trazado, incluyendo los pixeles identificados “ bw_{ij} ” y los factores de ponderación “ w_{ij} ”.

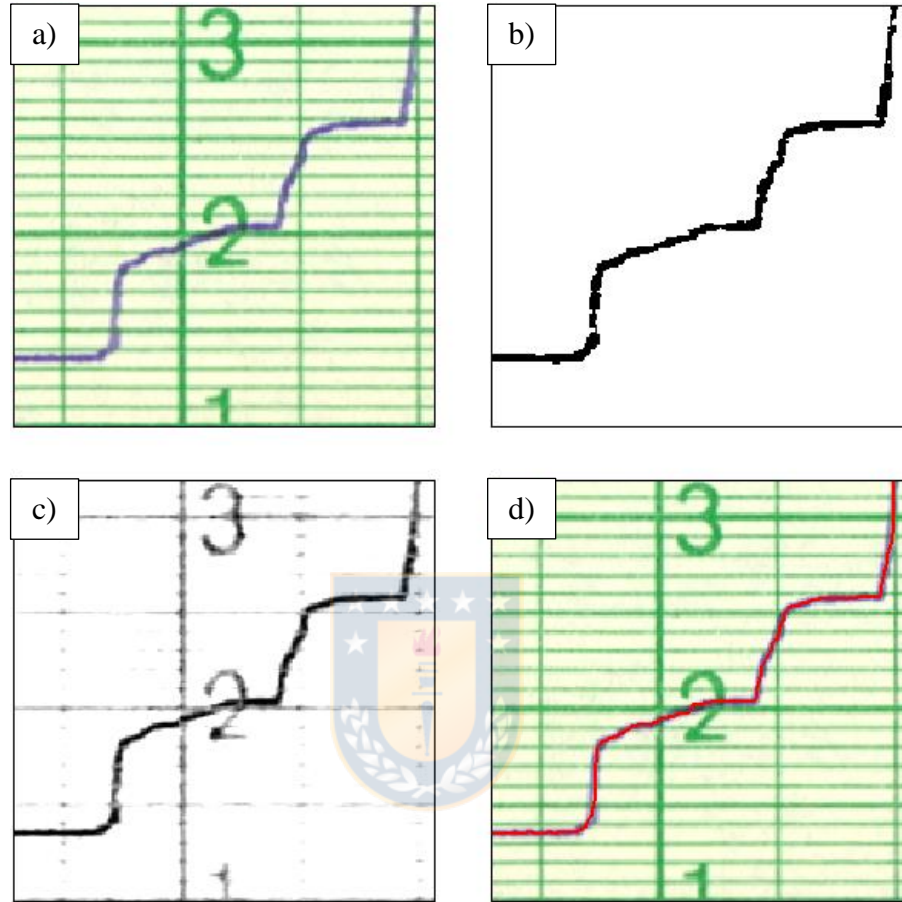


Figura 3.18 Representación del proceso de trazado de una línea, con el acercamiento a un pluviograma (a), los pixeles de línea identificados “ bw_{ij} ” (b), los factores de ponderación “ w_{ij} ” presentados como una imagen en escala de grises (c), y la línea trazada en color rojo (d)

De este modo, se consigue una estimación más precisa de las coordenadas de línea, al otorgar una importancia menor a un píxel de línea de color azul tenue en comparación a otro con un azul más fuerte. El uso de una media ponderada previene el suavizado de la línea ante cambios bruscos de dirección (comunes antes o después de pulsos de precipitación de alta intensidad), a diferencia de los cálculos de coordenadas basados sólo en el centroide, donde el suavizado es frecuente (Figura 3.19, izquierda). Para lograrlo, el exponente “ β ” se estimó como el menor valor que no entregara una línea suavizada, en comparación al cálculo según dicho centroide (que es equivalente a $\beta = 0$). A partir de las pruebas realizadas, se consideró que $\beta = 3$.

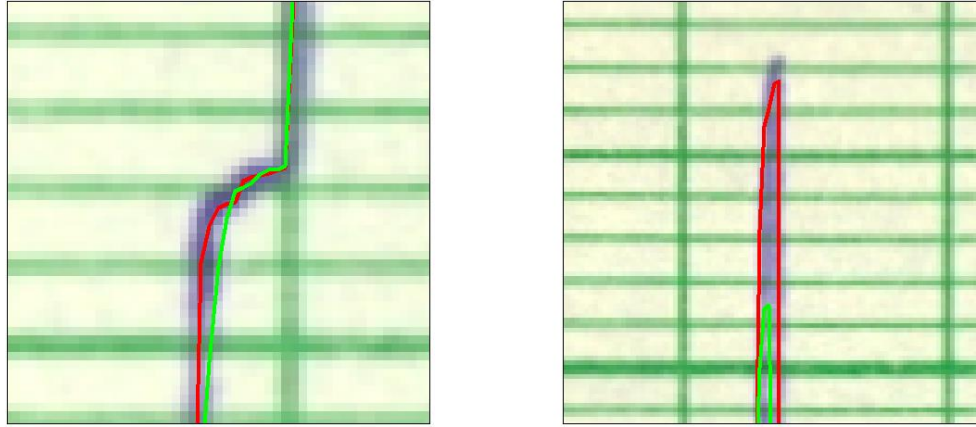


Figura 3.19 Comparaciones entre diferentes trazados de línea. A la izquierda: utilizando la media ponderada ($\beta = 3$, en rojo) o el centroide de los píxeles ($\beta = 0$, en verde). A la derecha: con correcciones de “ i_{up} ” e “ i_{dw} ” (en rojo) y sin correcciones (en verde)

No obstante, también puede ocurrir el suavizado en los puntos de vaciamiento “ (i_v^{sup}, j_v^{sup}) ” e “ (i_v^{inf}, j_v^{inf}) ”. En éstos, el cambio de dirección es tan brusco que la tinta crea una línea gruesa en la zona, impidiendo una descripción correcta a partir de una media ponderada. Se propone como solución modificar el valor “ i_{up} ” o “ i_{dw} ”, acercando “ i_{dw} ” hacia “ i_{up} ” en el inicio de un vaciamiento o “ i_{up} ” hacia “ i_{dw} ” en su final, lo que dejaría fuera a aquellos píxeles que suavizan el trazado. En el inicio de un vaciamiento, se corrige “ i_{dw} ” según:

$$i_{dw} = \begin{cases} i_{j-th}^{up} & , \quad \text{si } i_{j-th}^{up} > i_{up} \wedge j_v^{sup} - th \leq x_m < j_v^{sup} \\ i_{up} + th & , \quad \text{si } x_m = j_v^{sup} \end{cases} \quad (3.51)$$

Donde “ th ” es el grosor típico de una línea (para las imágenes empleadas, $th = 5$ píxeles). Según lo anterior, se modifican los “ i_{dw} ” sobre una ventana de “ th ” píxeles a la izquierda del vaciamiento, reemplazando su valor por el de la envolvente “ I^{up} ” en “ $j - th$ ”, a menos que esté justo en el vaciamiento, cambiando el valor por “ $i_{up} + th$ ”. De forma análoga, al final de un vaciamiento se corrige “ i_{up} ” mediante:

$$i_{up} = \begin{cases} i_{j+th}^{dw} & , \quad \text{si } i_{j-th}^{up} > i_{dw} \wedge j_v^{inf} \leq x_m < j_v^{inf} + th \\ i_{dw} - th & , \quad \text{si } x_m = j_v^{inf} \end{cases} \quad (3.52)$$

Con la corrección en los puntos de vaciamiento se consigue un trazado que alcanza el punto más alto o más bajo de la línea, tal como se muestra en la Figura 3.19 (derecha), sin que se vea reducida su extensión vertical. Por otra parte, las correcciones anteriores también facilitan el trazado de las líneas de vaciamiento con retroceso, pero sólo lo logran cuando el retroceso es pequeño (menor o igual a “th”), siendo necesaria una nueva etapa de corrección para retrocesos mayores.

En esta nueva etapa se utiliza un enfoque similar al anterior, cambiando los “ i_{up} ” o “ i_{dw} ” existentes. Se establece que una columna con retroceso presenta una separación entre “ i_{up} ” e “ i_{dw} ” mayor a una cierta distancia umbral, la que debe reducirse acercando uno de estos dos índices al otro, dependiendo de cuál esté más alejado de la línea. En resumen, se debe corregir “ i_{up} ” o “ i_{dw} ” si se cumple que $i_{dw} - i_{up} \geq d_{dw-up}$, siendo “ d_{dw-up} ” el umbral mencionado. Las expresiones que corrigen un índice u otro son las siguientes:

$$i_{up} = i_{dw} - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{N_i} bw_{ij}, \quad j = x_m, \quad \text{si } |i_{dw} - y_{m-1}| < |i_{up} - y_{m-1}| \quad (3.53)$$

$$i_{dw} = i_{up} + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{N_i} bw_{ij}, \quad j = x_m, \quad \text{si } |i_{dw} - y_{m-1}| \geq |i_{up} - y_{m-1}| \quad (3.54)$$

Donde la sumatoria representa a la cantidad de pixeles identificados en la columna $j = x_m$, e “ y_{m-1} ” es la coordenada vertical que se encuentra a la izquierda de “ y_m ”. Se considera que “ y_{m-1} ” es un buen indicador de la posición de la línea, ya que es el valor conocido que se encuentra más cerca de la coordenada “ y_m ”. Por otro lado, se ha establecido que la distancia umbral es igual a la mitad de la altura de la grilla, es decir, $d_{dw-up} = (i_3^{grid} - i_1^{grid})/2$.

De esta forma, los vectores “X” e “Y” serán estimados con éxito, sin que ocurra el suavizado en el trazado ni problemas en los vaciamientos con retroceso. Siendo así, es posible continuar con el último proceso del método, en el cual se convierte la línea a valores de precipitación. Al igual que en los procesos anteriores, un diagrama de flujo de éste se encuentra en el Anexo 3.1.

3.1.5 Conversión a valores de precipitación

Este último proceso entrega los resultados esperados del método, es decir, la precipitación registrada en el pluviograma. Para ello se utilizan los vectores “X” e “Y” obtenidos anteriormente, transformándolos a vectores de precipitación “P” y tiempo “T” a partir del cálculo de la resolución temporal y resolución de precipitación asociada al ancho y alto de un píxel. Partiendo por la resolución temporal, se define el vector “T” según:

$$T = (t_{\text{inicial}}, t_{\text{inicial}} + \Delta t, \dots, t_{\text{final}} - \Delta t, t_{\text{final}}) \quad (3.55)$$

$$\Delta t = \frac{(t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}})}{N_{xy}} \quad (3.56)$$

Donde “ Δt ” es la resolución temporal asociada a un píxel, mientras que “ t_{inicial} ” y “ t_{final} ” son los tiempos de inicio y término del pluviograma, que se obtienen transformando a tiempo las fechas de colocación y retiro requeridas por el programa. En contraste, el cálculo del vector “P” es un poco más complejo, ya que su resolución de precipitación es distinta en cada vaciamiento del pluviograma. Esto se debe a que depende de la distancia vertical entre el final del vaciamiento anterior “ i_{v-1}^{inf} ” y el inicio del vaciamiento siguiente “ i_v^{sup} ” (entre “ i_{inicial} ” e “ i_1^{sup} ” antes del primer vaciamiento, o entre “ $i_{N_v}^{\text{inf}}$ ” e “ i_{final} ” después del último).

Se calcula la resolución de precipitación “ Δp_v ”, identificando tres casos que dependen de la zona de cálculo: (1) antes del primer vaciamiento ($v = 1$), (2) entre el primero y el último vaciamiento ($v = 2, \dots, N_v$), y (3) después del último vaciamiento ($v = N_v + 1$). En el primer caso se tiene que:

$$\Delta p_1 = \begin{cases} \frac{10}{i_{\text{inicial}} - i_1^{\text{grid}}}, & \text{si } \frac{i_{\text{inicial}} - i_1^{\text{grid}}}{i_3^{\text{grid}} - i_1^{\text{grid}}} \geq r_p \\ \frac{10}{i_{\text{inicial}} - i_1^{\text{grid}}} \cdot \frac{i_{\text{inicial}} - i_1^{\text{grid}}}{i_3^{\text{grid}} - i_1^{\text{grid}}}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.57)$$

Donde “ r_p ” es un número que representa la similitud mínima que debe existir entre la longitud vertical de la línea y la longitud vertical de la grilla para considerar si la línea partió o no desde los

0 mm. Teóricamente, dicha similitud debería ser igual a uno si la línea empezó de 0 mm; no obstante, en la práctica debe considerarse una pequeña tolerancia ante posibles detalles en el movimiento del pluviógrafo. Se definió $r_p = 0.98$, lo que quiere decir que la distancia entre “ i_1^{sup} ” e “ $i_{inicial}$ ” debe ser mayor o igual a un 98 % de la longitud vertical de la grilla para asumir que la precipitación partió desde 0 mm. En caso contrario, la precipitación acumulada hasta el primer vaciamiento será sólo una parte de los 10 mm, en proporción a dicha similitud.

A diferencia del primero, el cálculo del segundo caso es el más simple, ya que siempre supone que el instrumento se vació y se volvió a llenar, pasando de 0 a 10 mm. Se define “ Δp_v ” como:

$$\Delta p_v = \frac{10}{i_{v-1}^{inf} - i_v^{sup}}, \quad v = 2, \dots, N_v \quad (3.58)$$

Y por último, el tercer caso será similar al primero, determinándose “ Δp_{N_v+1} ” según:

$$\Delta p_{N_v+1} = \begin{cases} \frac{10}{i_{N_v}^{inf} - i_{final}}, & \text{si } \frac{i_4^{grid} - i_{final}}{i_4^{grid} - i_2^{grid}} \geq r_p \\ \frac{10}{i_{N_v}^{inf} - i_{final}} \cdot \frac{i_4^{grid} - i_{final}}{i_4^{grid} - i_2^{grid}}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.59)$$

Donde “ r_p ” es la razón de similitud mínima entre la longitud vertical de la grilla y la distancia vertical entre “ i_{final} ” e “ i_4^{grid} ”. Una vez calculado cada caso es posible determinar las componentes del vector precipitación “P”, llamadas “ p_m ” (con $m = 1, \dots, N_{xy}$), a partir de la ecuación:

$$p_m = \begin{cases} \Delta p_1 \cdot \max(- (y_m - y_m^{ref}), 0) & \text{si } v = 1 \\ \Delta p_v \cdot \max(- (y_m - y_m^{ref}), 0) & \text{si } v = 2, \dots, N_v \\ \Delta p_{N_v+1} \cdot \max(- (y_m - y_m^{ref}), 0) & \text{si } v = N_v + 1 \end{cases} \quad (3.60)$$

Donde el valor de “ p_m ” depende nuevamente de la zona en que se encuentre. Además, “ y_m^{ref} ” es una coordenada “ y_m ” de referencia, específicamente, la más alta en la imagen (baja como valor) entre

el último vaciamiento e “ y_m ”. Partiendo de un valor de $y_m^{\text{ref}} = i_v^{\text{inf}}$ (o de $y_m^{\text{ref}} = i_{\text{inicial}}$ al comienzo de la línea), se calcula la coordenada de referencia de cada “ y_m ”, según:

$$y_m^{\text{ref}} = \begin{cases} y_{m-1}, & \text{si } y_{m-1}^{\text{ref}} > y_{m-1} \\ y_{m-1}^{\text{ref}}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.61)$$

Es importante señalar que la descripción anterior para el cálculo de los “ p_m ” asume la ocurrencia de al menos un vaciamiento. No obstante, esto no tiene por qué ser así (no necesariamente precipitarán más de 10 mm). El cálculo del vector “P” para la situación sin vaciamiento es más simple que los anteriores, determinándose los “ p_m ” a partir de:

$$p_m = \Delta p \cdot \max(- (y_m - y_m^{\text{ref}}), 0) \quad (3.62)$$

$$\Delta p = \frac{10}{i_4^{\text{grid}} - i_2^{\text{grid}}} \quad (3.63)$$

Finalizado el cálculo de “P”, se obtiene la precipitación acumulada “ P_{acum} ”, que puede ser de más fácil interpretación para el usuario del programa. Una vez terminada la conversión de valores de precipitación habrá concluido la labor del método propuesto. Luego, es tarea del programa PluvioReader exportar los resultados obtenidos, escribiendo en una planilla de cálculo la fecha asociada al vector “T”, la precipitación “P” y precipitación acumulada “ P_{acum} ”. Para terminar, en el Anexo 3.1 se encuentra un diagrama de flujo de este proceso.

3.2 Características del software

El método descrito anteriormente se presenta en el *software* PluvioReader, donde cada uno de los procesos corresponde a una opción del programa. Además, el programa contiene otros procesos que no siempre son necesarios, junto a opciones y características que van desde la edición de imagen hasta procesar la información generada. Cada uno de los procesos, opciones o características forman parte de una colección de rutinas escritas en MATLAB, lo que requirió el desarrollo de una GUI ordenada e intuitiva que simplificara la interacción con el usuario.

Para digitalizar pluviogramas, el programa requiere de tres tipos de información. La primera corresponde a la imagen digital del pluviograma que se desea procesar. Ésta debe ser una imagen a color, recomendándose una resolución de 300 DPI o un largo aproximado de 5000 píxeles. En segundo lugar, el *software* necesita de las fechas de colocación y retiro del pluviograma, para calcular la resolución temporal de cada píxel, y en consecuencia, el tiempo asociado a cada valor de precipitación. Por último, se necesita conocer los márgenes de la grilla del pluviograma, que fueron calculados durante su correspondiente pre-proceso.

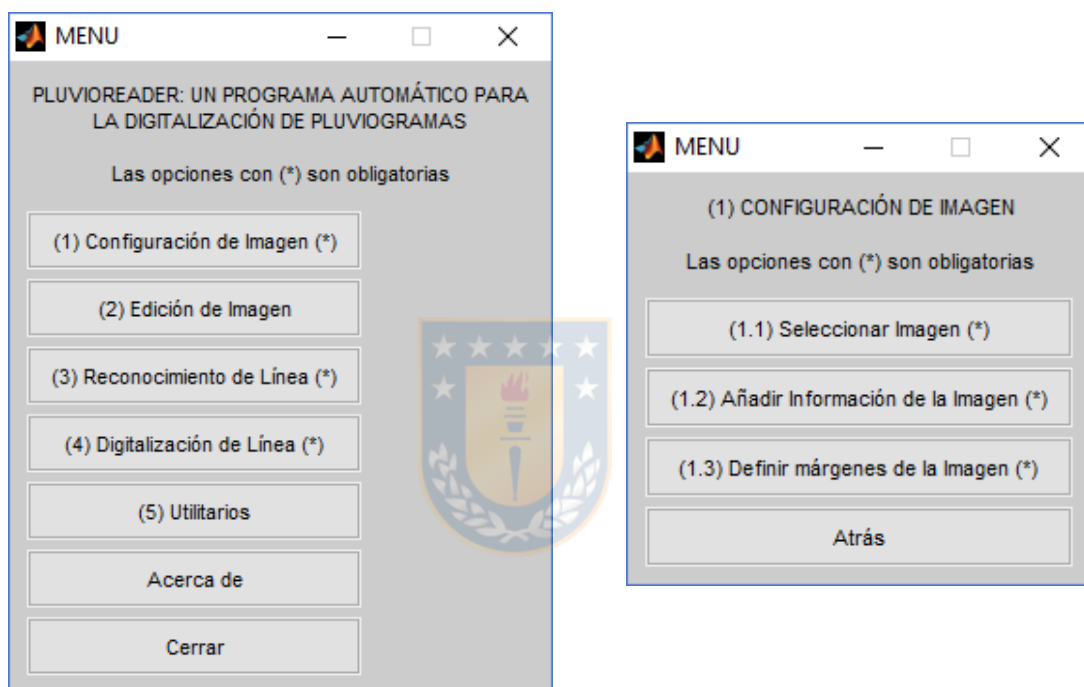


Figura 3.20 Presentación de la GUI del programa, con su menú principal mostrando cada uno de sus submenús (izquierda), junto al primer submenú con sus opciones (derecha)

Una vez que el *software* se está ejecutando, su interacción con el usuario es bastante amigable. La presentación de su GUI muestra cada opción en una organización simple, con un menú principal y sólo un nivel de submenús (Figura 3.20). Asimismo, al asignar un nombre a cada opción se tuvo la precaución de distinguir entre aquellos pasos necesarios para la digitalización y las demás características del programa, incluyendo instrucciones de uso en varias opciones. Igualmente, se identificó un gran número de situaciones de error, principalmente relacionadas al mal uso del programa o a la entrega de información errónea, creando ventanas emergentes que describen cada error y cómo proceder de forma correcta.

Luego de ejecutar el programa y obtener la precipitación desde la imagen digital se debe exportar los resultados. El programa ha sido empleado para exportar valores de precipitación con una resolución de 5 min, sin embargo, esta resolución puede cambiarse por una aún menor. La resolución temporal mínima de exportación corresponderá al valor de tiempo asociado a 1 píxel, que es del orden de unos 2 min para pluviogramas semanales con imágenes de 5000 pixeles de largo. En caso de elegirse una resolución menor a la mínima, aparecerá una ventana de error como se describió anteriormente. Los resultados son exportados a una planilla de Microsoft Excel.

Sobre la fidelidad de los resultados, se señala que las series de precipitación exportadas con una resolución temporal cercana a la mínima deben utilizarse con precaución. Aunque estos valores sean matemáticamente correctos y representativos de la imagen digital, su uso podría exigir a los pluviogramas, en papel, más información de la que pueden entregar con certeza. Así, al utilizar estas series en alguna aplicación (como por ejemplo, el cálculo de valores IDF), se sugiere agregarlas hasta una resolución de confianza mínima, probablemente relacionada con el ancho promedio de la línea. En este caso, el ancho promedio está en torno a los 5 pixeles, que equivalen a unos 10 minutos. Por precaución, se recomienda una resolución de confianza entre dos o tres veces el ancho de la línea, equivalentes a 20 o 30 minutos.

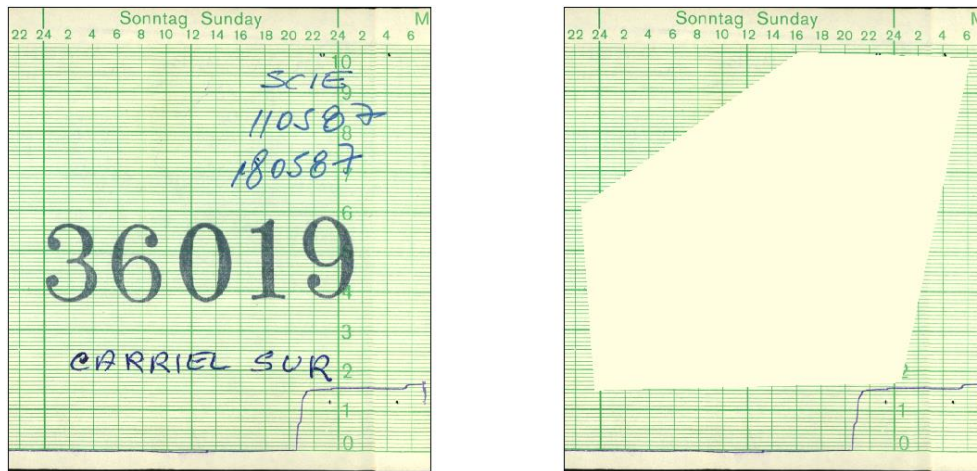


Figura 3.21 Ejemplo de parte de una imagen antes (izquierda) y después (derecha) del uso de la herramienta de borrado, eliminando en este caso timbres y escritura a mano

Por otra parte, el programa posee varias herramientas de edición de imagen, siendo las principales el trazado de segmentos de línea y el borrado de superficies de la imagen. En la primera, se debe

seleccionar el color de línea a dibujar para después trazar el segmento, mientras que en la segunda deben definirse los vértices de la superficie que será eliminada. En ambos casos, los puntos necesarios, ya sea para definir el segmento o la superficie, se seleccionan mediante navegación manual sobre la imagen. La Figura 3.21 presenta un ejemplo de uso de la herramienta de borrado de superficies, eliminando timbres y escritura a mano.

Para terminar, se incluyó en el programa una función de cálculo de precipitaciones máximas por evento de precipitación. Esta opción requiere una planilla con valores de precipitación (en el mismo formato de la planilla exportada como resultado) y un criterio de independencia para individualizar las tormentas (un periodo de tiempo mínimo sin precipitación para definir que dos tormentas sean eventos independientes). Con esta información es posible identificar las tormentas, obtener su tiempo de inicio y término, y calcular la precipitación e intensidad máxima de cada una para un conjunto de duraciones seleccionadas previamente.



CAPÍTULO 4: RESULTADOS

Se evaluó el desempeño del *software* PluvioReader de forma cualitativa y cuantitativa. En primera instancia, se apreciaron sus capacidades sólo de forma visual, digitalizando tres pluviogramas que poseían una alta precipitación acumulada, y presentando los resultados de cada proceso: la línea identificada, la línea trazada y la precipitación obtenida. A continuación, con los resultados del programa se calcularon las precipitaciones máximas para duraciones mayores a 2 horas, comparándolas con aquellas obtenidas a partir de la inspección manual de las imágenes.

Por otra parte, a cinco usuarios sin experiencia previa con PluvioReader se les encargó digitalizar cinco pluviogramas seleccionados al azar. Para estimar su precisión, nuevamente se calcularon las precipitaciones máximas con el programa y de forma manual, pero esta vez se evaluó la variabilidad de los resultados obtenidos por los usuarios. Además, se registraron las diferencias entre los resultados de cada método, se evaluó la existencia de sesgos de estimación, y se registró el tiempo que necesitaron los usuarios empleando PluvioReader.

4.1 Desempeño del método

Para poner a prueba al *software* se seleccionaron tres pluviogramas con una precipitación acumulada alta (sobre los 125 mm), pertenecientes a las estaciones Carriel Sur (Concepción) y Quinta Normal (Santiago). En la Tabla 4.1 resume las características de cada registro.

Tabla 4.1 Resumen de las características de las imágenes seleccionadas para la evaluación de desempeño de PluvioReader

Nº	Nombre	Estación	Fecha Inicio (dd/mm/aaaa)	Fecha Término (dd/mm/aaaa)	Precipitación Semanal (mm)
1	Imagen 1.1	Carriel Sur	10/06/1996	17/06/1996	134.4
2	Imagen 1.2	Quinta Normal	03/06/2002	10/06/2002	157.6
3	Imagen 1.3	Carriel Sur	27/06/2005	04/07/2005	129.5

Cabe señalar que estas imágenes no formaban parte de la base de datos empleada durante el desarrollo del programa, por lo tanto, no se habían probado antes con PluvioReader.

Los tres pluviogramas fueron digitalizados con éxito por el programa. Para evaluar su desempeño de forma visual, a continuación se presenta cada uno de los pluviogramas junto a tres de las gráficas que entrega PluvioReader: la línea identificada después del proceso de unión y eliminación de elementos, el trazado de la línea sobre la imagen del pluviogramma editado, y el gráfico de la precipitación acumulada resultante.

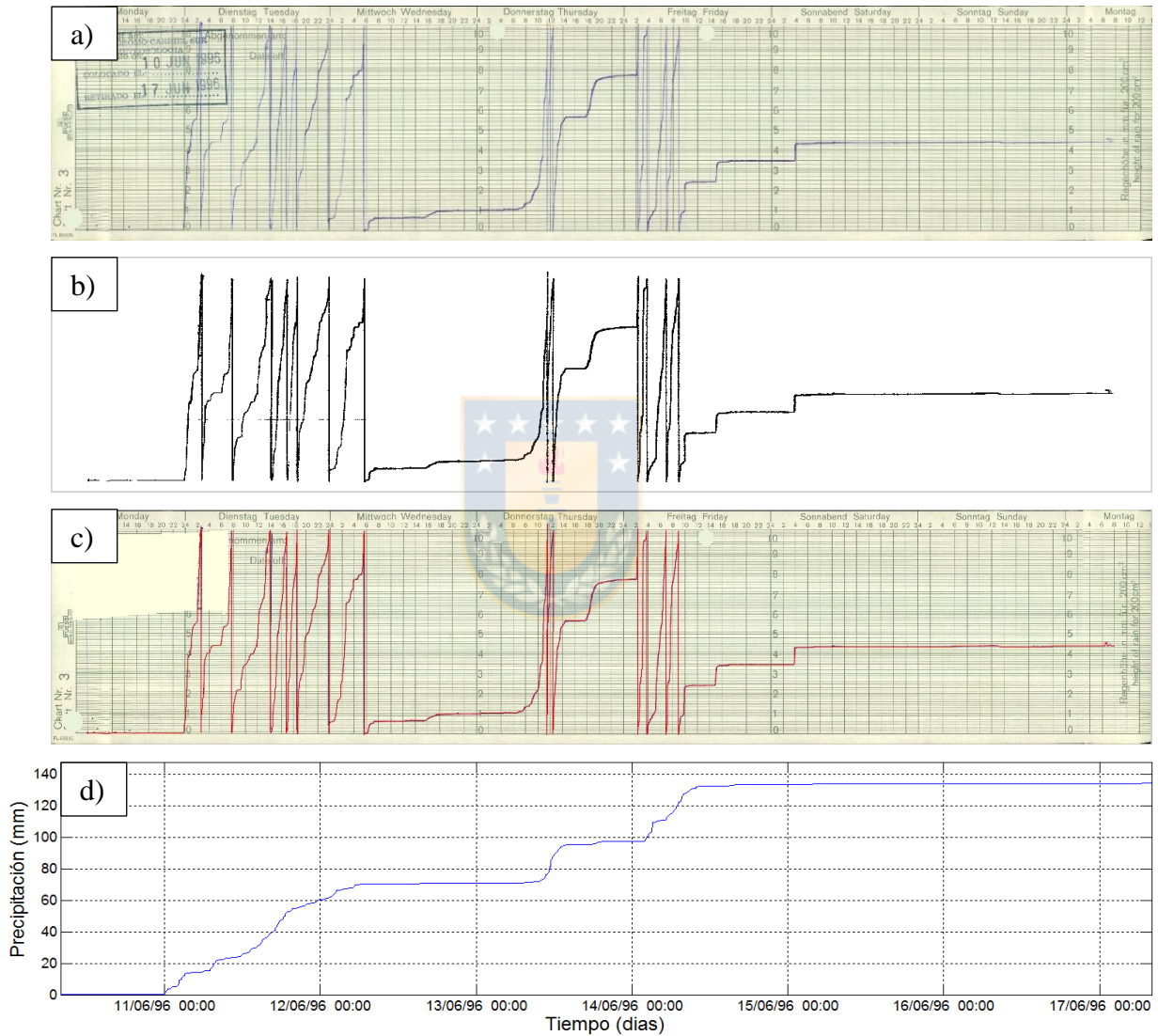


Figura 4.1 Pluviograma original (a), línea identificada en negro (b), línea trazada en rojo (c) y precipitación acumulada en azul (d); para la Imagen 1.1

En la Figura 4.1 se observa un pluviograma con dos o tres eventos de precipitación, cada uno con intensidades muy altas, donde incluso se presentan dos vaciamientos completos en menos de dos horas (el jueves al mediodía). No se aprecian problemas de digitalización en las zonas de altas

intensidades y la precipitación semanal entregada por el programa (134.40 mm) coincide exactamente con la lectura a mano desde el pluviograma (134.4 mm).

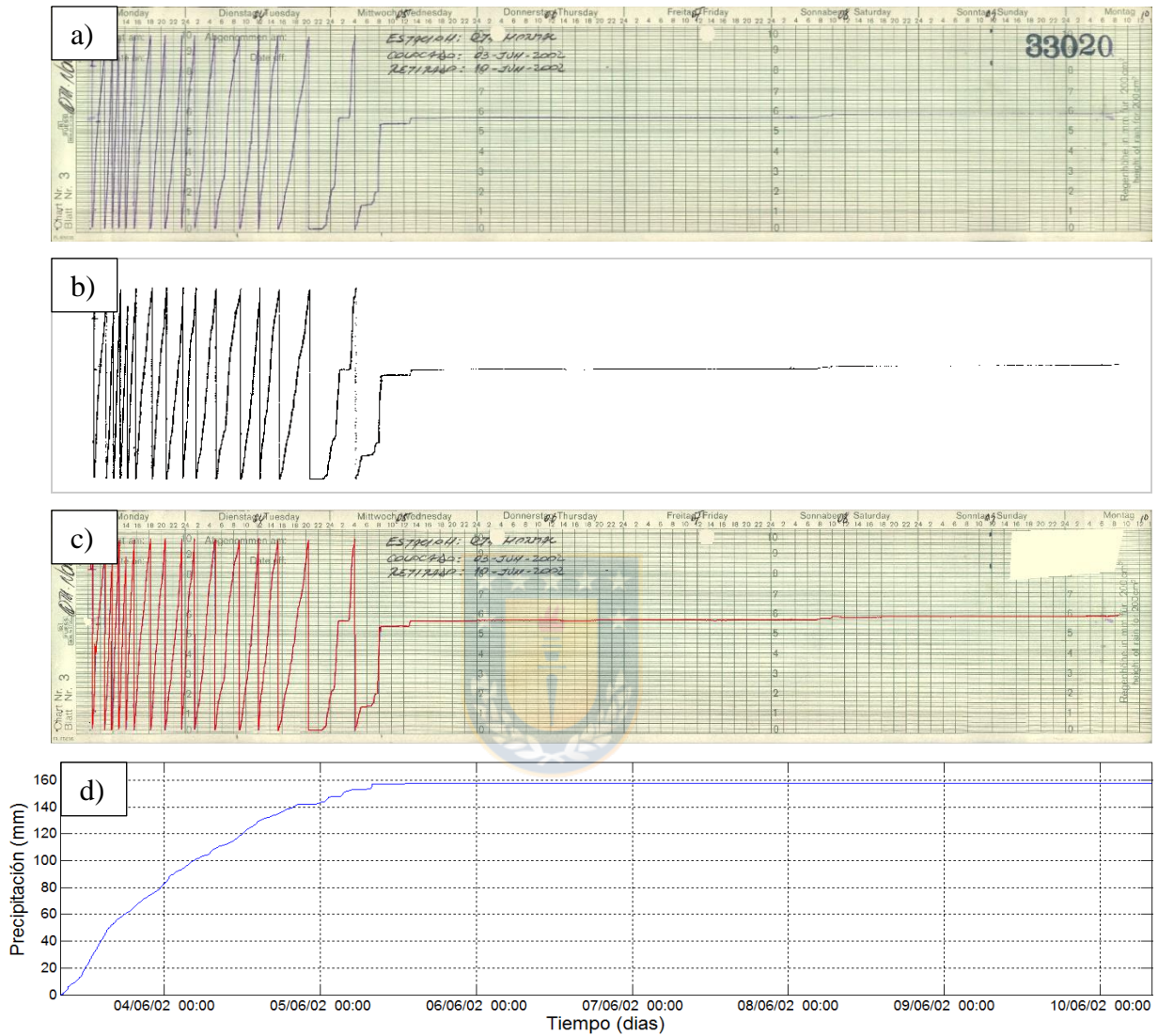


Figura 4.2 Pluviograma original (a), línea identificada en negro (b), línea trazada en rojo (c) y precipitación acumulada en azul (d); para la Imagen 1.2

Por otra parte, en el pluviograma de la Figura 4.2 se muestra la segunda mitad de una tormenta que habría iniciado la semana anterior. La línea de registro parte de 8.2 mm en lugar de 0 mm, lo que se habría debido a que el operador del instrumento no vació su recipiente antes de colocar el nuevo papel. Otra vez se aprecian zonas con más de un vaciamiento en dos horas, en un evento que va disminuyendo de intensidad a medida que se acerca a su fin. Además, la precipitación semanal que

se obtuvo con el programa (157.66 mm) concuerda con lo observado en el pluviograma (165.8 mm menos los 8.2 mm iniciales).

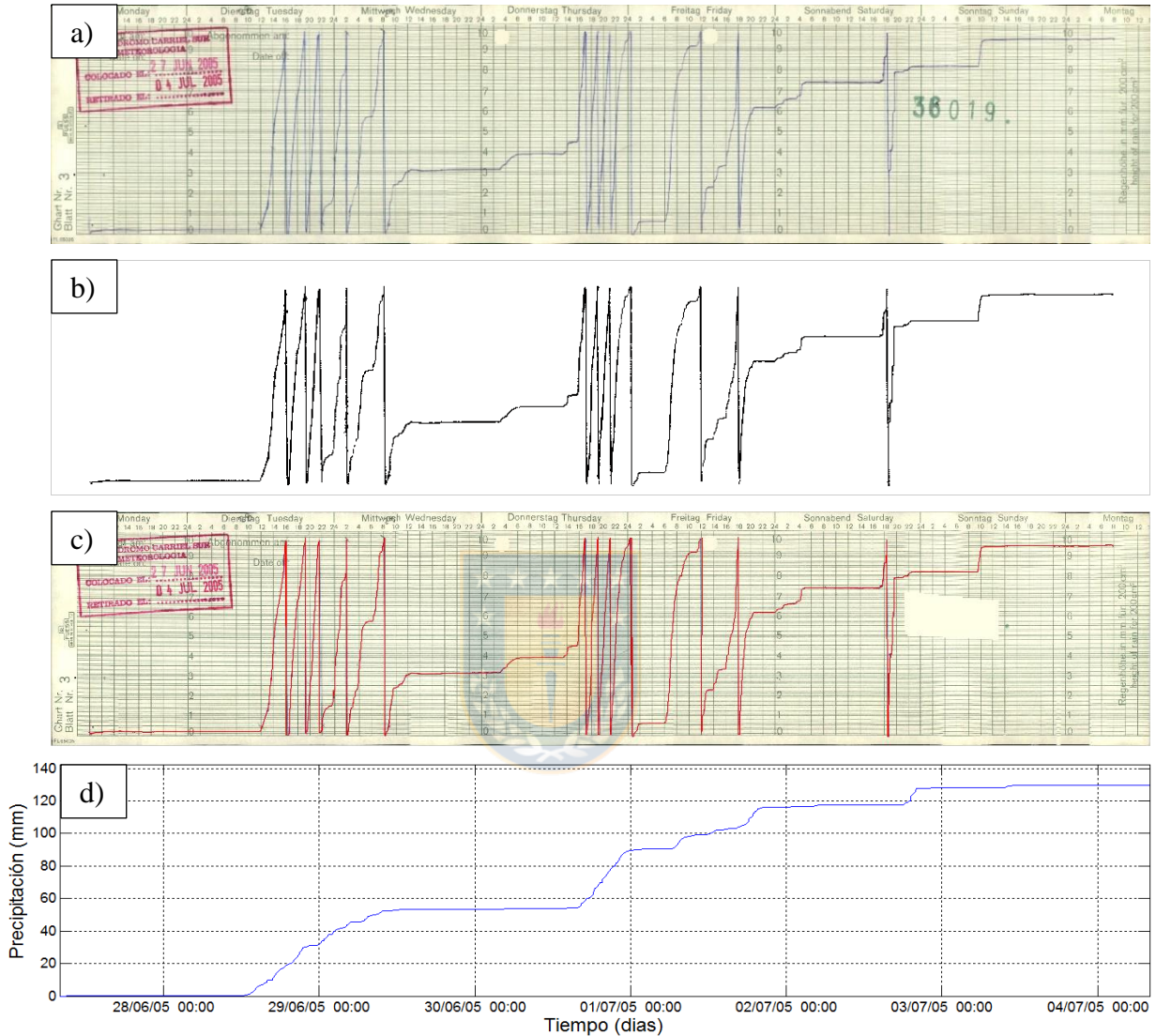


Figura 4.3 Pluviograma original (a), línea identificada en negro (b), línea trazada en rojo (c) y precipitación acumulada en azul (d); para la Imagen 1.3

Por último, en la Figura 4.3 nuevamente se observan dos o tres eventos de precipitación, pero esta vez las líneas de vaciamiento no son tan cercanas como en las imágenes anteriores. Sin embargo, en el último vaciamiento del pluviograma se observa que la intensidad es muy alta, a tal punto que la parte baja del vaciamiento se superpone con la línea que va subiendo, separándose recién en los 3 mm de precipitación. La precipitación totalizada en este caso es de 129.51 mm en la semana, lo que también concuerda con lo observado en el pluviograma (129.5 mm).

A simple vista, se observa un buen desempeño del programa para las tres imágenes. La identificación de la línea junto a la unión y eliminación de elementos cumplieron su objetivo, conservando solamente la línea de registro. Asimismo, la línea trazada se superpuso totalmente a la línea original, incluso en zonas de vaciamientos consecutivos y cercanos (que son más propensas a posibles errores). Por otro lado, se aprecia el uso de la herramienta de edición para borrar timbres y escritura a mano, hecho que se repite casi siempre que se utiliza el programa, volviéndose un proceso prácticamente obligatorio.

Posteriormente, con las series de precipitación obtenidas con PluvioReader se calcularon las precipitaciones máximas en los tres pluviogramas para duraciones entre 2 y 24 horas. Además, a partir de un trabajo meticuloso se obtuvieron las mismas precipitaciones de forma manual, identificando visualmente los instantes donde la precipitación era mayor para cada duración. Los valores de precipitación máxima se encuentran en la Tabla 4.2, incluyendo la diferencia porcentual entre los valores obtenidos con PluvioReader respecto a los calculados de forma manual.

Tabla 4.2 Precipitaciones máximas (mm) obtenidas para las tres imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila

			Duración (horas)							
			2	4	6	8	10	12	18	24
Imágenes y Métodos	Im. 2.1	M	18.3	23.2	29.9	34.6	34.7	37.2	49.2	60.1
		PR	18.2	23.1	30.0	34.7	34.8	37.4	49.5	60.5
		Dif.	0.8 %	0.3 %	-0.3 %	-0.2 %	-0.4 %	-0.5 %	-0.6 %	-0.7 %
	Im. 2.2	M	18.5	34.6	45.3	53.7	61.4	68.8	93.0	110.1
		PR	18.1	34.6	45.1	54.5	61.4	69.4	92.9	110.5
		Dif.	2.1 %	-0.1 %	0.5 %	-1.4 %	0.0 %	-0.9 %	0.1 %	-0.3 %
	Im. 2.3	M	11.3	21.0	29.1	34.8	36.0	36.6	46.7	52.8
		PR	12.2	22.2	29.8	34.9	36.0	36.6	47.4	53.0
		Dif.	-7.9 %	-5.8 %	-2.3 %	-0.3 %	0.0 %	0.1 %	-1.5 %	-0.4 %
Promedio Dif.			3.6 %	2.0 %	1.0 %	0.6 %	0.1 %	0.5 %	0.8 %	0.5 %

Los resultados de ambos métodos son similares en la mayoría de los casos, observándose valores más alejados entre las duraciones de 2 y 4 horas. La mayor diferencia, en términos absolutos y

relativos, proviene de la Imagen 1.3, con 1.2 mm (5.8 %) para la duración de 4 horas, y 7.9 % (0.9 mm) para la duración de 2 horas. Por otra parte, la menor diferencia se encuentra en las Imágenes 1.2 y 1.3, siendo prácticamente nula para la duración de 10 horas. Además, se destacan en general los resultados de la Imagen 1.1, donde las diferencias entre ambos métodos no superaron el 0.8 % para todas las duraciones.

Las diferencias de la Tabla 4.2 se presentan con signo para ofrecer una idea respecto a qué método entregó el resultado más alto (donde un número positivo indica que el método manual fue mayor a PluvioReader). De los 24 valores, 7 son positivos y 17 son negativos, lo que quiere decir que PluvioReader fue mayor al método manual en un 71 % de los casos. Si se asume que uno de los métodos describe mejor los valores de precipitación del pluviograma, el predominio de las diferencias negativas podría explicarse de dos formas: como una subestimación del método manual, o bien, como una sobrestimación del programa PluvioReader. La influencia del observador en el método manual sugiere que con este método se subestimaron las precipitaciones máximas.

En concreto, el método manual presentaría algunos errores producidos por la interpretación del observador y las características de los pluviogramas. Uno de los más importantes se asocia a la dificultad de determinar exactamente el inicio y final de una precipitación máxima. Para encontrar precipitaciones extremas se debe realizar un barrido continuo sobre el pluviograma, buscando aquel instante donde la precipitación sea mayor para una cierta ventana de tiempo (duración). Sin embargo, no es fácil realizar este trabajo a mano (además de ser bastante lento), por lo que a menudo se mide la precipitación entre las horas demarcadas por la grilla de fondo, entregando una lectura menor o igual a la obtenida a partir de un barrido continuo.

También existen otros errores, como la falta de concordancia entre la grilla de fondo y la línea, o la presencia de vaciamientos con retroceso. La falta de concordancia hace referencia a líneas que no partieron exactamente de 0 mm en su vaciamiento anterior, o no terminaron en los 10 mm en su vaciamiento siguiente, provocando que los valores leídos en la grilla no sean representativos de la línea (ya que la línea no se encontraría en la escala ni posición correcta). Por otro lado, los vaciamientos con retroceso influyen en el cálculo de las precipitaciones cuando se encuentran

dentro de la ventana temporal de interés, ya que se medirá (sin darse cuenta) una duración mayor a la requerida, y por lo tanto, el valor de precipitación será mayor o igual al real.

Aunque cada error presenta un comportamiento distinto, la lectura entre horas de la grilla predominaría entre los demás, siendo la causa principal de la supuesta subestimación. Lo anterior habría ocurrido a pesar de los intentos por evitar este problema, realizando una búsqueda lo más continua posible. Para aclarar si el posible sesgo es general o sólo fue algo específico para los tres pluviogramas (o de quién leyó los valores de forma manual), a continuación se realiza un análisis más profundo de la precisión del programa PluvioReader.

4.2 Pruebas de usuarios y precisión del método

Con el objetivo de evaluar la precisión del programa PluvioReader se seleccionaron cinco pluviogramas al azar, provenientes de las estaciones Carriel Sur (Concepción), El Tepual (Puerto Montt) y Quinta Normal (Santiago). Las características generales de los pluviogramas se presentan en la Tabla 4.3, mientras que sus imágenes se encuentran en el Anexo 4.1.

Tabla 4.3 Resumen de las características de las imágenes seleccionadas para evaluar la precisión de PluvioReader

Nº	Nombre	Estación	Fecha Inicio (dd/mm/aaaa)	Fecha Término (dd/mm/aaaa)	Precipitación Semanal (mm)
1	Imagen 2.1	Carriel Sur	01/06/1987	08/06/1987	83.5
2	Imagen 2.2	El Tepual	12/08/1996	19/08/1996	44.2
3	Imagen 2.3	El Tepual	13/01/2003	20/01/2003	25.8
4	Imagen 2.4	Carriel Sur	11/06/2007	18/06/2007	34.2
5	Imagen 2.5	Quinta Normal	17/08/2009	24/08/2009	47.8

Los pluviogramas fueron digitalizados por cinco usuarios que no habían trabajado antes con el *software*, evitando así cualquier sesgo de conocimiento previo. Antes de empezar, los usuarios recibieron una capacitación básica en el uso del programa, mediante la exhibición de un video tutorial y el procesamiento de una imagen de prueba (distinta a las seleccionadas). Además, se

utilizó el mismo computador para realizar todas las digitalizaciones, registrando los tiempos de ejecución del programa para cada usuario, los que se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Tiempos de ejecución del programa PluvioReader (mm:ss) para los cinco usuarios e imágenes. Se indican los tiempos promedio en la última fila y columna

Imágenes	Usuarios					Promedio por Imagen
	1	2	3	4	5	
2.1	2:08	1:22	2:09	2:03	2:02	1:56
2.2	2:14	1:44	1:53	2:37	2:17	2:09
2.3	3:20	2:03	2:20	1:58	2:35	2:27
2.4	1:56	2:12	1:49	2:17	1:45	1:59
2.5	2:23	1:54	1:48	2:10	1:42	1:59
Promedio por Usuario	2:24	1:51	1:59	2:13	2:04	

Como se observa, los usuarios requirieron alrededor de 2 minutos para digitalizar cada pluviograma. El menor tiempo lo consiguió el Usuario 2, con 1:22 minutos para la Imagen 2.1, mientras el mayor pertenece al Usuario 1, con 3:20 minutos para la Imagen 2.3. Sin embargo, el Usuario 2 se vio obligado a repetir dicha imagen debido a un problema con el computador, y el Usuario 1 cometió un error en una etapa avanzada del proceso, prefiriendo partir de nuevo sin reiniciar el cronómetro. Si no se consideran estos dos valores, los tiempos de ejecución de PluvioReader se encuentran entre los 1:42 y los 2:35 minutos.

Con las series digitalizadas se calcularon precipitaciones máximas para duraciones entre 2 y 24 horas, empleando la herramienta complementaria que posee PluvioReader para este fin. Además, se solicitó a los usuarios que determinaran de forma manual las precipitaciones máximas para las mismas duraciones, tal como se hizo en el subcapítulo anterior. Como esta vez no se posee una sola serie de precipitaciones máximas, sino cinco (una por cada usuario), se calculó el promedio de los valores según PluvioReader y el método manual, los que se muestran en la Tabla 4.5. Las precipitaciones máximas de cada usuario se encuentran en el Anexo 4.2.

Se aprecia que las diferencias porcentuales son más altas que las obtenidas en la evaluación preliminar del programa, en especial para las duraciones de 2, 4 y 6 horas. De las 40 diferencias

calculadas, ocho se encuentran sobre el 10 %, 21 entre el 1 % y 10 %, y las 11 restantes bajo el 1 %. En particular, los valores más alejados pertenecen a la Imagen 2.1, con un 27.7 % de diferencia para la duración de 2 horas, mientras los valores más cercanos se encuentran en la Imagen 2.4, con un 0.0 % para la duración de 12 horas. Además, los resultados de la Imagen 2.4 se destacan por su baja diferencia general, que no supera el 4.8 % para ninguna duración.

Tabla 4.5 Promedio de las precipitaciones máximas (mm) obtenidas en las imágenes (Im.) con el método manual (M) y con el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos valores (Dif.), con su promedio en la última fila

			Duración (horas)							
			2	4	6	8	10	12	18	24
Imágenes y Métodos	Im. 2.1	M	8.7	16.0	24.0	30.8	37.1	42.4	54.8	64.1
		PR	11.1	17.5	25.4	33.9	38.8	45.0	58.9	63.5
		Dif.	-27.7 %	-9.6 %	-5.8 %	-10.1 %	-4.4 %	-6.3 %	-7.4 %	0.8 %
	Im. 2.2	M	3.9	6.1	9.1	10.6	12.0	12.3	14.3	17.2
		PR	4.9	7.3	9.7	11.0	12.0	12.4	15.7	18.5
		Dif.	-24.3 %	-19.4 %	-6.1 %	-4.5 %	0.1 %	-0.6 %	-9.4 %	-7.7 %
	Im. 2.3	M	4.4	6.2	6.3	6.3	6.9	7.4	9.5	9.8
		PR	5.1	6.0	6.2	6.4	6.9	7.3	9.3	9.7
		Dif.	-16.9 %	1.9 %	1.9 %	-0.8 %	-0.3 %	1.0 %	2.2 %	1.3 %
	Im. 2.4	M	10.2	14.3	16.0	20.6	23.1	25.1	28.6	29.9
		PR	10.6	14.0	16.7	20.8	22.9	25.1	28.8	30.0
		Dif.	-4.1 %	1.9 %	-4.8 %	-0.8 %	0.7 %	0.0 %	-0.5 %	-0.4 %
	Im. 2.5	M	8.9	13.8	19.6	25.7	28.7	29.9	41.0	46.3
		PR	10.7	16.0	23.3	26.4	29.8	30.4	43.5	46.9
		Dif.	-19.5 %	-16.1 %	-19.3 %	-2.9 %	-4.1 %	-1.7 %	-6.1 %	-1.1 %
Promedio Dif.			18.5 %	9.8 %	7.6 %	3.8 %	1.9 %	1.9 %	5.1 %	2.3 %

La causa de las diferencias mayores se relacionaría con la lectura de valores entre horas de la grilla, ya que no se observan vaciamientos con retroceso en ningún pluviograma y la concordancia entre la línea y la grilla es buena en la mayoría de los registros. En este sentido, se presume que los usuarios no hicieron una búsqueda tan meticulosa como la realizada durante la evaluación preliminar, leyendo la precipitación entre horas de la grilla sin intentar una o más lecturas intermedias.

Los valores de la Tabla 4.5 ofrecen una representación general de las precipitaciones obtenidas, pero no permiten apreciar la labor individual de los usuarios, ya que sólo se presentan diferencias entre promedios. Para analizar en mayor detalle el trabajo de los usuarios, se determinaron las diferencias porcentuales de cada uno y se calculó para cada imagen su mínimo, máximo, y promedio. Estos valores se presentan en la Tabla 4.6, mientras que las diferencias individuales se encuentran en el Anexo 4.2.

Tabla 4.6 Mínimo (Min.), máximo (Max.) y promedio (Prom.) de las diferencias porcentuales de cada usuario (como valor absoluto)

			Duración (horas)							
			2	4	6	8	10	12	18	24
Imágenes	Im. 2.1	Mín.	3.1 %	0.1 %	1.5 %	6.1 %	1.5 %	1.9 %	1.6 %	0.0 %
		Máx.	48.4 %	16.7 %	10.8 %	19.5 %	14.0 %	9.9 %	10.1 %	4.3 %
		Prom.	29.7 %	10.0 %	6.0 %	10.3 %	5.4 %	6.4 %	7.5 %	1.1 %
	Im. 2.2	Mín.	2.0 %	4.3 %	4.8 %	0.3 %	0.2 %	0.4 %	1.7 %	0.6 %
		Máx.	36.1 %	30.9 %	7.1 %	9.3 %	1.4 %	2.9 %	21.4 %	41.2 %
		Prom.	27.0 %	20.0 %	6.1 %	4.6 %	0.5 %	1.4 %	9.8 %	9.5 %
	Im. 2.3	Mín.	4.0 %	0.9 %	1.6 %	0.3 %	0.4 %	0.1 %	1.3 %	1.2 %
		Máx.	48.2 %	2.5 %	3.1 %	2.0 %	4.9 %	3.0 %	5.3 %	1.3 %
		Prom.	24.9 %	1.9 %	1.9 %	1.6 %	2.0 %	1.1 %	2.1 %	1.3 %
	Im. 2.4	Mín.	0.8 %	1.2 %	0.2 %	0.8 %	0.4 %	0.0 %	0.1 %	0.1 %
		Máx.	6.2 %	3.2 %	8.0 %	1.8 %	1.7 %	0.8 %	1.0 %	2.3 %
		Prom.	4.5 %	1.9 %	4.9 %	1.3 %	0.7 %	0.3 %	0.6 %	0.8 %
	Im. 2.5	Mín.	2.2 %	14.5 %	19.0 %	0.1 %	1.7 %	0.8 %	0.2 %	0.3 %
		Máx.	61.5 %	20.6 %	19.7 %	3.6 %	13.4 %	2.8 %	32.9 %	1.8 %
		Prom.	24.5 %	16.1 %	19.3 %	2.9 %	4.2 %	1.7 %	7.3 %	1.3 %

Se observa que, aun cuando el promedio de las diferencias individuales es alto, al menos uno de los usuarios obtuvo valores bajos para casi todas las duraciones (ver filas de mínimos en cada imagen). En este sentido, se destaca la labor del Usuario 5, ya que él entregó los mínimos de las Imágenes 2.1, 2.2 y 2.3 para las duraciones de 2, 4 y 6 horas (que son más difíciles de calcular). Curiosamente, el mismo Usuario 5 produjo dos valores altos, los máximos de las Imágenes 2.2 y 2.5 para la duración de 18 horas, cuyo cálculo no debería ser tan complejo.

En la Imagen 2.5 se aprecian dos mínimos que son bastante altos, 14.5 % y 19.0 % para las duraciones de 4 y 6 horas (respectivamente), lo que indica que ningún usuario alcanzó diferencias bajas para dichas duraciones. Estos dos valores son un buen ejemplo de la lectura limitada por las horas de la grilla. En concreto, partiendo por la duración de 4 horas, los usuarios seguramente midieron la precipitación entre las 10 y las 14 horas del día martes, obteniendo unos 14 mm (ver pluviograma en el Anexo 4.1). Sin embargo, una lectura entre las 9 y 13 horas del mismo día habría entregado un valor de 15.8 mm, que se acerca mucho más a los resultados de PluvioReader (16.0 mm). Lo mismo sucede con la duración de 6 horas, donde se estimó la precipitación entre las 6 y las 12 horas del martes (19.6 mm) en lugar de medirla entre las 7 y las 13 horas (22.1 mm).

Por el contrario, en la Imagen 2.4 todos los máximos son relativamente bajos, alcanzando a lo más un 6.2 % para la duración de 2 horas. Esto indica que los cinco usuarios lograron diferencias pequeñas en este caso, lo que es extraño si se compara con los resultados de las demás imágenes. La causa de estos valores es que, casualmente, el inicio de las precipitaciones máximas coincide con las líneas de la grilla. Por ejemplo, la precipitación máxima de duración 2 horas inicia prácticamente a las 16 horas del día miércoles, al igual que la precipitación máxima de duración 4 horas (Anexo 4.1). En otras palabras, las diferencias fueron pequeñas en este caso porque los máximos ocurrieron justo entre horas definidas por la grilla.

Para terminar con el análisis de las precipitaciones máximas se calcularon dos medidas de dispersión, el rango y la desviación estándar, permitiendo estudiar la precisión de ambos métodos. El rango, que corresponde a la diferencia entre la mayor y menor cifra de una serie de datos, entrega una medida respecto a qué tan alejadas se encuentran las precipitaciones que obtuvo un usuario y otro para una misma duración. Los resultados de los rangos se presentan en la Tabla 4.7.

Se advierte una clara diferencia entre los rangos de los valores de PluvioReader y los del método manual. El mayor rango de PluvioReader pertenece a la Imagen 2.3, con 0.21 mm para la duración de 2 horas. En cambio, el mayor rango del método manual fue de 10.70 mm (Imagen 2.5 para la duración 18 horas), aunque este valor fue causado por un error del Usuario 4, que aparentemente olvidó contar un vaciamiento. Sin considerar dicho valor, el mayor rango del método manual pertenece a la Imagen 2.1, con 5.50 mm para la duración de 10 horas.

Tabla 4.7 Rango de las precipitaciones máximas (mm) obtenidas en las imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR)

			Duración (horas)								
			2	4	6	8	10	12	18	24	
Imágenes y Métodos	Im. 2.1	M	3.30	2.50	2.10	3.60	5.50	3.20	4.50	3.10	
		PR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Im. 2.2	M	1.40	1.40	0.20	0.90	0.20	0.60	2.50	5.30	
		PR	0.01	0.03	0.08	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	
	Im. 2.3	M	1.90	0.10	0.10	0.10	0.60	0.10	0.40	0.00	
		PR	0.21	0.00	0.00	0.15	0.15	0.13	0.03	0.01	
	Im. 2.4	M	0.70	0.30	1.20	0.60	0.30	0.30	0.30	0.80	
		PR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Im. 2.5	M	4.30	0.70	0.10	0.90	3.00	0.50	10.70	1.00	
		PR	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.09	0.06	0.03	
	Promedio M			2.32	1.00	0.74	1.22	1.92	0.94	3.68	2.04
	Promedio PR			0.04	0.01	0.02	0.04	0.04	0.05	0.02	0.01

PluvioReader obtuvo resultados destacables en las Imágenes 2.1 y 2.4, donde los rangos fueron iguales a 0.00 mm para todas las duraciones (es decir, los cinco usuarios obtuvieron prácticamente la misma precipitación máxima). El método manual también obtuvo rangos relativamente bajos en las Imágenes 2.3 y 2.4, pero en este caso las cifras estuvieron cerca de los 0.10 y 0.30 mm, respectivamente. En general, se observa que los rangos son, al menos, un orden de magnitud mayores con el método manual que con PluvioReader, lo que indicaría que PluvioReader es más preciso que la estimación a mano.

Para concluir el análisis de la precisión, se calculó la desviación estándar de las precipitaciones máximas según cada método. Además, para comparar los resultados de ambos métodos se determinó la razón entre la desviación estándar de PluvioReader y la del método manual. Las dos desviaciones estándar y la razón entre ambas se encuentran en la Tabla 4.8.

La desviación estándar presentó un comportamiento similar al de los rangos, con valores de PluvioReader que son menores a los del método manual. La mayor desviación estándar de PluvioReader fue de 0.08 mm (Imagen 2.3, duración de 2 horas), mientras que la mayor del método

manual fue de 4.14 mm (Imagen 2.5, duración 18 horas). Sin embargo, se recuerda que este último valor fue exagerado por el error del Usuario 4, siendo 1.87 mm el segundo resultado más alto de dicho método (Imagen 2.1, duración 10 horas).

Tabla 4.8 Desviación estándar de las precipitaciones máximas (mm) obtenidas en las imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la razón entre ambos valores (M/PR), con sus promedios en las últimas filas

			Duración (horas)							
			2	4	6	8	10	12	18	24
Imágenes y Métodos	Im. 2.1	M	1.155	0.950	0.917	1.318	1.875	1.184	1.637	1.184
		PR	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		M/PR	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
	Im. 2.2	M	0.535	0.471	0.063	0.403	0.080	0.194	0.928	2.045
		PR	0.003	0.013	0.033	0.002	0.001	0.001	0.007	0.010
		M/PR	174	37	2	187	67	141	125	205
	Im. 2.3	M	0.792	0.049	0.040	0.049	0.223	0.049	0.160	0.000
		PR	0.083	0.000	0.000	0.060	0.060	0.053	0.011	0.003
		M/PR	10	>1000	>1000	1	4	1	14	0
	Im. 2.4	M	0.261	0.110	0.422	0.210	0.120	0.110	0.117	0.301
		PR	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		M/PR	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
	Im. 2.5	M	1.579	0.264	0.049	0.360	1.181	0.210	4.144	0.372
		PR	0.002	0.002	0.003	0.015	0.010	0.037	0.026	0.014
		M/PR	653	123	14	24	118	6	162	27
Promedio M			0.864	0.369	0.298	0.468	0.696	0.349	1.397	0.780
Promedio PR			0.018	0.003	0.007	0.016	0.014	0.018	0.009	0.005
Prom. M/Prom. PR			49	125	41	30	49	19	160	143

La razón entre desviaciones estándar muestra claramente que la dispersión de PluvioReader es menor a la del método manual. De las 40 razones calculadas, 18 se encuentran sobre 1000, nueve entre 100 y 1000, seis entre 10 y 100, y las siete restantes entre 0 y 10. De las últimas siete, las más bajas son iguales a dos (Imagen 2.2, duración de 6 horas), a uno (Imagen 2.3, duraciones de 8 y 12 horas), y a cero (Imagen 2.3, duración de 24 horas). En ellas, el método manual obtuvo una

dispersión similar a la de PluvioReader, con una baja desviación estándar para ambos métodos (menos de 0.06 mm). El método manual también obtuvo otras desviaciones pequeñas (Imagen 2.3, duraciones de 4 y 6 horas; Imagen 2.2, duración de 10 horas), pero PluvioReader alcanzó valores mucho menores (prácticamente cero).

Por último, se evaluó la existencia de sesgos en la estimación del método manual, basado en los errores de lectura asociados al método, las diferencias que entrega respecto a PluvioReader y la menor dispersión del programa. Para ello, se compararon los resultados que obtuvo cada usuario con el método manual y PluvioReader, registrando el número de veces que el método manual entregó el menor valor de precipitación. En la Tabla 4.9 se presenta el recuento de los usuarios que obtuvieron valores de precipitación más bajos de forma manual.

Tabla 4.9 Cantidad de usuarios que obtuvo una precipitación menor con el método manual que con PluvioReader y su porcentaje respecto al total de valores calculados

Imágenes	Duración (horas)								Total por imagen	Porc. por imagen
	2	4	6	8	10	12	18	24		
2.1	5	5	5	5	4	5	5	3	37	93 %
2.2	4	5	5	5	4	4	5	5	37	93 %
2.3	3	0	0	4	2	2	0	0	11	28 %
2.4	4	0	5	4	0	2	4	2	21	53 %
2.5	4	5	5	5	5	5	5	4	38	95 %
Total por duración	20	15	20	23	15	18	19	14		
Porc. por duración	80 %	60 %	80 %	92 %	60 %	72 %	76 %	56 %		

Se observa que el método manual entrega resultados menores a los de PluvioReader en la gran mayoría de los casos. En las Imágenes 2.1, 2.2 y 2.5 más de un 92 % de los valores fueron menores en su estimación a mano, mientras que en la Imagen 2.3 ocurrió lo contrario, con resultados a mano que fueron menores solo en un 28 % de los cálculos (es decir, el 72 % fue mayor a mano). La tendencia particular de la Imagen 2.3 se atribuye a la falta de concordancia entre la grilla y la línea en la zona superior, que se presenta de forma leve, pero se habría destacado ante la ausencia de otros errores (no hay vaciamientos con retroceso y, tal como en la Imagen 2.4, el inicio de los máximos coincide casi siempre con las horas de la grilla).

Para complementar el análisis de sesgos se realizó un cálculo general de las diferencias entre ambos métodos bajo la condición de que uno fuera mayor al otro. Se concluyó que, cuando los valores de PluvioReader fueron mayores, su diferencia respecto al método manual fue de 1.36 mm en promedio; en cambio, cuando el método manual fue mayor, su diferencia respecto a PluvioReader fue de sólo 0.08 mm. En otras palabras, el método manual no sólo entregó una gran cantidad de valores menores a PluvioReader, sino que además su magnitud también fue mucho menor, reafirmando así la idea de la subestimación.

Finalmente, debe aclararse que estos sesgos se relacionan solamente a la lectura de la precipitación desde un pluviograma, y no a las diferencias ente la precipitación registrada y la que realmente hubo en terreno. En este sentido, la existencia de algún sesgo en la medición de los instrumentos no se considera relevante, ya que el propósito de este trabajo es analizar la forma en que se extraen los valores de precipitación desde los pluviogramas.



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Se desarrolló un método computacional para extraer valores de precipitación desde pluviogramas, adaptado al caso chileno e implementado en el software PluvioReader. El programa funciona con registros provenientes de pluviógrafos de flotador y sifón, supone un color azul para la línea del pluviograma, y puede procesar registros de cualquier ventana temporal, aunque fue ideado inicialmente para pluviogramas semanales.

Para su funcionamiento, el programa requiere la imagen digital de un pluviograma y su ventana temporal de registro, entregando como resultado series de precipitación con una resolución temporal de 5 minutos. El método propuesto es innovador: propone mejoras a dos de los procesos descritos en la literatura (identificación de la línea y trazado de la línea), e introduce un proceso nuevo (unión y eliminación de elementos), planteando además un pre-proceso de reconocimiento de márgenes. Entre sus características sobresale la capacidad de detectar y corregir líneas de vaciamiento con retroceso, un problema común en los pluviogramas semanales chilenos, pero que ha sido poco estudiado en la literatura.

En la evaluación preliminar del método se aprecia una correcta identificación de la línea, uniéndola donde estuviera separada y borrando pequeñas manchas. Del mismo modo, las líneas trazadas se superponen a las observadas en las imágenes digitales, incluso donde ocurren vaciamientos muy cercanos o precipitaciones intensas. En general, los valores de precipitación máxima que se obtuvieron con PluvioReader coinciden con los calculados de forma manual, alcanzando una diferencia promedio de 1.5 %, aunque algunos valores individuales presentaron diferencias más altas (la mayor de un 7.9 %) que se atribuyen a errores en la aplicación del método manual.

Las diferencias entre ambos métodos aumentaron durante las pruebas realizadas por los usuarios, alcanzando un 7.2 % en promedio (y máximos por sobre el 40 %). Se comprobó que esto se debe a un error específico del método manual: la lectura de precipitaciones entre horas de la grilla. Respecto a la precisión de los métodos, el rango y la desviación estándar fue, en promedio, de 1.73 mm y 0.653 mm a mano, respectivamente, mientras que con PluvioReader los mismos valores alcanzaron los 0.03 mm y 0.011 mm. En otras palabras, la dispersión del programa PluvioReader

fue, al menos, un orden de magnitud menor que la del método manual, lo que indica que el programa fue mucho más preciso.

Sobre el posible sesgo en el método manual, se observó que el 72 % de sus valores fueron menores, con una diferencia promedio de 1.36 mm respecto a PluvioReader. En cambio, la diferencia fue mucho más baja para el 28 % restante (valores mayores a mano), alcanzando sólo los 0.08 mm. Si a esto se suman los errores encontrados en el método manual, se puede concluir que este método subestima la precipitación en la mayoría de los casos. Sin embargo, dicho sesgo puede disminuir si se evitan las lecturas limitadas por la línea de la grilla, tal como ocurrió en la evaluación preliminar del desempeño del programa (donde las diferencias entre métodos fueron menores).

Considerando los resultados obtenidos, se recomienda el uso de PluvioReader para la digitalización de pluviogramas, por sobre el método manual. De las alternativas encontradas en la literatura, PluvioReader parece ser uno de los pocos *softwares* libres capaces de resolver el caso estudiado en el presente trabajo (pluviogramas semanales de pluviógrafos de flotador y sifón). Además, su tiempo de ejecución de 2 minutos lo transforma en una buena alternativa de digitalización para registros históricos con una gran cantidad de pluviogramas.

Antes de terminar, se reitera que los valores de precipitación generados por PluvioReader deben utilizarse con precaución cuando se indique una resolución temporal muy alta. En este trabajo, las características de las imágenes digitales permitieron obtener series con una resolución de 5 minutos, pero esto no significa que el pluviograma semanal, como registro en papel, contenga información con tal nivel de detalle. En consecuencia, con esta clase de datos sería irresponsable, por ejemplo, calcular valores IDF para una duración de 5 minutos. Para aplicaciones de este tipo, se sugiere agregar los resultados hasta una resolución mínima entre 20 o 30 minutos. Además, se recomienda validar los resultados visualmente, observando las imágenes que entrega PluvioReader durante la digitalización.

Finalmente, futuras líneas de investigación incluyen mejorar el desempeño de PluvioReader probando formas alternativas de realizar ciertos procesos, además de generalizar el método propuesto a otras variables meteorológicas e instrumentos.

REFERENCIAS

Ben-Zvi, A. (2009) Rainfall intensity–duration–frequency relationships derived from large partial duration series. **Journal of Hydrology**. **367(1-2)**. 104-114.

Cowpertwait, P., V. Isham y C. Onof (2007) Point process models of rainfall: developments for fine-scale structure. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. **463**. 2569-2587.

De Paola, F., M. Giugni, M. Topa y E. Bucchignani (2014) Intensity-Duration-Frequency (IDF) rainfall curves, for data series and climate projection in African cities. **SpringerPlus**. **3**. 133.

Deidda, R., G. Mascaro, E. Piga y G. Querzoli (2007) An automatic system for rainfall signal recognition from tipping bucket gage strip charts. **Journal of Hydrology**. **333(1)**. 400-412.

Gonzalez, R. C., y R. E. Woods (2002) **Digital Image Processing**. Prentice Hall. Upper Saddle River. New Jersey.

Haddad, K., A. Rahman y J. Green (2010) Design rainfall estimation in Australia: a case study using L moments and Generalized Least Squares Regression. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**. **25(6)**. 815-825.

Jaklič, A., L. Šajn, G. Derganc y P. Peer (2016) Automatic digitization of pluviograph strip charts. **Meteorological Applications**. **23**. 57-64.

Koutsoyiannis, D., y C. Onof (2001) Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model. **Journal of Hydrology**. **246**. 109-122.

Leonardi, R., T. Montefinale, V. Malvestuto, O. Testa y M. C. Beltrano (2006) The automatic digitization of time series recorded on graph paper supports. **WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation**. Ginebra. Suiza. Diciembre.

Licznar, P., J. Łomotowski y D. Rupp (2011) Random cascade driven rainfall disaggregation for urban hydrology: An evaluation of six models and a new generator. **Atmospheric Research**. **99(3-4)**. 563-578.

Mailhot, A., S. Duchesne, D. Caya y G. Talbot (2007) Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). **Journal of Hydrology**. **347(1-2)**. 197-210.

Molnar, P. y Burlando, P. (2005) Preservation of rainfall properties in stochastic disaggregation by a simple random cascade model. **Atmospheric Research**. **77(1-4)**. 137–151.

MEEDDM (2014) **NUNIEAU. Versión 4.01**. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer en charge des Technologies Vertes et des Négociations sur le Climat. Paris.

Trefry, C., Watkins, D., Jr. y Johnson, D (2005) Regional Rainfall Frequency Analysis for the State of Michigan. **Journal of Hydrologic Engineering**. **10(6)**. 437-449.

UNESCO (2013) Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas. **Documentos Técnicos del PHI-LAC**. **29**.

Van de Vyver, H., y G. Demarée (2010) Construction of Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves for precipitation at Lubumbashi, Congo, under the hypothesis of inadequate data. **Hydrological Sciences Journal**. **55(4)**. 555-564.

Van Piggelen, H. E., T. Brandsma y H. Manders (2011) Automatic curve extraction for digitizing rainfall strip charts. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**. **28(1)**. 891-906.



ANEXOS

Anexo 3.1 Diagramas de flujo

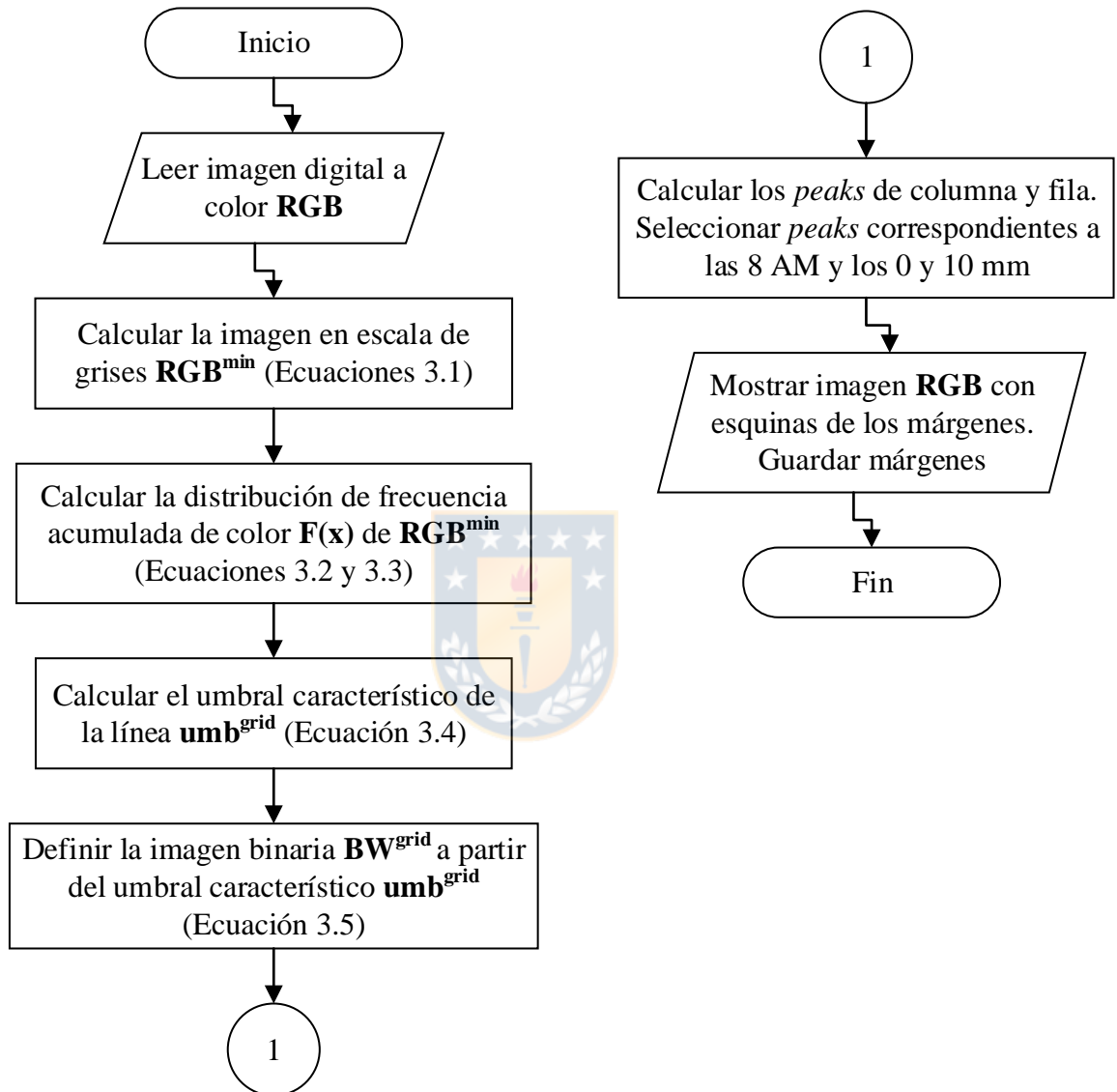


Figura A.3.1.1 Diagrama de flujo del pre-proceso de determinación de los márgenes de la grilla

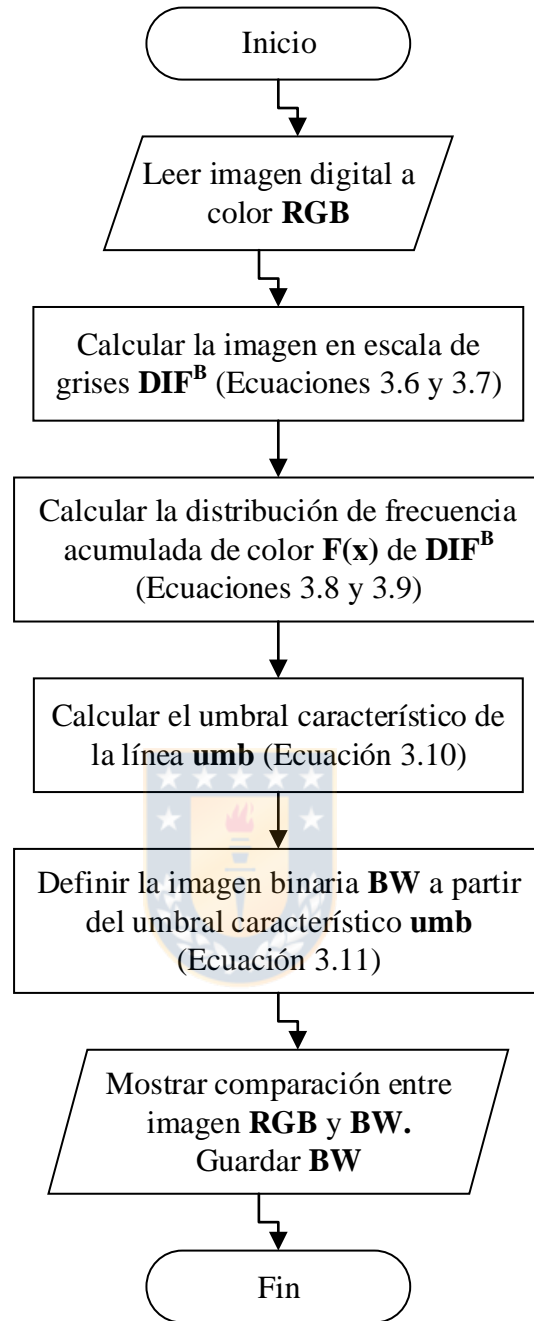


Figura A.3.1.2 Diagrama de flujo del proceso de identificación de la línea

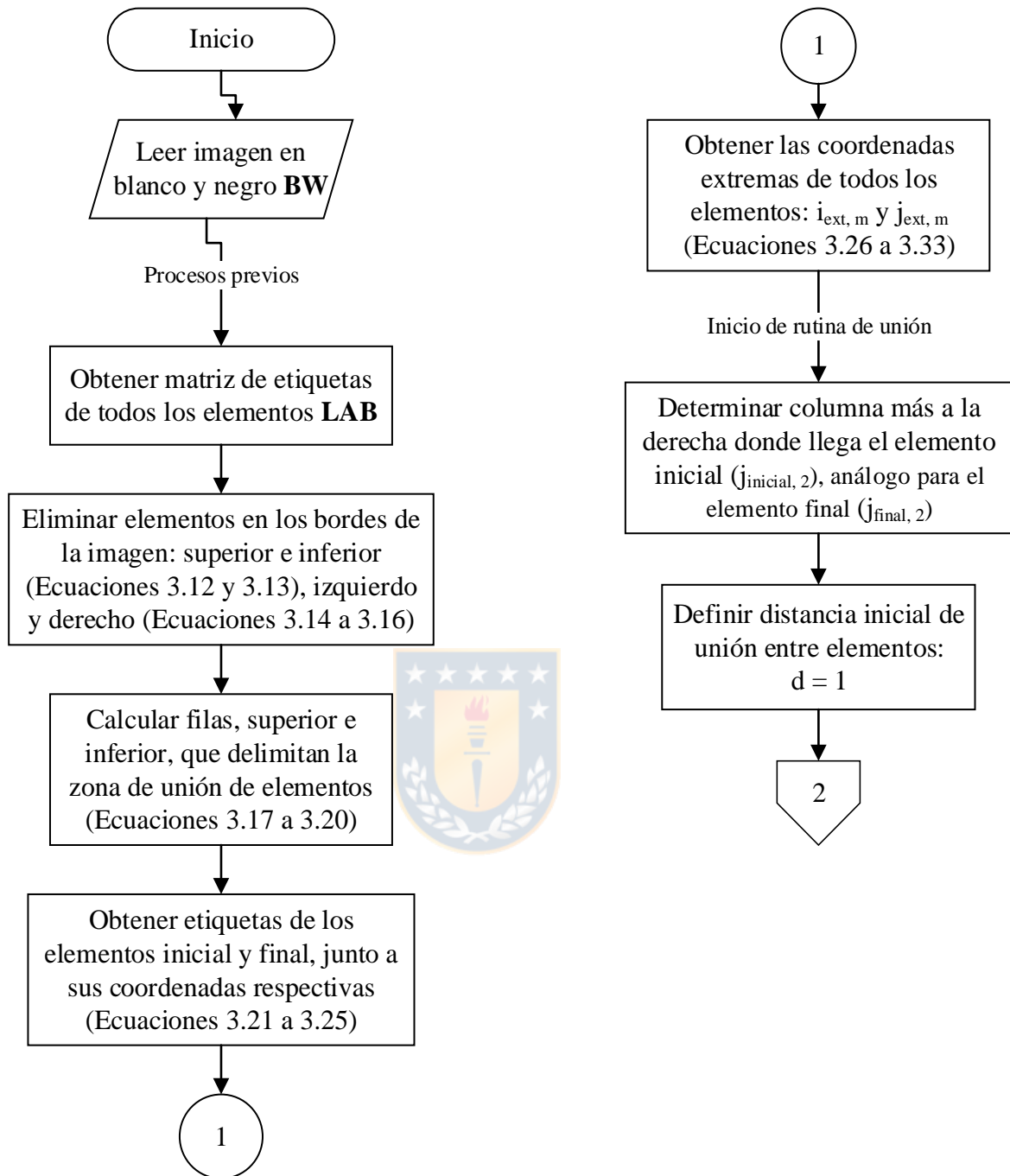


Figura A.3.1.3 Diagrama de flujo del proceso de unión y eliminación de elementos. Primera parte: Inicio de la rutina y procedimientos previos

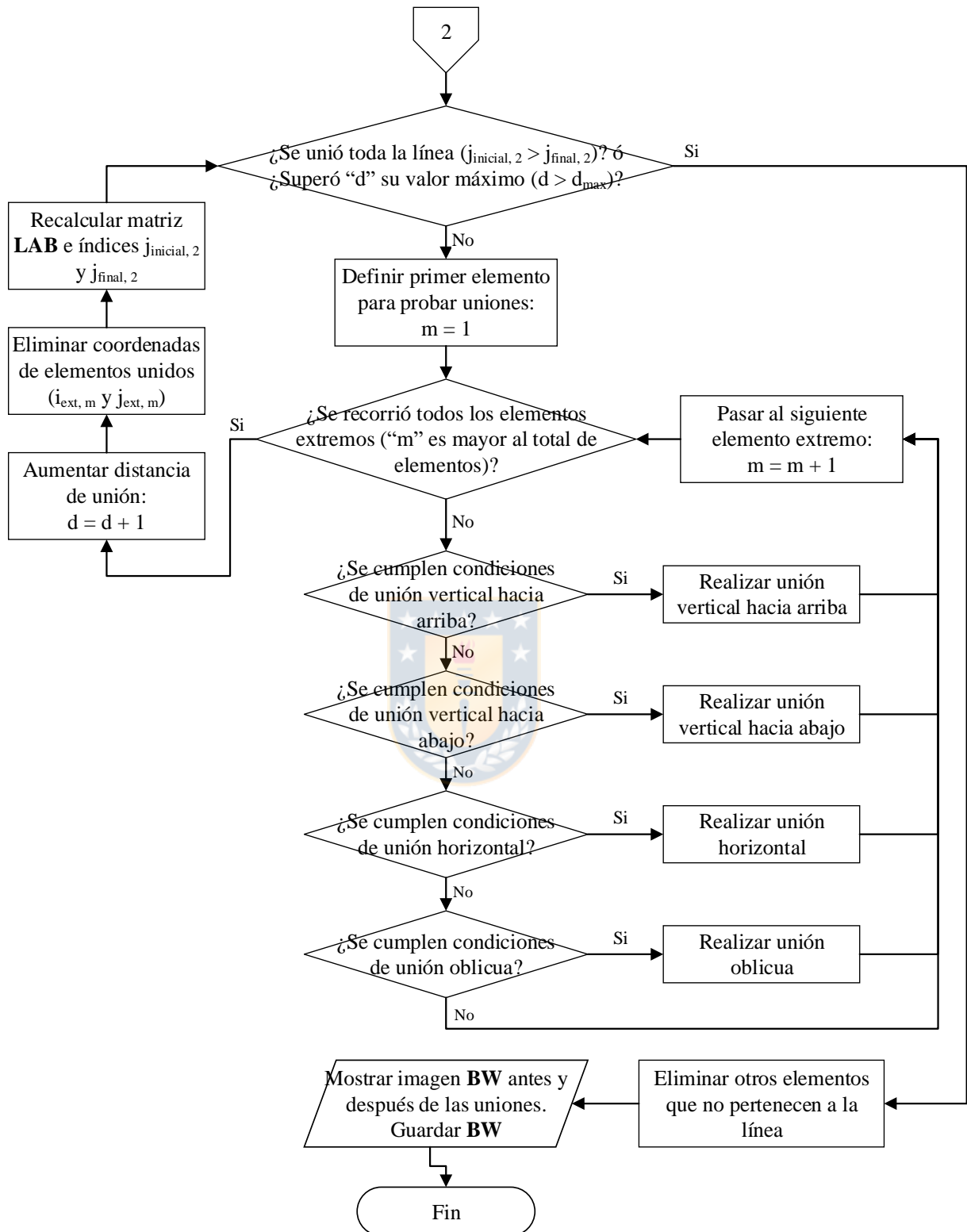


Figura A.3.1.4 Diagrama de flujo del proceso de unión y eliminación de elementos. Segunda parte: Procedimiento iterativo de unión y fin de la rutina

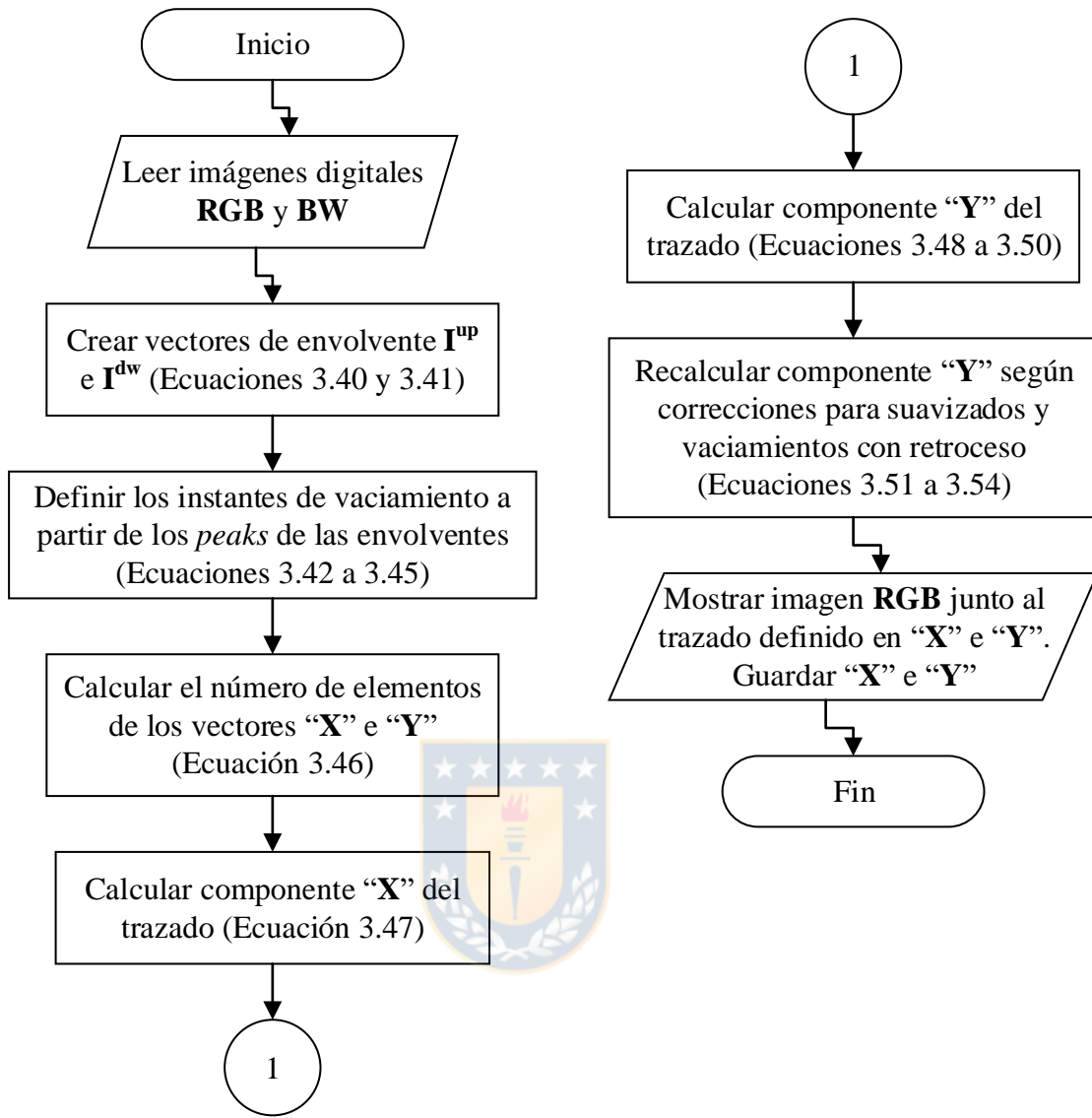


Figura A.3.1.5 Diagrama de flujo del proceso de trazado de la línea

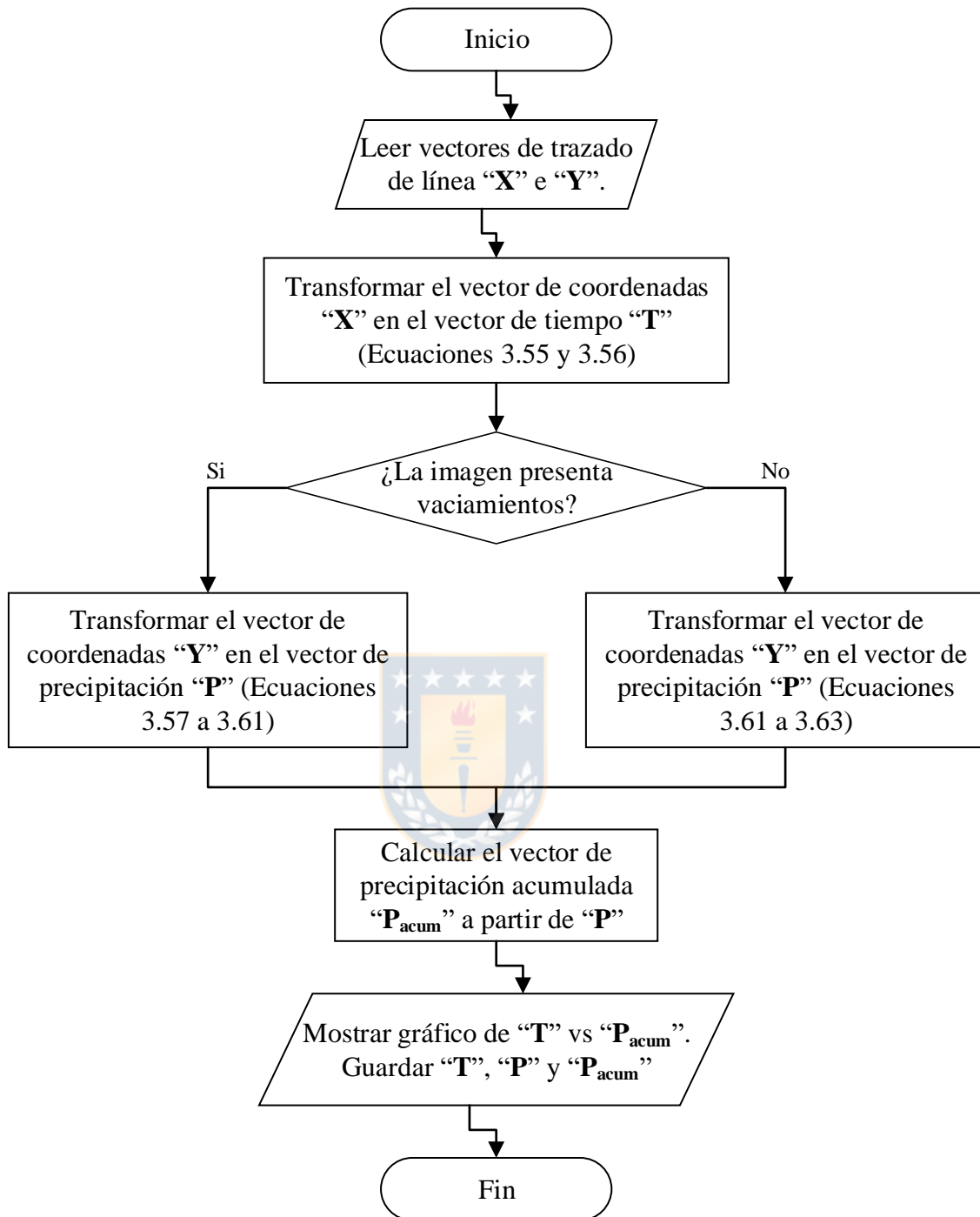


Figura A.3.1.6 Diagrama de flujo del proceso de conversión a valores de precipitación

Anexo 4.1 Imágenes utilizadas en las pruebas de usuarios

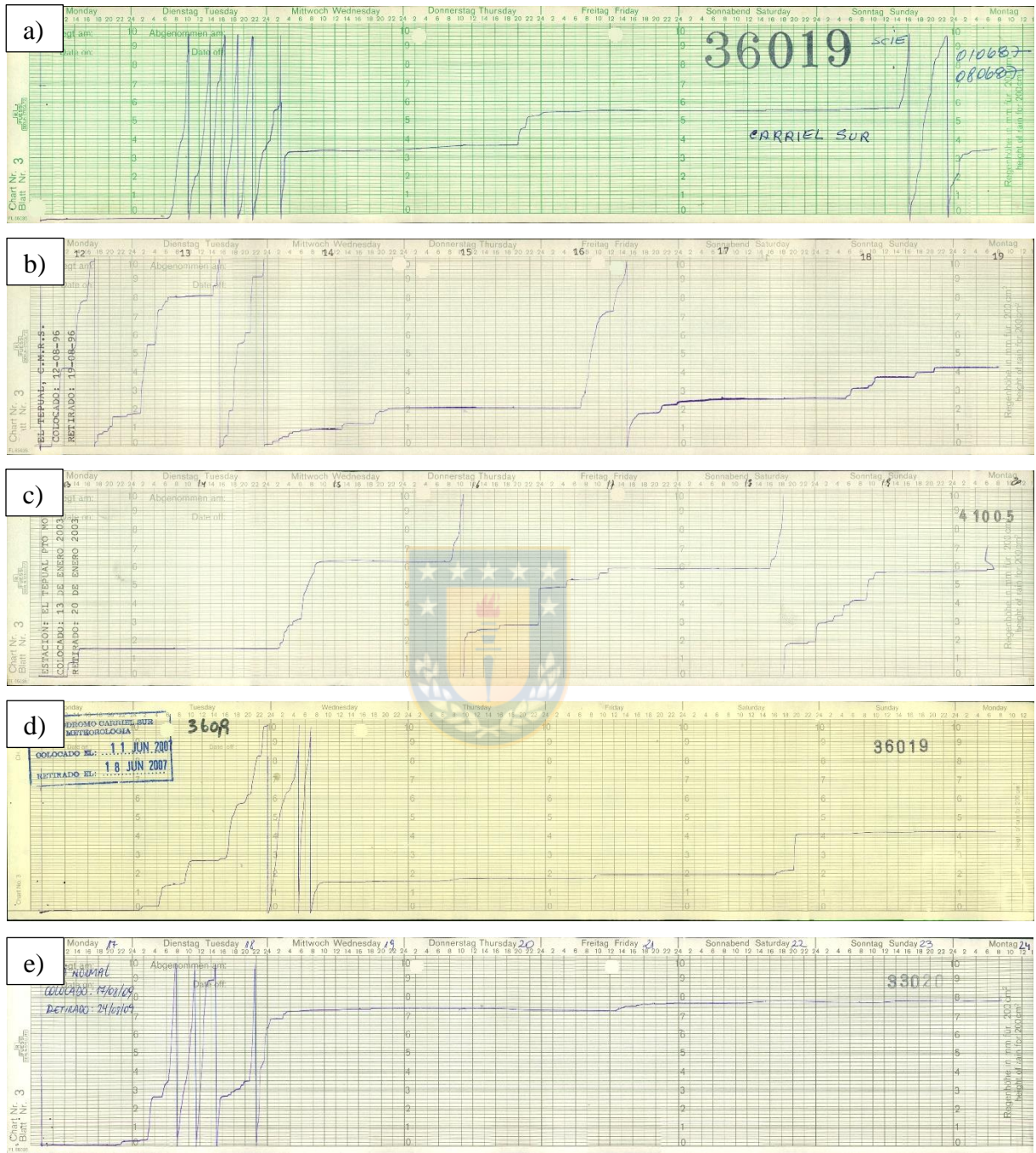


Figura A.4.1.1 Pluviogramas utilizados en las pruebas de usuarios: Imagen 2.1 (a), Imagen 2.2 (b), Imagen 2.3 (c), Imagen 2.4 (d) e Imagen 2.5 (d)

Anexo 4.2 Precipitación máxima obtenida por cada usuario

Tabla A.4.2.1 Precipitaciones máximas (mm) obtenidas por el Usuario 1 en las cinco imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila

			Duración (horas)							
			2	4	6	8	10	12	18	24
Imágenes y Métodos	Im. 2.1	M	7.5	15.0	23.0	31.0	34.0	41.0	53.5	63.5
		PR	11.1	17.5	25.4	33.9	38.8	45.0	58.9	63.5
		Dif.	-48.4 %	-16.7 %	-10.3 %	-9.5 %	-14.0 %	-9.9 %	-10.1 %	0.0 %
	Im. 2.2	M	3.6	5.6	9.1	10.1	12.0	12.3	13.6	18.4
		PR	4.9	7.3	9.7	11.0	12.0	12.4	15.7	18.5
		Dif.	-35.9 %	-30.9 %	-6.8 %	-9.2 %	-0.2 %	-0.4 %	-15.3 %	-0.6 %
	Im. 2.3	M	3.5	6.2	6.3	6.3	6.9	7.3	9.8	9.8
		PR	5.2	6.0	6.2	6.4	7.0	7.3	9.3	9.7
		Dif.	-48.2 %	2.5 %	1.6 %	-1.9 %	-1.1 %	-0.2 %	5.4 %	1.2 %
	Im. 2.4	M	10.0	14.3	16.0	20.5	23.3	25.3	28.8	30.0
		PR	10.6	14.0	16.7	20.8	22.9	25.1	28.8	30.0
		Dif.	-6.2 %	1.9 %	-4.6 %	-1.3 %	1.7 %	0.8 %	0.1 %	0.1 %
	Im. 2.5	M	10.3	13.9	19.5	26.4	29.2	29.6	43.0	46.5
		PR	10.7	16.0	23.3	26.4	29.8	30.4	43.5	46.9
		Dif.	-3.5 %	-15.4 %	-19.7 %	-0.1 %	-2.1 %	-2.8 %	-1.1 %	-0.8 %
Promedio Dif.			28.4 %	13.5 %	8.6 %	4.4 %	3.8 %	2.8 %	6.4 %	0.6 %

Tabla A.4.2.2 Precipitaciones máximas (mm) obtenidas por el Usuario 2 en las cinco imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila

			Duración (horas)							
			2	4	6	8	10	12	18	24
Imágenes y Métodos	Im. 2.1	M	7.9	15.9	22.9	28.4	36.3	44.2	54.3	63.3
		PR	11.1	17.5	25.4	33.9	38.8	45.0	58.9	63.5
		Dif.	-40.9 %	-10.1 %	-10.8 %	-19.5 %	-6.8 %	-1.9 %	-8.5 %	-0.3 %
	Im. 2.2	M	3.8	5.9	9.1	10.6	12.2	12.6	15.4	18.1
		PR	4.9	7.3	9.6	11.0	12.0	12.4	15.7	18.5
		Dif.	-28.9 %	-23.7 %	-5.9 %	-4.1 %	1.4 %	2.0 %	-1.7 %	-2.2 %
	Im. 2.3	M	5.3	6.1	6.3	6.4	6.5	7.4	9.4	9.8
		PR	5.0	6.0	6.2	6.3	6.8	7.2	9.2	9.7
		Dif.	6.1 %	0.9 %	1.6 %	2.0 %	-4.9 %	3.0 %	1.6 %	1.3 %
	Im. 2.4	M	10.7	14.3	15.6	20.6	23.0	25.1	28.7	30.1
		PR	10.6	14.0	16.7	20.8	22.9	25.1	28.8	30.0
		Dif.	0.8 %	1.9 %	-7.3 %	-0.8 %	0.4 %	0.0 %	-0.2 %	0.4 %
	Im. 2.5	M	10.9	13.3	19.5	25.5	29.3	29.7	43.4	47.0
		PR	10.7	16.0	23.3	26.4	29.8	30.4	43.5	46.9
		Dif.	2.2 %	-20.6 %	-19.7 %	-3.6 %	-1.8 %	-2.4 %	-0.2 %	0.3 %
Promedio Dif.			15.8 %	11.5 %	9.1 %	6.0 %	3.1 %	1.8 %	2.4 %	0.9 %

Tabla A.4.2.3 Precipitaciones máximas (mm) obtenidas por el Usuario 3 en las cinco imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila

			Duración (horas)							
			2	4	6	8	10	12	18	24
Imágenes y Métodos	Im. 2.1	M	9.0	16.5	24.0	32.0	39.5	42.5	54.7	63.8
		PR	11.1	17.5	25.4	33.9	38.8	45.0	58.9	63.5
		Dif.	-23.7 %	-6.1 %	-5.7 %	-6.1 %	1.9 %	-6.0 %	-7.7 %	0.4 %
	Im. 2.2	M	3.6	6.0	9.0	11.0	12.0	12.2	14.7	18.0
		PR	4.9	7.3	9.6	11.0	12.0	12.4	15.7	18.5
		Dif.	-36.1 %	-21.6 %	-7.1 %	-0.3 %	-0.2 %	-1.3 %	-6.5 %	-2.7 %
	Im. 2.3	M	3.8	6.2	6.4	6.4	7.1	7.4	9.4	9.8
		PR	5.2	6.0	6.2	6.4	7.0	7.3	9.3	9.7
		Dif.	-36.5 %	2.5 %	3.1 %	-0.3 %	1.8 %	1.2 %	1.3 %	1.2 %
	Im. 2.4	M	10.2	14.2	16.7	20.5	23.0	25.0	28.5	29.8
		PR	10.6	14.0	16.7	20.8	22.9	25.1	28.8	30.0
		Dif.	-4.1 %	1.2 %	-0.2 %	-1.3 %	0.4 %	-0.4 %	-1.0 %	-0.6 %
	Im. 2.5	M	7.8	14.0	19.6	25.5	29.3	30.1	42.9	46.0
		PR	10.7	16.0	23.3	26.4	29.8	30.3	43.4	46.8
		Dif.	-36.6 %	-14.5 %	-19.0 %	-3.5 %	-1.7 %	-0.8 %	-1.2 %	-1.8 %
Promedio Dif.			27.4 %	9.2 %	7.0 %	2.3 %	1.2 %	1.9 %	3.5 %	1.4 %

Tabla A.4.2.4 Precipitaciones máximas (mm) obtenidas por el Usuario 4 en las cinco imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila

			Duración (horas)							
			2	4	6	8	10	12	18	24
Imágenes y Métodos	Im. 2.1	M	8.4	15.0	25.0	30.7	38.2	41.2	53.7	63.3
		PR	11.1	17.5	25.4	33.9	38.8	45.0	58.9	63.5
		Dif.	-32.5 %	-16.7 %	-1.5 %	-10.6 %	-1.5 %	-9.3 %	-9.7 %	-0.4 %
	Im. 2.2	M	3.7	6.1	9.1	10.1	12.0	12.0	15.0	18.3
		PR	4.9	7.3	9.6	11.0	12.0	12.4	15.7	18.5
		Dif.	-32.4 %	-19.6 %	-5.9 %	-9.3 %	-0.2 %	-2.9 %	-4.4 %	-1.0 %
	Im. 2.3	M	4.0	6.2	6.3	6.3	7.1	7.4	9.4	9.8
		PR	5.2	6.0	6.2	6.4	7.0	7.3	9.3	9.7
		Dif.	-29.7 %	2.5 %	1.6 %	-1.9 %	1.8 %	1.2 %	1.4 %	1.3 %
	Im. 2.4	M	10.1	14.2	15.5	20.4	23.0	25.0	28.5	29.3
		PR	10.6	14.0	16.7	20.8	22.9	25.1	28.8	30.0
		Dif.	-5.1 %	1.2 %	-8.0 %	-1.8 %	0.4 %	-0.4 %	-1.0 %	-2.3 %
	Im. 2.5	M	6.6	13.9	19.6	25.5	29.2	30.0	32.7	46.1
		PR	10.7	16.0	23.3	26.4	29.8	30.4	43.5	46.9
		Dif.	-61.5 %	-15.4 %	-19.1 %	-3.6 %	-2.1 %	-1.4 %	-32.9 %	-1.7 %
Promedio Dif.			32.2 %	11.1 %	7.2 %	5.4 %	1.2 %	3.1 %	9.9 %	1.3 %

Tabla A.4.2.5 Precipitaciones máximas (mm) obtenidas por el Usuario 5 en las cinco imágenes (Im.) con el método manual (M) y el programa PluvioReader (PR). Se indica además la diferencia porcentual entre ambos métodos (Dif.), con su promedio en la última fila

			Duración (horas)							
			2	4	6	8	10	12	18	24
Imágenes y Métodos	Im. 2.1	M	10.8	17.5	25.0	32.0	37.7	43.0	58.0	66.4
		PR	11.1	17.5	25.4	33.9	38.8	45.0	58.9	63.5
		Dif.	-3.1 %	-0.1 %	-1.5 %	-6.1 %	-2.8 %	-4.7 %	-1.6 %	4.3 %
	Im. 2.2	M	5.0	7.0	9.2	11.0	12.0	12.3	12.9	13.1
		PR	4.9	7.3	9.6	11.0	12.0	12.4	15.7	18.5
		Dif.	2.0 %	-4.3 %	-4.8 %	-0.3 %	-0.2 %	-0.4 %	-21.4 %	-41.2 %
	Im. 2.3	M	5.4	6.1	6.3	6.3	7.0	7.3	9.4	9.8
		PR	5.2	6.0	6.2	6.4	7.0	7.3	9.3	9.7
		Dif.	4.0 %	0.9 %	1.6 %	-1.9 %	0.4 %	-0.1 %	1.4 %	1.3 %
	Im. 2.4	M	10.0	14.5	16.0	21.0	23.0	25.1	28.6	30.1
		PR	10.6	14.0	16.7	20.8	22.9	25.1	28.8	30.0
		Dif.	-6.2 %	3.2 %	-4.6 %	1.1 %	0.4 %	0.0 %	-0.6 %	0.4 %
	Im. 2.5	M	9.0	14.0	19.6	25.5	26.3	30.1	42.9	46.1
		PR	10.7	16.0	23.3	26.4	29.8	30.4	43.5	46.9
		Dif.	-18.5 %	-14.6 %	-19.1 %	-3.6 %	-13.4 %	-1.1 %	-1.3 %	-1.7 %
Promedio Dif.			6.7 %	4.6 %	6.3 %	2.6 %	3.5 %	1.3 %	5.3 %	9.8 %