



**UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN –FRECUENCIA  
(IDF) PARA ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS DE LAS REGIONES DE  
VALPARAÍSO Y DE O’HIGGINS, Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON  
ALGUNAS ESTACIONES DE LAS REGIONES METROPOLITANA Y DEL MAULE**

**PATRICIA KARINA MACAYA PÉREZ**

**Memoria para optar al Título de:  
INGENIERO FORESTAL**

**PROFESOR GUÍA: DR. ING. ROBERTO PIZARRO TAPIA**

**TALCA – CHILE**

**2004**



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES.**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

La Srta. Patricia Karina Macaya Pérez, ha realizado la Memoria: **"Construcción de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para Estaciones Pluviográficas de las Regiones de Valparaíso y de O'Higgins, y Análisis Comparativo con algunas Estaciones de las Regiones Metropolitana y del Maule"**, como uno de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Forestal. El Profesor Guía es el Sr. Roberto Pizarro Tapia.

La comisión de Calificación constituida por los profesores Sr. Roberto Pizarro Tapia y Sr. Juan Franco De La Jara, han evaluado con nota 7,0 (siete coma cero).

**CRISTIAN LOPEZ MONTECINOS**  
**DIRECTOR**  
**ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL**

Talca, Junio de 2004.

*A mi hija Isabel,  
por iluminar mi vida con su sonrisa.  
A mi madre, Patricia,  
por su amor, apoyo y comprensión.  
A mi abuela, Eliana,  
por su cariño eterno.*

## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer a todas aquellas personas que me apoyaron, de una u otra manera, durante el desarrollo de esta memoria, ya que su compañía y preocupación en el recorrido de este camino fue fundamental para seguir adelante siempre con alegría y esperanza.

A mi madre Patricia, por ayudarme a crecer con amor y enseñanza, a mis abuelos Eliana y Roberto por el cariño que siempre me han entregado, a mi tía Erika por despertar en mí el amor por la naturaleza y por esta carrera y a mi tía Alejandra por sus consejos y preocupación.

A mi profesor guía, Dr. Roberto Pizarro Tapia, por la paciencia y el tiempo entregados durante el desarrollo de esta memoria, sin los cuales no hubiese sido posible llegar a buen término.

A mi profesor y maestro, Dr. Alejandro Troncoso Aguilar, por sus valiosos consejos y vivencias, las que han aportado profundamente en mi crecimiento personal y profesional, además de acrecentar en mí la pasión que siento por esta profesión.

A mi eterna amiga Macarena, por estar conmigo siempre, en las penas y en las alegrías y por entregarme ese amor y preocupación de hermana que toda la vida agradeceré.

A Cristian, por su constante apoyo y comprensión en esta nueva labor de ser padres, gracias por auxiliarme y entregarme tu cariño en los momentos más difíciles.

A mis amigas Claudia y Sandra, por el cariño y la compañía que me han brindado en estos años de Universidad, que no terminarán junto con esta memoria.

A mi amiga y compañera de tareas Daniela, por que gran parte del recorrido universitario lo emprendimos juntas.

A Iván, Carlos, Patty y Andrés, compañeros y amigos con quiénes compartí anécdotas y gratos momentos que serán difíciles de olvidar.

*A Dios, por ser mi amigo y compañero eterno.*

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	3
2.1. Objetivo general .....	3
2.2. Objetivos específicos .....	3
<b>3. ANTECEDENTES GENERALES</b> .....	4
3.1. Antecedentes del área en estudio .....	4
3.1.1. Región de Valparaíso .....	4
3.1.2. Región de O'Higgins .....	5
<b>4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	7
4.1. Definición de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y sus componentes .....	7
4.1.1. Intensidad.....	8
4.1.2. Frecuencia o período de retorno .....	8
4.1.3. Probabilidad de excedencia .....	9
4.2. Análisis estadístico de las variables hidrológicas .....	9
4.3. Aplicación de las Curvas IDF .....	10
4.4. Métodos de construcción de las Curvas IDF .....	12
<b>5. METODOLOGÍA</b> .....	18
5.1. Desarrollo de la investigación .....	18
5.1.1. Revisión bibliográfica .....	18
5.1.2. Recolección de la información requerida .....	18
5.1.3. Selección de las estaciones pluviográficas .....	19
5.1.4. Selección de las intensidades máximas .....	21
5.1.5. Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad .....	22

	<i>Medidas de bondad de ajuste</i> .....	23
	a. Coeficiente de Determinación $R^2$ .....	23
	b. Test de Kolmogorov – Smirnov .....	23
5.1.6.	Determinación de las Curvas IDF para distintos periodos de retorno ...	25
5.1.7.	Análisis estadístico .....	25
5.1.7.1	Análisis de regresión .....	26
	<i>Supuestos de regresión</i> .....	27
	a. Supuesto de Normalidad .....	27
	i. Test de Kolmogorov – Smirnov .....	27
	ii. Histograma de frecuencias .....	27
	b. Supuesto de Homocedasticidad.....	28
	i. Test de Goldfeld – Quandt .....	28
	ii. Gráfico de residuos .....	29
	c. Supuesto de No - Autocorrelación.....	29
	i. Test $d$ de Durbin – Watson .....	30
	ii. Gráfico de residuos v/s tiempo .....	30
5.1.7.2	Medidas de bondad de ajuste del modelo .....	31
	a. Coeficiente de Determinación $R^2$ .....	31
	b. Prueba U de Mann – Whitney .....	31
5.1.8.	Definición de las tablas de uso práctico .....	33
5.1.9.	Comparación de Curvas IDF .....	34
5.1.10.	Presentación de resultados .....	34
5.1.11.	Análisis y discusión de resultados .....	35
5.1.12.	Conclusiones y recomendaciones .....	35
5.2.	Materiales .....	35
<b>6.</b>	<b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
6.1.	Alturas máximas de precipitación .....	37
6.2.	Obtención de las intensidades máximas de precipitación en mm/h .....	44
6.3.	Ajuste de los datos a la función de probabilidad de Gumbel .....	51

6.4.	Determinación de las pruebas de bondad de ajuste .....	52
6.5.	Diseño de las Curvas IDF para cada una de las estaciones seleccionadas .....	54
6.6.	Determinación de las tablas de uso práctico .....	58
6.7.	Determinación de las expresiones matemáticas generales de las Curvas IDF .....	66
6.7.1	Modelo de regresión lineal múltiple .....	67
6.7.2	Primer modelo de regresión lineal múltiple transformado .....	69
6.7.3	Segundo modelo de regresión lineal múltiple transformado .....	70
6.7.4	Modelo de regresión lineal múltiple final .....	72
6.7.5	Medidas de bondad de ajuste .....	74
6.8.	Análisis gráfico comparativo de las intensidades máximas de precipitación .....	75
<b>7.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
7.1.	Información pluviométrica seleccionada .....	76
7.2.	Intensidades máximas seleccionadas .....	77
7.3.	Ajuste de los datos a la función de Gumbel .....	78
7.4.	Diseño gráfico de las Curvas IDF .....	79
7.5.	Determinación analítica de las Curvas IDF .....	81
7.6.	Análisis comparativo de las intensidades máximas de precipitación .....	82
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>88</b>
8.1.	Conclusiones .....	88
8.2.	Recomendaciones .....	90
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>92</b>

## RESUMEN

Este estudio contempla la construcción de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), para siete estaciones pluviográficas distribuidas en las regiones de Valparaíso y de O'Higgins. Las estaciones seleccionadas para este estudio son Hacienda Pedernal, Quillota, Embalse Lliu-Lliu y Lago Peñuelas, correspondientes a la Región de Valparaíso y Rengo, Central las Nieves y Convento Viejo pertenecientes a la Región de O'Higgins.

La metodología consistió en muestreos sobre los pluviogramas de las siete estaciones ya señaladas, con el fin de obtener las intensidades máximas registradas en cada año, para las duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 12, 24 y 48 horas. Luego de llevar los datos extraídos a intensidades horarias, se ajustó una función de probabilidad para eventos extremos, en este caso la función de Gumbel, que entregó una excelente calidad de ajuste. Una vez realizado el ajuste se construyeron las curvas IDF para los períodos de retorno de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75 y 100 años.

Con lo obtenido anteriormente, se construyeron las tablas de uso práctico, que permiten extrapolar las curvas a zonas cercanas, con regímenes climáticos similares y que sólo cuentan con información pluviométrica. Además, fue posible determinar expresiones matemáticas generales para las Curvas IDF, en cada estación, de la forma  $I = (k \times T^m)/d^n$ , en donde  $I$  representa a la intensidad de precipitación en mm/h,  $T$  corresponde al período de retorno en años,  $d$  a la duración de las precipitaciones en minutos y  $k$ ,  $m$ ,  $n$  son constantes de regresión.

Finalmente, se realizó un análisis gráfico comparativo de las intensidades máximas de precipitación, obtenidas directamente de las bandas de pluviógrafo, para las regiones de Valparaíso, Metropolitana, de O'Higgins y del Maule. Del análisis observado, se puede señalar que las máximas intensidades de precipitación no siguen un patrón específico de distribución en dichas regiones; sin embargo, es importante destacar que gran parte de las mayores intensidades se registraron en estaciones pluviográficas ubicadas junto a cuerpos de agua, ya sea lagos o embalses, antecedente que debería ser investigado con mayor profundidad.

## SUMMARY

Through this study, Intensity-Duration-Frequency curves (IDF) were built in Valparaiso Region and O'Higgins Region, both in Chile. Pluviograph stations selected were Hacienda Pedernal, Quillota, Embalse Lliu-Lliu and Lago Peñuelas, in Valparaiso Region and Rengo, Central las Nieves and Convento Viejo in the O'Higgins Region.

Methodology was based of samplings on pluviograph records, in order to obtaining maximum intensities in every year, for durations 1, 2, 4, 6, 8, 12, 24 and 48 hours. Later, information was changed to hourly intensity and fitted to Gumbel probability function for extreme events, that gave an excellent goodness of fit. Finally, IDF curves were built for 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75 and 100 years, as return periods.

Then, tables of practical use were built; they allow to extrapolate curves to near areas, without pluviograph, but with similar climatic regimes. Also, it was possible to define general mathematical expressions for Curves IDF, of each one of seven stations, whit form  $I = (k \times T^m)/d^n$ , where  $I$  is rainfall intensity in mm/h,  $T$  return period in years,  $d$  duration of rainfall in minutes and  $k$ ,  $m$  and  $n$  are regression constants.

Finally, it was made a comparative graphical analysis of maximum intensities, obtained directly of pluviograph records, for Valparaiso, Metropolitan, O'Higgins and Maule regions in Chile. Thus, maximum rainfall intensities do not show a specific distribution pattern. On the other hand, maximum intensities were found in stations next to water bodies, such as lakes or dams, antecedent that should be investigated with more details.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital en el desarrollo del ser humano y parte fundamental de su quehacer productivo, lo que adquiere mayor relevancia en zonas donde las precipitaciones son escasas, ya que su ocurrencia influirá aún más directamente en la economía. Es por esto que el estudio de las precipitaciones de una región, es de gran importancia para determinar el óptimo aprovechamiento de los recursos hídricos, especialmente en zonas áridas y semiáridas.

Las precipitaciones son, junto con las temperaturas, el elemento climático que de manera más directa influye en la configuración del medio natural (Fernández, 1995). Su distribución, tanto temporal como espacial, condiciona los ciclos agrícolas y otras actividades del ser humano. Contrarias a dicha importancia, aparecen una serie de dificultades en el estudio de las precipitaciones, tales como la irregularidad, que es muy notable en los lugares de transición climática, donde los valores medios son muy poco significativos y se precisa el estudio de series bastante largas para poder evaluar y caracterizar este elemento del clima y, la duración e intensidad, ya que la cantidad total de precipitación registrada en un lugar puede tener efectos muy diferentes en función de su intensidad.

Como variable de estudio hidrológico, la precipitación se define como la cantidad de agua que llega al suelo en forma líquida o sólida y se puede caracterizar a través de su intensidad, su distribución en el espacio y tiempo y su frecuencia de ocurrencia. Para hacer dicha caracterización se necesita una gran cantidad de información que es extraída de series pluviográficas, disponibles en estaciones de medición que posean pluviógrafo (Abarza, 2001). Cuando existe suficiente información disponible, respecto a la intensidad, la duración y la frecuencia o períodos de retorno de las precipitaciones, es posible generar una relación entre estas características que se presenta gráficamente por medio de curvas conocidas como “Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia”.

Así, por medio del análisis de las curvas IDF, es posible conocer con mayor acierto la intensidad de los eventos de lluvia asociados a distintos períodos de retorno y duración de la misma. Esto resulta fundamental en la planificación de proyectos de diseño hidrológico y obras de infraestructura, para los cuales se debe conocer la probabilidad de que se produzcan determinados valores de intensidad de precipitación que representen riesgo.

Con esta memoria, se pretende desarrollar y analizar las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, para cuatro estaciones pluviográficas de la región de Valparaíso y tres estaciones pluviográficas de la región del Libertador Bernardo O'Higgins, lo que permitirá determinar patrones de conducta de las precipitaciones en dichas regiones.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General.**

- Contribuir al diseño de proyectos de ingeniería hidrológica en las regiones de Valparaíso y del Libertador Bernardo O'Higgins, a través de la generación y caracterización de algunas curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, válidas para dichas regiones.

### **2.2. Objetivos Específicos.**

- Obtener las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia y determinar las expresiones matemáticas generales de dichas curvas, para cuatro estaciones pluviográficas de la Región de Valparaíso y tres estaciones pluviográficas de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.
- Analizar comparativamente las curvas IDF de las regiones de Valparaíso, Metropolitana, del Libertador Bernardo O'Higgins y del Maule.

### **3. ANTECEDENTES GENERALES**

#### **3.1 Antecedentes del Área en Estudio.**

##### **3.1.1. Región de Valparaíso.**

La Región de Valparaíso, ubicada en el centro de Chile, abarca una superficie total de 16.396,1 km<sup>2</sup> y se extiende entre los 32°02' y 33°57' de latitud Sur. Corresponde a la Quinta Región administrativa de Chile y según el censo de 2002, su población alcanza a 1.539.852 habitantes.

En cuanto al relieve de la región, este resulta ser muy variado, ya que se trata de una zona de transición entre el Norte Chico y Chile central. La cordillera de Los Andes es alta y maciza, con altitudes que pueden superar los 5.000 m., manteniendo un aspecto amurallado, tal como en las regiones del norte del país, aunque con una disminución gradual de las altitudes máximas. En el norte de la región se extienden los valles transversales y la depresión intermedia sólo está presente en algunas cuencas interiores, delimitadas por serranías. Al sur del Aconcagua, la cordillera costera se presenta elevada y bien definida, con alturas superiores a los 2.000 metros, conformando hoyas hidrográficas diferentes de las andinas; y de Valparaíso al sur, la costa se transforma en acantilado, con algunas disecciones que permiten la formación de algunas playas.

Esta región se encuentra inserta en una zona de transición entre el norte y el centro del país; es por eso que presenta variados tipos de climas, producto de la mezcla entre el clima mediterráneo y el semiárido, presente en la Región de Coquimbo. El clima que prima mayormente es el de tipo mediterráneo, con estaciones bien diferenciadas, con precipitaciones de unos 300 mm anuales, concentradas en invierno. Este tipo de clima está dividido a su vez en dos subgrupos: uno costero, donde la masa oceánica atenúa los contrastes térmicos diurnos y anuales y las precipitaciones medias superan los 450 mm anuales, y uno al interior, más seco, y con precipitaciones de unos 250 mm anuales.

En cuanto a las temperaturas, en el sector costero de la región el clima es suave, sin extremos en verano ni en invierno (mínima de 8 °C en invierno y máxima de 27 °C en verano). En el valle central los veranos son cálidos, con máximas de 30 °C o más y mínimas de unos 12 °C, y los inviernos son suaves, con máximas de entre 12 °C y 18 °C y mínimas cercanas a 0 °C.

La red hidrográfica regional se encuentra compuesta por numerosos cursos de agua, lo que se corresponde con la complejidad del relieve existente en la región. Las hoyas andinas más importantes son las del Petorca, al norte; de La Ligua y del Aconcagua, al centro de la región; y de los ríos Maipo y Rapel hacia el sur. Además, las hoyas hidrográficas formadas en la Cordillera de la Costa son numerosas, pero sólo llevan agua cuando llueve y no se consideran ríos de caudal permanente (Gobierno Regional de Valparaíso, 2004).

### **3.1.2. Región del Libertador Bernardo O'Higgins.**

La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, se localiza en la macrozona central del país, aproximadamente entre los 33°50' y los 34°45' de latitud sur, abarcando una superficie de 16.387 km<sup>2</sup>. Corresponde a la Sexta Región administrativa de Chile y según el censo de 2002, su población alcanza a los 780.627 habitantes.

En cuanto al relieve, la característica más importante de esta región es la presencia de las cuatro fajas longitudinales: la Cordillera de los Andes se presenta con altitudes que varían entre los 3.000 a 4.000 m.s.n.m.; la Depresión Intermedia se presenta con formas planas generadas por la erosión fluvial, destacando al norte de la región la cuenca de Rancagua que se extiende desde Angostura de Paine hasta Angostura de Pelequén por el sur; la Cordillera de la Costa se presenta baja y de formas redondeadas, con altitudes de hasta 2.000 m; y las planicies litorales alcanzan gran extensión entre la costa y el cordón costero.

La Región de O'Higgins presenta clima mediterráneo-cálido, de estación seca prolongada, con lluvias invernales que se concentran entre mayo y agosto. El promedio de precipitaciones es de 563 mm anuales, observándose un aumento de ellas a medida que se avanza hacia el sur. En invierno, las mínimas bordean los 0 °C y las máximas, unos 15 °C; en verano, las máximas superan los 30 °C y las mínimas alcanzan los 12 °C.

Dadas las condiciones topográficas de la región, los vientos marinos no penetran en la Depresión Intermedia, lo que genera variaciones climáticas en las distintas fajas. En la costa permanece nuboso durante gran parte del año, producto de una mayor humedad y abundante nubosidad. La Depresión Intermedia, debido a la sequedad, presenta fuertes contrastes térmicos, con una estación seca de seis meses y un invierno lluvioso. Las precipitaciones son mayores en la costa y en la Cordillera de los Andes, debido al relieve que no permite la entrada a los vientos húmedos oceánicos. A medida que se asciende en altura, hacia la cordillera las temperaturas descienden por bajo 0°C en los meses de invierno.

En cuanto al sistema hidrográfico de la región, éste se encuentra constituido por el sistema del río Rapel y sus afluentes más importantes son el río Cachapoal y el Tinguiririca, ambos provenientes de la Cordillera de los Andes (CONAMA, 2003).

## **4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1. Definición de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y sus Componentes.**

Según Témez (1978), las curvas IDF son aquéllas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno.

Para Bedient y Huber (1992), son representaciones gráficas que muestran la probabilidad de que una cierta intensidad media de precipitación pueda ocurrir, dada una determinada duración.

Así mismo para De Fraja (1993), las curvas IDF corresponden a una metodología que permite estimar el valor de las precipitaciones con distintos intervalos y períodos de retorno, a partir de la información de precipitación diaria registrada en las estaciones pluviométricas.

Por otra parte, López Cadenas (1998) señala que la estimación de la intensidad de precipitación se realiza en base a las curvas “Intensidad-Duración-Frecuencia”, que representan duraciones en abcisas y alturas de precipitación en ordenadas. Cada curva representada corresponde a una frecuencia (o período de retorno), de tal forma que las gráficas de las curvas IDF representan la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondientes, todos los de una misma curva, a un período de retorno (o frecuencia) idéntico.

Con la definición de las curvas IDF, surgen otros términos que también deben ser considerados, tales como la intensidad de precipitación, la frecuencia o período de retorno y la probabilidad de excedencia de un evento determinado, los cuales para su mejor comprensión serán analizados en forma separada.

#### **4.1.1. Intensidad.**

Según Chow *et al* (1994), la intensidad se define como la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h o pulg/h), y se expresa como:

$$i = \frac{P}{T_d}$$

Donde, P es la profundidad de lluvia (mm o pulg) y  $T_d$  es la duración en horas.

#### **4.1.2. Frecuencia o Período de Retorno.**

En hidrología, normalmente se prefiere trabajar con períodos de retorno en lugar de probabilidades, pues es un concepto que resulta más claro, ya que tiene las mismas unidades (tiempo) que la vida útil de las obras y puede compararse con ésta (Aparicio, 2003).

De hecho, Bedient y Huber (1992) coinciden con esta propuesta y señalan que, en el área de la hidrología, la manera más común para indicar la probabilidad de un evento, es asignar a éste un período de retorno.

Los conceptos de frecuencia y período de retorno se encuentran estrechamente relacionados ya que, según Chow *et al* (1994), la frecuencia se expresa en función del período de retorno, que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud del diseño.

Para Aparicio (2003), el número de años en que, en promedio, se presenta un evento puntual, se llama período de retorno, intervalo de recurrencia o, simplemente frecuencia, y se acostumbra denotarlo como T.

#### **4.1.3. Probabilidad de Excedencia.**

Es la probabilidad de que el valor de un evento, sea superado en un año cualquiera (Bedient y Huber, 1992). Para definir de mejor manera este concepto, deben considerarse los elementos de la función de distribución de probabilidad, tema que será abordado con detalle en secciones posteriores.

#### **4.2. Análisis Estadístico de las Variables Hidrológicas.**

El conocimiento de los valores máximos de intensidad de precipitación, cuyas cifras son a veces sorprendentes, resulta de gran interés para su uso tanto teórico como práctico. Cuando se dispone de largas series de datos, es frecuente considerar el período de retorno de ciertas intensidades críticas, entendiendo como tal el número de años que en promedio han de transcurrir para que se origine un fenómeno de magnitud igual o superior al de referencia. Para esta previsión estadística de lluvias excepcionales, se estudia el ajuste de los datos mediante ciertas leyes de probabilidad de máximos, que permiten obtener, sobre el cálculo a partir de la muestra, valores aproximados para períodos de retorno superiores al formado por la propia muestra (Cuadrat y Pita, 2000).

Al respecto, una ley de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante el ajuste a una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información probabilística en la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados (Chow *et al*, 1994).

Para el estudio de las variables hidrológicas, debe conocerse que las series de caudales y precipitaciones máximas no se ajustan normalmente a las distribuciones normales, sino que es necesario utilizar distribuciones extremas tales como la función Logarítmica-normal, la función Gamma, la función Pearson y la función de Gumbel (Mintegui *et al*, 1990).

De éstas, Martínez y Navarro (1996) señalan que la función de Gumbel se emplea preferente y satisfactoriamente, para el análisis de valores máximos y mínimos, como por ejemplo las precipitaciones máximas diarias, los caudales punta invernales, las intensidades de precipitación en 24 horas, etc.

De igual modo, según Fernández (1995), la función de Gumbel es la de más extendido uso, especialmente para el estudio de las precipitaciones, lo cual ha sido comprobado por varios autores.

Para el caso de la distribución de probabilidad de Gumbel, ésta calcula la probabilidad  $P$ , de que un valor extremo, como pueden ser los máximos en 24 horas o en intervalos menores, sea inferior a un cierto valor  $x$ ;  $(1 - P)$  es la probabilidad de que un valor sea superior a  $x$ ;  $T = 1/(1 - P)$ , que es el número de años necesario para que el valor máximo alcanzado iguale o supere el valor  $x$  una sola vez (Fernández, 1995).

#### **4.3. Aplicación de las Curvas IDF.**

Un gran número de proyectos hidrológicos, como el control de inundaciones, el diseño de un evacuador de crecidas, los puentes, las redes de drenaje, etc., se definen en relación a una precipitación tipo que posee ciertas características predefinidas. A partir de este episodio lluvioso, se fijan las dimensiones del proyecto y se establecen los criterios de predicción y riesgo (Llamas, 1993)

Así mismo, Cuadrat y Pita (2000) señalan que uno de los rasgos característicos de las precipitaciones es su irregularidad tanto espacial como temporal, y la posibilidad de que se alcancen valores extremos, ya sean máximos o mínimos, que por sus consecuencias catastróficas y su impacto sobre la sociedad forman parte importante de los llamados riesgos naturales. Los episodios de lluvias extraordinarias constituyen uno de estos acontecimientos, cuando desembocan, por ejemplo, en importantes inundaciones, lo que se traduce en graves daños materiales y hasta humanos.

Si bien es posible advertir claramente la importancia del diseño de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, para la planificación hidrológica de un país o de una ciudad, es importante mencionar, que a nivel nacional son muy pocos, hasta ahora, los estudios relacionados con la construcción de las curvas IDF.

Espíldora (1971), citado por Abarza (2001), elaboró las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para algunas ciudades chilenas (Santiago, Chillán, Talcahuano y Valdivia), a partir de coeficientes generalizados de duración y frecuencia, los cuales fueron contrastados con los coeficientes de duración y frecuencia obtenidos de un estudio realizado por Bell (1969), citado por Llamas (1993), que permiten calcular lluvias de otras duraciones e igual período de retorno, conociendo la lluvia de una hora de duración y 10 años de período de retorno. Dichos factores son válidos para duraciones de lluvia entre 5 minutos y 2 horas, y para períodos de retorno entre 2 y 100 años.

Durán (1989), citado por De Fraja (1993), construyó las curvas IDF para la ciudad de Los Ángeles, con los datos de la estación del mismo nombre, perteneciente a la Dirección General de Aguas.

De Fraja (1993), también menciona que para las ciudades de Concepción-Talcahuano, se han desarrollado dos trabajos para obtener las curvas IDF de dichas ciudades. El primero fue desarrollado por Varas y Sánchez (1983), quienes calcularon las curvas IDF para dichas ciudades utilizando la información de la estación Carriel Sur de la Dirección Meteorológica de Chile.

El segundo estudio estuvo a cargo de Celis (1984), en base a la información de la estación meteorológica Bellavista, dependiente del Departamento de Física de la Universidad de Concepción, seleccionando 428 chubascos diferentes (con un promedio de 33 chubascos por año) observados entre los años 1971 y 1983. Este estudio consideró períodos de 10, 20, 40, 60, 90, 120, 240, 360, 900 y 1440 minutos, aplicando distintos tipos de análisis de frecuencia para las intensidades registradas.

Entre los estudios más recientes, se encuentra el desarrollado por Abarza (2001), quién generó una serie de curvas IDF para seis estaciones pluviográficas de la Región del Maule. La información pluviográfica para la elaboración de dichas curvas se obtuvo directamente de las bandas de pluviógrafo, a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA). La metodología utilizada en dicho estudio fue la propuesta por Témez (1978), el cual relaciona las intensidades de precipitación para distintos períodos de retorno, con el propósito de graficar la relación entre las tres variables, intensidad, duración y frecuencia.

Esta misma metodología fue la utilizada por Román (2003), quién elaboró las curvas IDF para cinco estaciones pluviográficas de la Región Metropolitana, cuya información base fue igualmente facilitada por la DGA.

Por otro lado, en el Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR), Provincia del Chaco, Argentina, Depettris y Pilar (2001) realizaron un análisis para determinar adecuadamente la probabilidad de ocurrencia de eventos de precipitación que puedan producir anegamiento en el centro urbano. Este estudio tuvo como base la construcción de curvas IDF, en base a la información de tres estaciones pluviográficas ubicadas en los alrededores de AMGR. La importancia de este estudio radica en que el AMGR sufre anualmente graves daños a su equipamiento e infraestructura, e importantes pérdidas económicas al sistema productivo.

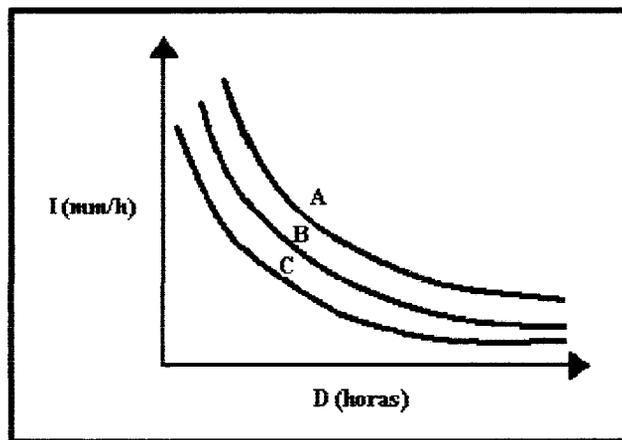
#### **4.4. Métodos de Construcción de las Curvas IDF.**

Según López Cadenas (1998), la construcción de las curvas se realiza a partir de los datos aportados por los pluviogramas de una determinada estación. El análisis de estos registros lleva a obtener expresiones de altura de precipitación en función de la duración, las cuales son características para cada zona

Las curvas IDF pueden ser determinadas por variados métodos. Chow *et al* (1994), proponen dos métodos de desarrollo de las curvas IDF: el primero consiste en utilizar un análisis de frecuencia de las precipitaciones, para lo cual se considera una función de valor

extremo, que puede ser la función de Gumbel, en tanto que el segundo método se basa en la expresión de las curvas como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia de diseño en una gráfica.

En relación al primer método de carácter gráfico, Témez (1978) plantea que la información debe extraerse directamente de las bandas de los pluviógrafos, seleccionando para cada año los valores extremos de precipitación para distintas duraciones. Luego, se obtiene la intensidad en mm/h, dividiendo cada uno de esos valores extremos por su duración, y ajustando sus valores a una ley de distribución de probabilidad extrema, como puede ser la Ley de Gumbel. Finalmente se grafican la intensidad de las precipitaciones y su duración para distintos períodos de retorno, obteniéndose las curvas IDF (Figura N° 1). Este método es el que será utilizado en esta investigación.



**Figura N°1:** Esquema de las curvas IDF

El segundo método, que se basa en la expresión de las curvas como ecuaciones, ha sido desarrollado por variados autores, entre los que destacan Wenzel (1982), citado por Chow *et al* (1994), quién desarrolló para algunas ciudades de Estados Unidos, coeficientes para ser utilizados en una ecuación de la forma:

$$I = \frac{c}{t^e} * f$$

Donde:

I = Intensidad de precipitación (pulg/h).

t = Duración (minutos).

c, e, f = coeficientes que varían con el lugar y el período de retorno.

Por otro lado, Sheng (1992) plantea que para las intensidades de lluvia, deben utilizarse y analizarse los datos de los pluviógrafos, para obtener intensidades de distintos periodos de tiempo y frecuencias. Si los únicos datos disponibles son las precipitaciones diarias, se puede emplear la siguiente expresión para determinar intensidades en períodos cortos y distintos:

$$I = \frac{R}{24} * \left( \frac{24}{t} \right)^{0.6}$$

Donde:

I = Intensidad de precipitación, en mm/h.

R = Precipitación máxima en 24 horas en un período de retorno de 10 años, en milímetros.

t = Duración o tiempo de concentración, en horas.

Siguiendo la metodología de las ecuaciones, Bell (1969), citado por Llamas (1993), señala que la precipitación, en milímetros, de un período de retorno T, y una duración t, es:

$$P_t^T = (0.21 * \ln T + 0.52) * (0.54t^{0.25} - 0.50) * P_{60}^{10}$$

Donde:

T = Período de retorno, en años.

t = Duración de lluvia, en minutos.

$P_{60}^{10}$  = Precipitación, cuya duración es de 60 minutos, con un período de retorno de 10 años.

Si bien, esta fórmula resulta válida para valores T comprendidos entre 2 y 100 años, y duraciones entre 5 y 120 minutos, los mejores resultados se han obtenido con períodos de retorno comprendidos entre 2 y 10 años y duraciones entre 5 y 10 minutos.

Otro aporte al desarrollo analítico de las curvas IDF fue hecho por Meinzer (1949), quien señala que la intensidad de las precipitaciones es inversamente proporcional a la duración de las mismas y, que la relación entre las variables intensidad, duración y frecuencia, es parte importante en la solución de muchos problemas de la ingeniería. El mismo autor hace mención de una serie de ecuaciones para varias ciudades de Estados Unidos, entre las que se encuentra la desarrollada por Kennison (1940), para la ciudad de Boston:

$$I = \frac{15.6 * (1.6F - 0.6)^{0.22}}{(t + 6)^{0.7}}$$

Donde:

I = Intensidad de precipitación.

t = Duración de la precipitación, en minutos.

F = Período de retorno, en años.

También en Estados Unidos, pero más recientemente, Chen (1983) usó tres intensidades de precipitación asociadas a sus respectivos período de retorno y duración: 10 años-1 hora ( $R^{10}_1$ ), 10 años-24 horas ( $R^{10}_{24}$ ), y 100 años-1 hora ( $R^{100}_1$ ), con las cuales describió el patrón geográfico de las precipitaciones en términos de la razón intensidad-duración ( $R^T_1/R^T_{24}$ ) para un período de retorno T, y la razón intensidad-frecuencia ( $R^{100}_t/R^{10}_t$ ) para una duración t. Luego, la expresión general de las curvas IDF para una intensidad de precipitación  $R^T_t$  en pulgadas, para una duración t (en minutos) y un período de retorno T (en años) es:

$$R^T_t = \frac{a_1 R^{10}_1 \left[ (x-1) \log(T_p/10) + 1 \right] \left( \frac{t}{60} \right)}{(t+b_1)^{c_1}}$$

Donde:

$$x = (R^{100}_t/R^{10}_t).$$

$a_1$ ,  $b_1$  y  $c_1$  = Coeficientes que se obtienen de tablas ya diseñadas en base a la razón entre las intensidades ( $R^{10}_1$ ) y ( $R^{10}_{24}$ ).

$$T_p = -1 / \ln(1-1/T).$$

Uno de los modelos matemáticos generales más aceptados es el propuesto por Aparicio (1997), que fue utilizado por Abarza (2001) y Román (2003) y que además será utilizado en esta investigación. Esta metodología relaciona simultáneamente las tres variables en una familia de curvas, cuya ecuación es la siguiente:

$$I = \frac{kT^m}{(d+c)^n}$$

Donde:

I = Intensidad de precipitación, en mm/h.

d = Duración de la precipitación, en minutos.

T = Período de retorno, en años.

k, m, c, n = Constantes obtenidas mediante un análisis de regresión lineal múltiple.

En Chile, Varas y Sánchez (1983), citados por De Fraja (1993) plantearon un procedimiento que consiste en realizar un análisis de frecuencia de la serie anual de lluvias máximas diarias (de 8 A.M. a 8 A.M.), con el objeto de calcular el valor con 10 años de período de retorno. Este valor se amplifica por el coeficiente 1.1 para obtener la precipitación máxima absoluta en 24 horas con 10 años de período de retorno. En seguida, con el coeficiente de duración ( $C_d$ ) y el coeficiente de frecuencia ( $C_f$ ) de una estación con un régimen similar de lluvias, se pueden obtener las curvas IDF para una zona de interés. El coeficiente de duración ( $C_d$ ) se define como la razón entre la lluvia caída en un intervalo cualquiera y la lluvia caída en 24 horas, ambas para un período de retorno de 10 años. Análogamente, se define el coeficiente de frecuencia ( $C_f$ ) como la razón entre la lluvia asociada a un cierto período de retorno y la lluvia de igual duración, pero de 10 años de período de retorno. La siguiente expresión, refleja lo anteriormente expuesto:

$$P_{t,T} = K * P_{10,D} * C_{d,t} * C_{f,T}$$

Donde:

$P_{t,T}$  = Lluvia con período de retorno T años y duración t horas, en milímetros.

$C_{d,t}$  = Coeficiente de duración para t horas.

$C_{f,T}$  = Coeficiente de frecuencia para T años de período de retorno.

K = Coeficiente para obtener la lluvia máxima absoluta en 24 horas, en función del valor máximo diario (se sugiere usar 1.1).

$P_{10,D}$  = Lluvia máxima diaria con 10 años de período de retorno.

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1. Desarrollo de la Investigación.**

#### **5.1.1. Revisión Bibliográfica.**

La revisión bibliográfica consistió en la recopilación de la mayor cantidad posible de información relacionada con el tema en estudio, la cual sirvió de base ante cualquier decisión o análisis que se tuvo que realizar. La información fue extraída de textos de hidrología y estadística, además de otros temas afines que proporcionaron antecedentes a esta investigación; también se utilizó Internet para complementar lo anteriormente señalado.

Esta etapa presentó la dificultad de la escasa información que pudo encontrarse en el ámbito nacional, debido principalmente a la falta de investigación, profundidad e importancia que se le ha asignado al estudio de las curvas IDF.

#### **5.1.2. Recolección de la Información Requerida.**

La información base de esta investigación fue aportada por la Dirección General de Aguas (DGA) de las regiones de Valparaíso y de O'Higgins, organismos que se encuentran a cargo de las siete estaciones pluviográficas que fueron abordadas en este estudio.

Dichas instalaciones cuentan con pluviógrafos que, por medio de bandas milimetradas, registran la totalidad de los eventos de precipitación que ocurren durante el año, en forma diaria y horaria, las cuales fueron facilitadas para llevar a cabo este estudio. Para cada una de las estaciones, se utilizó la máxima cantidad de años posibles de registros, de modo de disponer del máximo de datos pluviográficos y conseguir así una estadística confiable.

**5.1.3. Selección de las Estaciones Pluviográficas.**

En la actualidad, las regiones de Valparaíso y de O'Higgins cuentan, cada una, con cinco estaciones pluviométricas, equipadas con pluviógrafo, a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA), variando en todos los casos el número de años en que se ha registrado la información pluviográfica.

En este estudio no fue posible trabajar con la totalidad de las estaciones pluviográficas que presentan ambas regiones, ya que se encontraron problemas tanto de escasez como de mal estado de los registros. En la Región de Valparaíso se eliminó del estudio una estación por presentar registros en muy mal estado, lo que hizo imposible su medición; en la Región de O'Higgins, en cambio, el criterio para eliminar dos estaciones, fue la escasez de años de registros pluviográficos. Luego de esta selección, las estaciones incluidas en esta investigación se detallan con su nombre y coordenadas de ubicación geográfica en la Tabla N° 1; además en la Figura N° 2 se muestra el mapa donde aparecen las estaciones pluviográficas, diferenciando las seleccionadas de las no consideradas en este estudio.

**Tabla N° 1.** Coordenadas de ubicación geográfica de las estaciones pluviográficas seleccionadas.

<b>Región</b>	<b>Estación Pluviográfica</b>	<b>Latitud Sur</b>	<b>Longitud Oeste</b>
De Valparaíso	Hacienda Pedernal	32°05'00''	70°48'00''
	Quillota	32°54'00''	71°13'00''
	Embalse Lliu-Lliu	33°06'00''	71°13'00''
	Lago Peñuelas	33°09'00''	71°32'00''
Del Libertador Bdo. O'Higgins	Rengo	34°24'00''	70°52'00''
	Central Las Nieves	34°29'00''	70°45'00''
	Convento Viejo	34°46'00''	71°06'00''

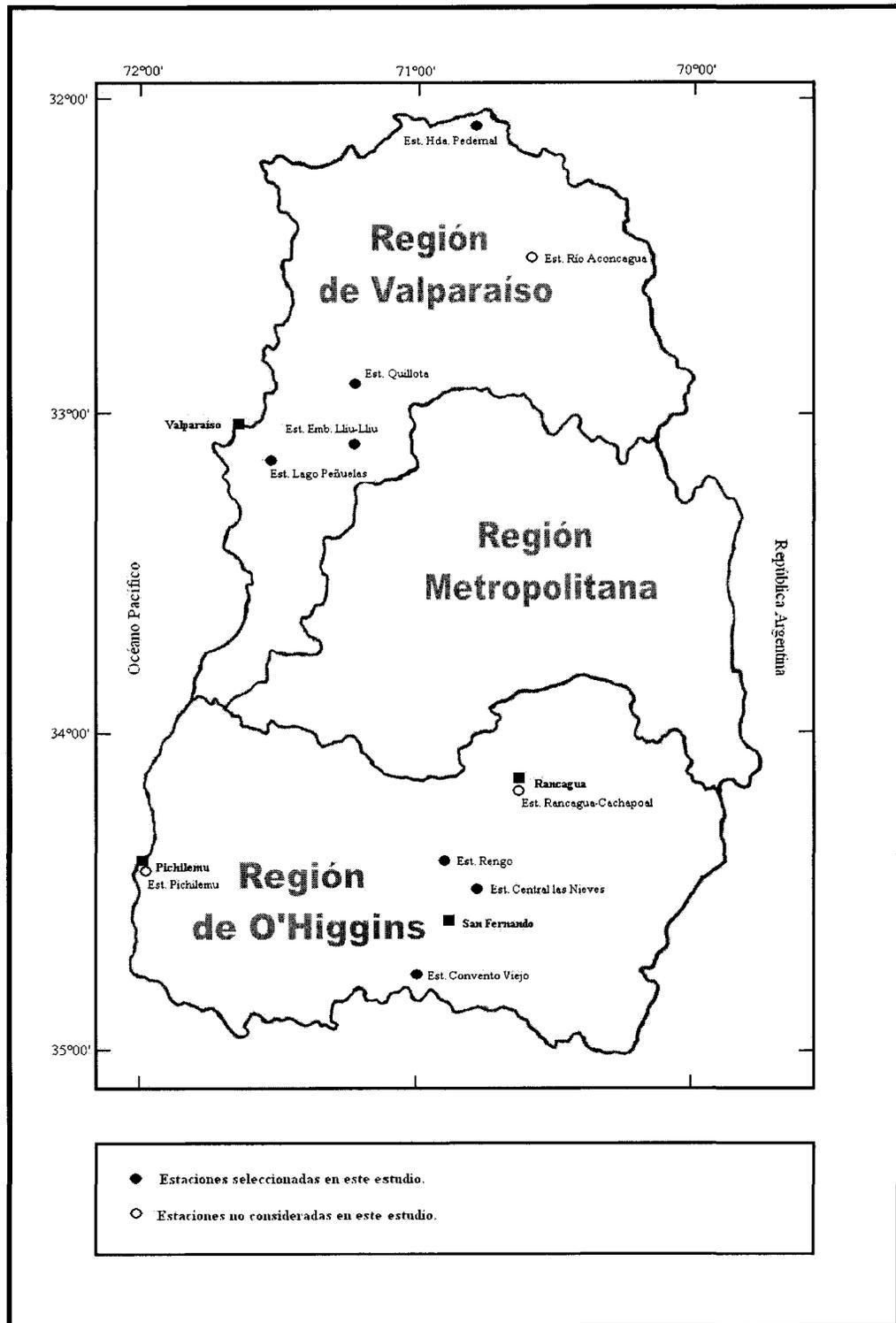


Figura N° 2. Mapa con las estaciones pluviográficas de las regiones de Valparaíso y de O'Higgins.

Cada una de las estaciones ya seleccionadas cuenta con registros pluviográficos de hasta 30 años, de los cuales se trató de trabajar con el máximo posible. Sin embargo, la totalidad de las estaciones a utilizar presentó algún porcentaje de bandas de pluviógrafo con registros defectuosos; esto, producto del paso del tiempo o del mal funcionamiento del equipo, lo que obligó a seleccionar sólo aquellos años en que los registros se encuentran en su mayoría completos y por ende con una estadística más potente. Para lograr esto último, se realizó una revisión previa de los registros anuales de cada una de las estaciones, estimándose contar con una estadística de un promedio de 25 años para cada estación.

#### **5.1.4 Selección de las Intensidades Máximas.**

Las bandas de registro de los pluviógrafos fueron analizadas con el objetivo de encontrar para cada año, las cantidades máximas de precipitación para las duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 12, 24 y 48 horas. Las mediciones se realizaron tomando como referencia las 08:00 horas de cada día; luego, para cada duración se utilizaron cuñas que se desplazaron en intervalos de tiempo de forma discreta. A modo de ejemplo, para una duración de 24 horas se hizo una medición desde las 08:00 horas de un día hasta las 08:00 horas del siguiente día y luego una segunda medición desde las 20:00 horas del primer día hasta las 20:00 horas del siguiente.

Con el propósito de obtener la gráfica de las curvas IDF, lo más aproximado al método propuesto por Témez (1978), se realizaron diversos muestreos, para evitar cambios en la tendencia de las curvas. De esta manera, en cada nuevo muestreo fue posible encontrar valores mayores de intensidad de precipitación, situación que era aún más común a duraciones pequeñas, las que debieron ser muestreadas 12 o incluso más veces en cada estación. En duraciones mayores, tales como 12, 24 o 48 horas, los muestreos fueron como mínimo 2 o 3.

El siguiente paso fue obtener las intensidades horarias máximas para las distintas duraciones y para cada año, para lo cual se dividieron los valores máximos de precipitación por su respectiva duración, resultando intensidades en mm/h.

### 5.1.5. Ajuste de los Datos a una Función de Distribución de Probabilidad.

Luego del cálculo de las intensidades máximas horarias de precipitación, para cada estación y para cada año, a cada serie de datos, para duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 12, 24 y 48 horas, se ajustó una función de distribución de probabilidad (FDP), de valor extremo, en este caso Gumbel, que entregara una buena calidad de ajuste. La función de distribución de probabilidad de Gumbel se define como:

$$F(x) = P[\mathcal{E} \leq X] = e^{-e^{-\sigma(x-\mu)}}, \text{ con, } -\infty \leq X \leq \infty$$

Donde:

$X$  = Valor a asumir por la variable aleatoria

$\mu$  y  $\sigma$  = Parámetros a estimar en función de la muestra

Los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ , se determinan con las siguientes expresiones:

$$\mu = \bar{X} - 0.450047 * S$$

$$\sigma = \frac{1}{0.779696 * S}$$

Donde:

$S$  = Desviación estándar de la muestra

$\bar{X}$  = Media de la muestra

***Medidas de Bondad de Ajuste de la Función de Distribución de Probabilidad.***

Se entiende por bondad de ajuste, la asimilación de datos observados de una variable, a una función matemática previamente establecida y reconocida. A través de ésta es posible interpolar y extrapolar información, así como predecir el comportamiento de la variable en estudio (Pizarro y Novoa, 1986).

Una vez ajustados los datos a la función de Gumbel, se aplicaron dos pruebas de bondad de ajuste, a saber, el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) y el Test de Kolmogorov-Smirnov.

**(a) Coeficiente de Determinación  $R^2$ .**

El coeficiente de Determinación representa el porcentaje de variación de los datos reales que es explicado por el modelo seleccionado, y se encuentra definido por la siguiente expresión:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Fn(X)i - F(X)i)^2}{\sum (Fn(X)i - \bar{Fn}(X))^2}$$

Donde:

$Fn(X)i$  = Frecuencia observada Acumulada

$F(X)i$  = Frecuencia teórica Acumulada

$\bar{Fn}(X)$  = Media de las Frecuencias observadas Acumuladas

**(b) Test de Kolmogorov-Smirnov.**

Esta prueba de bondad de ajuste compara la frecuencia observada acumulada, con la frecuencia teórica acumulada y determina el punto en el que estas dos distribuciones muestran la mayor divergencia, es decir, mide la desviación máxima de ambas frecuencias en la distribución.

De esta definición se desprende que es necesario determinar tanto la frecuencia observada acumulada, como la frecuencia teórica acumulada. En el primer caso, para obtener la frecuencia observada acumulada, se ordenan los datos de menor a mayor y se aplica la siguiente expresión:

$$F_n(X) = \frac{n}{N+1}$$

Donde:

$F_n(X)$  = Frecuencia observada acumulada.

$n$  = Número total de orden.

$N$  = Número total de datos.

Por otro lado, la frecuencia teórica acumulada se determina a través de la función de Gumbel.

$$F(X) = e^{-e^{-\sigma(x-\mu)}}$$

Cuando han sido obtenidas ambas frecuencias, se selecciona el supremo de las diferencias entre ambas, en la  $i$ -ésima posición de orden, que se denomina  $D$ .

Donde:

$$Dc = \text{Sup} | Fn(X)i - F(X)i |$$

Una vez obtenido el valor de  $Dc$ , se compara con el valor de  $Dt$  que aparece en la tabla de los valores de  $D$  teóricos (con un tamaño de muestra  $n$  y un 95% de confianza). Luego se decide si el ajuste es o no adecuado, considerando las siguientes afirmaciones:

- Si el valor  $D < Dt$ , entonces se acepta  $H_0$  ( $H_0$ : El ajuste es adecuado)
- Si el valor  $D > Dt$ , entonces se rechaza  $H_0$  ( $H_a$ : El ajuste no es adecuado).

### **5.1.6. Determinación de las Curvas IDF para Distintos Períodos de Retorno.**

Luego del ajuste de los datos a la función de distribución de probabilidad de Gumbel, se graficó la intensidad de precipitación y la duración de la misma, para cada uno de los períodos de retorno determinados y para cada una de las estaciones pluviográficas. Los períodos de retorno a utilizar son:  $T = 5$ ,  $T = 10$ ,  $T = 20$ ,  $T = 30$ ,  $T = 50$ ,  $T = 75$  y  $T = 100$  años.

Las curvas resultantes corresponden a las curvas IDF, que se asocian a cada uno de los períodos de retorno asignados. Además, se construirán funciones matemáticas que representen a dichas curvas y por ende a la intensidad, la duración y el período de retorno.

### **5.1.7. Análisis Estadístico.**

Con el objetivo de obtener una función matemática que represente la relación entre la intensidad, la duración y la frecuencia de las precipitaciones, en cada una de las estaciones incluidas en este estudio, se procedió a analizar el comportamiento de dichas variables.

Para generar esta relación entre las variables en estudio, se utilizó la ecuación recomendada por Aparicio (1997), utilizada por Abarza (2001) y Román (2003) para representar las curvas IDF de las regiones del Maule y Metropolitana, respectivamente. Dicha relación entre las variables se expresa de la siguiente forma:

$$I = \frac{kT^m}{D^n}$$

Donde:

$I$  = Intensidad de precipitación, en mm/h.

$T$  = Período de retorno, en años.

$D$  = Duración de la precipitación, en minutos.

$k, m, n$  = Constantes obtenidas en un análisis de regresión lineal múltiple.

Luego, para obtener una expresión con la forma de un modelo de regresión lineal múltiple, se aplicaron logaritmos a la ecuación recomendada por Aparicio (1997), quedando de la siguiente manera:

$$\log I = \log k + m \log T - n \log d$$

O bien :

$$y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2$$

Donde:

$$y = \log I \qquad a_0 = \log k$$

$$X_1 = \log T \qquad a_1 = m$$

$$X_2 = \log d \qquad a_2 = -n$$

#### **5.1.7.1. Análisis de Regresión.**

Según Gujarati (2004), si el único objetivo de una investigación es la estimación puntual de los parámetros de regresión, será suficiente desarrollar el método de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO), el cual no hace supuestos sobre la distribución de los residuos. Por otro lado, si el objetivo no es sólo la estimación sino además la inferencia, entonces se debe determinar si los residuos siguen alguna distribución de probabilidad.

A pesar de lo señalado en el párrafo anterior, en este estudio se analizaron igualmente los supuestos de Normalidad, Homocedasticidad y no-Autocorrelación, ya que esta metodología ha sido utilizada en investigaciones anteriores relativas al tema y dichos análisis pueden constituir parte importante de los resultados obtenidos. Por otra parte, como medidas de bondad de ajuste se utilizó el Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la prueba U de Mann-Whitney.

***Supuestos de Regresión.*****(a) Supuesto de Normalidad.**

La verificación del supuesto de normalidad resulta esencial para poder aplicar muchos de los procedimientos estadísticos que habitualmente se manejan, y decidir si es razonable o no el considerar que los datos proceden de una distribución normal. Para determinar si se cumple o no el supuesto de Normalidad, se aplica el test de Kolmogorov-Smirnov y el gráfico de Histograma de Frecuencias.

**(i) Test de Kolmogorov-Smirnov.**

El test de Kolmogorov-Smirnov es una prueba de normalidad que compara la frecuencia observada acumulada, con la frecuencia teórica acumulada y determina el punto en el que estas dos distribuciones muestran la mayor divergencia, es decir, mide la desviación máxima de ambas frecuencias en la distribución.

**(ii) Histograma de Frecuencias.**

El histograma de frecuencias constituye una forma clásica para verificar la normalidad de los datos, en cuyo caso el histograma debe alcanzar su máximo en la mediana muestral y, después, decrece a ambos lados de este punto de manera simétrica en forma de campana (Ross, 2000).

Como habitualmente los histogramas no son perfectamente simétricos, es posible aceptar pequeñas desviaciones, sin que ello signifique falta de normalidad. En la Figura N° 3 se aprecia el histograma para un conjunto de datos normales.

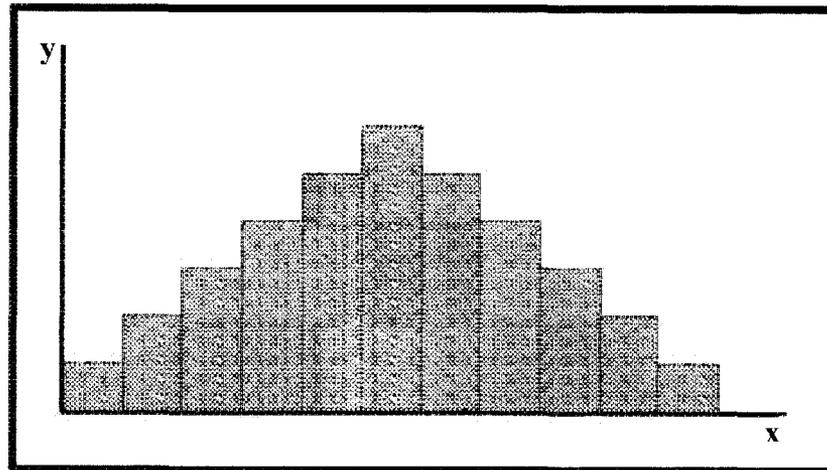


Figura N° 3. Histograma de frecuencias con distribución normal.

#### (b) Supuesto de Homocedasticidad.

El supuesto de homocedasticidad es uno de los supuestos más importantes del modelo clásico de regresión lineal y consiste en que las perturbaciones tengan la misma varianza, es decir, sean homocedásticas (Gujarati, 2003). Para probar que este supuesto se cumple, se usan test estadísticos que detecten si las perturbaciones de la función de regresión lineal presentan distinta varianza, es decir, se busca la presencia de heterocedasticidad. Para detectar esta condición se utilizó el test de Goldfeld-Quandt y el gráfico de residuos.

##### (i) Test de Goldfeld-Quandt.

El test de Goldfeld-Quandt se utiliza para detectar la heterocedasticidad de las varianzas. Esta prueba asume que las observaciones se pueden dividir en dos grupos de manera tal que, bajo la hipótesis de que existe homocedasticidad de los datos, las variaciones de los residuos debieran ser iguales en ambos grupos. Por otro lado, si las variaciones de los residuos se diferenciaban sistemáticamente, existe evidencia de heterocedasticidad (Greene, 2000).

El test de Goldfeld-Quant consiste en 7 pasos detallados en el Anexo I (Gujarati, 1992, citado por Abarza, 2001).

### (ii) Gráfico de Residuos.

Según Gujarati (2003), al graficar los residuos elevados al cuadrado, versus los  $\hat{y}$ , es posible averiguar si el valor medio estimado de  $y$  se encuentra relacionado sistemáticamente con el residuo al cuadrado. En la Figura N° 4 se observan cuatro gráficos que muestran la existencia de un patrón sistemático entre las dos variables, ya sea por relación lineal o cuadrática.

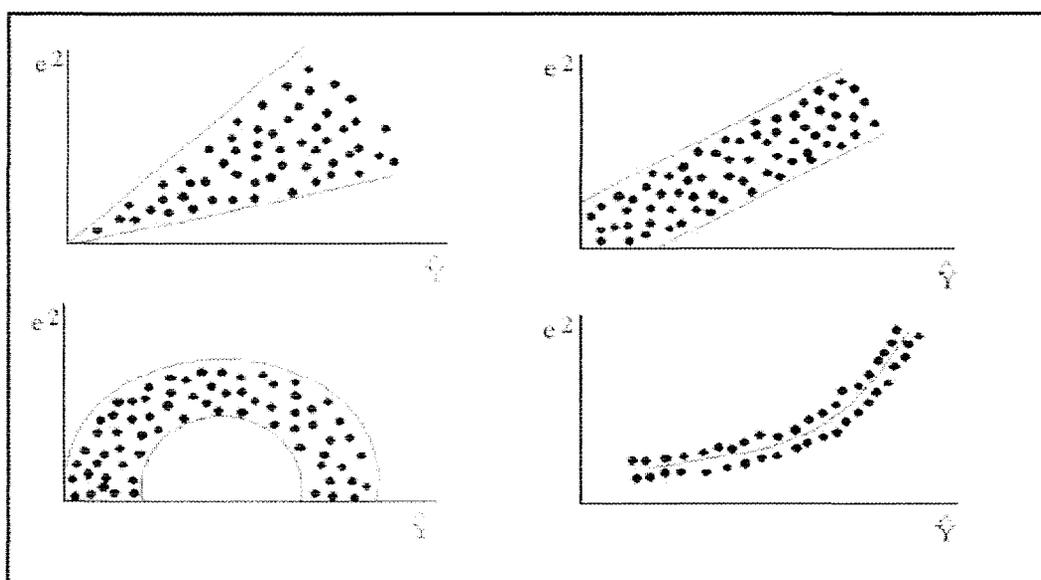


Figura N° 4. Gráficos de dispersión de los residuos con presencia de heterocedasticidad.

### (c) Supuesto de No-Autocorrelación.

La autocorrelación se produce cuando los residuos correspondientes a distintas observaciones muestrales se encuentran correlacionados, lo que actúa en contra de otro importante supuesto del modelo de regresión, la no-autocorrelación (Novales, 1997). Para verificar la ausencia de autocorrelación, se utilizó el test de Durbin-Watson y el análisis gráfico de los residuos v/s el tiempo.

**(i) Test  $d$  de Durbin-Watson.**

El test de Durbin-Watson es la prueba más conocida para detectar correlación serial, la cual se basa en la razón entre las sumas de las diferencias al cuadrado, de residuos sucesivos (Gujarati, 2003). El mismo autor señala que una gran ventaja de esta prueba es que está basada en los residuos estimados, que se calculan de manera rutinaria en cualquier análisis de regresión.

El valor  $d$  de este estadístico, fue obtenido automáticamente utilizando el programa Statgraphics Plus V.1.4. En base a este valor y a las reglas de decisión de este método, que se detallan en el Anexo II, es posible determinar la ausencia de autocorrelación. En caso de existir correlación serial de los datos, se aplica un procedimiento iterativo que se detalla en el Anexo III y que tiene por objetivo eliminar la autocorrelación entre los residuos.

**(ii) Gráfico de Residuos v/s Tiempo.**

Esta prueba gráfica se basa en el análisis de una serie de tiempo por medio de una gráfica entre los residuos obtenidos del ajuste de un modelo y el tiempo. En la Figura N° 5, se observa que existe un intervalo de confianza, representado por una línea punteada, donde el número de frecuencias de los residuos está dado por “ $T$ ” intervalos ( $I = 24$ ). La existencia de una o más frecuencias fuera del intervalo, indica la presencia de autocorrelación; al contrario, si ninguna de las frecuencias aparece fuera del intervalo, significa que no existe autocorrelación serial en el modelo (Jordán 2002).

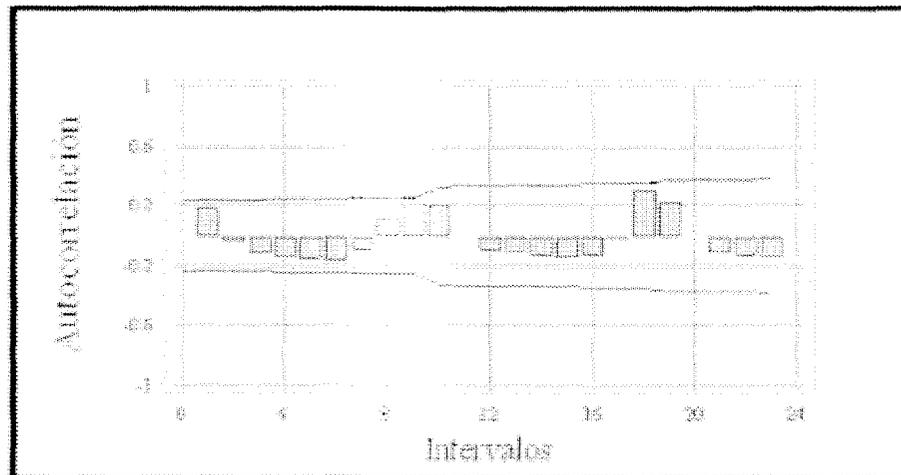


Figura N° 5. Gráfico que indica ausencia de autocorrelación.

#### 5.1.7.2. Medidas de Bondad de Ajuste del Modelo.

##### (a) Coeficiente de Determinación $R^2$ .

Este coeficiente entrega un valor que representa el porcentaje de variación de los datos reales que es explicado por el modelo seleccionado. El valor del coeficiente de determinación fue obtenido del programa estadístico Statgraphics Plus V. 1. 4.

##### (b) Prueba U de Mann-Whitney.

El objetivo de la prueba U de Mann-Whitney, es determinar si dos muestras independientes provienen o no de la misma población. Este test forma parte del conjunto de pruebas no paramétricas, por lo que no requiere de los supuestos de normalidad e igualdad de varianzas (Mason y Lind, 1995). De hecho, esta prueba es uno de los procedimientos más utilizados para probar que dos poblaciones tienen la misma distribución, y constituye el equivalente no paramétrico de la prueba  $t$  de Student para dos muestras.

Según Canavos (1987), la prueba U de Mann-Whitney se basa en una combinación de las  $n_a$  y  $n_b$  observaciones, para formar un solo conjunto de  $n_a + n_b$  observaciones ordenadas en orden creciente de magnitud. Entonces, se asigna un rango a cada observación en la secuencia ordenada, que comienza con un rango 1 y termina con un rango  $n_a + n_b$ . Si las muestras aleatorias provienen de poblaciones que tienen la misma distribución, se espera que los rangos se encuentren lo suficientemente dispersos, cuando se observa en qué muestra se encuentran las observaciones. De otra forma, debe esperarse que los rangos de las observaciones en cada muestra se encuentren muy agrupados en los extremos. En esencia, la estadística de Mann-Whitney determina cuándo un agregado de rangos observados es suficiente para concluir que las dos muestras aleatorias provienen de poblaciones cuyas distribuciones difieren en la tendencia central.

La prueba U de Mann-Whitney, presenta 2 situaciones; una para muestras pequeñas ( $n \leq 10$ ) y otra para muestras grandes ( $n > 10$ ). En este estudio se utilizará el segundo procedimiento ( $n > 10$ ), que será explicado con mayor detalle en el Apéndice IV.

Según Mendenhall y Sincich (1997), citado por Román (2003), la prueba U de Mann-Whitney se define como:

$$UA = n_a \times n_b + n_a \times \frac{(n_a + 1)}{2} - Ra$$

$$UB = n_a \times n_b + n_b \times \frac{(n_b + 1)}{2} - Rb$$

Donde:

$n_a$  = Número de observaciones en la muestra A.

$n_b$  = Número de observaciones en la muestra B.

$Ra$  = Suma de los rangos para la muestra A.

$Rb$  = Suma de los rangos para la muestra B.

Como se señaló anteriormente, la prueba U de Mann-Whitney busca determinar si dos poblaciones presentan o no la misma distribución, para lo cual es necesario establecer las siguientes hipótesis:

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** Las distribuciones de frecuencias relativas de las poblaciones A y B son idénticas.
- **Hipótesis alternativa ( $H_a$ ):** Las distribuciones de frecuencias relativas de las poblaciones están desfasadas con respecto a sus ubicaciones relativas.

Luego, para tomar una decisión se considera que para una prueba de dos colas y un valor dado de  $\alpha$ , se rechaza  $H_0$  si  $U \leq U_0$ , donde  $P(U \leq U_0) = \alpha/2$ , considerando que el valor U es el valor más pequeño entre  $U_A$  y  $U_B$ .

#### **5.1.8. Definición de las Tablas de Uso Práctico.**

En esta etapa se construyeron, para cada una de las 7 estaciones pluviográficas, las tablas de uso práctico, que se basan en la relación que existe entre la intensidad calculada para cada duración ( 1, 2, ..., 24, 48 horas) con la intensidad calculada de 24 horas, y ello, para cada período de retorno.

La construcción de las Tablas de Uso Práctico permite la extrapolación a zonas sin datos de precipitación horaria, es decir, a estaciones que no poseen pluviógrafo, siendo útiles para estaciones pluviométricas donde se registran las precipitaciones cada 24 horas. Dichas tablas, una para cada estación, contienen los valores del parámetro k, que relaciona las intensidades horarias con respecto a las intensidades en 24 horas (Abarza, 2001).

El parámetro  $k$  fue determinado para cada duración y período de retorno, en cada una de las 7 estaciones en estudio, y se define por la siguiente expresión:

$$K = \frac{I_d}{I_{24}}$$

Donde:

$I_d$  = Intensidad de precipitación horaria.

$I_{24}$  = Intensidad de precipitación para una duración de 24 horas.

#### **5.1.9. Comparación de Curvas IDF.**

Como a la fecha de inicio de este estudio, se contaba con las expresiones gráficas y matemáticas de las curvas IDF en las regiones Metropolitana y del Maule, se decidió establecer una comparación entre los valores obtenidos por esta investigación y los obtenidos en esas regiones.

Para lograr este objetivo, se realizó un análisis gráfico comparativo en el que se consideraron los valores de intensidades máximas, obtenidos directamente de las bandas de pluviógrafo. La información seleccionada en cada una de las estaciones, se ordenó cuidadosamente para establecer comparaciones entre los eventos máximos de precipitación; de este modo fue posible analizar la distribución latitudinal y longitudinal de las precipitaciones.

#### **5.1.10. Presentación de Resultados.**

Se presentarán las curvas IDF generadas para cada estación pluviográfica, así como también los valores de la función de distribución de probabilidad de valor extremo asociada a cada una de las curvas, junto con las tablas de uso práctico obtenidas para cada estación, con sus respectivos parámetros  $k$ .

Además, se mostrarán las funciones matemáticas que representen las precipitaciones de cada estación en intensidad, duración y período de retorno, cada una con su correspondiente análisis estadístico, considerando supuestos de regresión y medidas de bondad de ajuste.

#### **5.1.11. Análisis y Discusión de los Resultados.**

Una vez generadas las curvas IDF y obtenida la información relacionada a ellas (tablas de uso práctico y funciones matemáticas), será posible discutir y concluir con respecto a los valores obtenidos, además de comparar y analizar los patrones de comportamiento de las precipitaciones en las regiones en estudio.

#### **5.1.12. Conclusiones y Recomendaciones.**

A partir de los valores y de las curvas obtenidas, se determinarán las principales conclusiones y recomendaciones del estudio realizado. Además, se considerará la evaluación de la metodología utilizada, con el objetivo de determinar si es la adecuada en este tipo de investigación.

### **5.2. Materiales.**

Para cumplir con el desarrollo de este estudio, se utilizaron los siguientes materiales:

- Las bandas pluviográficas de las siete estaciones incluidas en este estudio, para el máximo de años disponibles en cada estación. Este material fue puesto a disposición por la Dirección General de Aguas (DGA).
- Cartografía de la zona (regiones de Valparaíso y de O'Higgins).
- Equipos de computación (PC e impresoras).
- Programas computacionales como Microsoft Excel 2000, Microsoft Word 2000 y Statgraphics Plus V.1.4.

## **6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

El registro pluviográfico de las regiones de Valparaíso y de O'Higgins, contenido en las bandas pluviográficas de diez estaciones de medición dispuestas en la zona, fue analizado acuciosamente con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible, indispensable para poder llevar a cabo esta investigación.

Luego de un primer muestreo, con el fin de determinar la cantidad y calidad de los registros a disposición, se determinó que el estudio abarcaría 4 de las 5 estaciones pluviográficas de la Región de Valparaíso y solo 3 de las 5 estaciones pluviográficas de la Región de O'Higgins, debido a la escasez y mal estado de los registros pluviográficos en las 3 estaciones eliminadas. En este mismo muestreo se determinó que se usaría la mayor cantidad posible de información, esto es, se trató de utilizar todos los años disponibles, resultando de esto una gran variación, por cuanto cada estación contaba con diferentes períodos de registro. Además a esta variación se sumó el hecho de que en cada estación, los registros de algunos años estaban en muy malas condiciones, por lo que debieron ser descartados del estudio.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos en cada una de las etapas de la investigación, cuyo objetivo común es la construcción de las curvas IDF para las regiones de Valparaíso y del Libertador Bernardo O'Higgins.

### 6.1. Alturas Máximas de Precipitación.

Se analizaron las bandas pluviográficas de cada estación y para ambas regiones, con el propósito de obtener las alturas máximas de precipitación para cada duración, información que se presenta en las tablas N° 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

#### Región de Valparaíso.

**Tabla N° 2.** Alturas máximas de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm). Estación Hacienda Pedernal.

Año	Duraciones (h)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2001	11.3	25.4	43.6	60.4	68.4	84.8	111.0	113.0
2000	8.2	15.8	25.5	35.5	44.6	53.2	60.1	63.2
1993	6.7	12.8	16.5	23.1	28.7	37.1	43.1	55.7
1992	10.2	15.5	26.5	34.5	38.2	46.5	58.7	69.9
1987	10.6	16.2	27.2	38.7	45.6	66.1	102.4	144.3
1986	8.6	16.6	27.8	31.9	40.5	51.7	80.7	85.5
1984	12.3	20.3	33.2	45.3	52.5	72.1	127.2	194.4
1983	17.8	30.4	50.2	61.3	70.3	78.3	109.2	123.8
1982	10.3	16.2	24.3	32.1	40.2	50.2	63.8	74.2
1978	7.6	12.8	20.7	24.7	28.1	32.2	48.4	54.8

Fuente: Elaboración propia, basada en la información pluviográfica facilitada por la Dirección General de Aguas (DGA).

**Tabla N° 3.** Alturas máximas de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm). Estación Quillota.

Año	Duraciones (h)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2002	17.9	34.5	55.2	71.7	83.2	93.7	97.4	100.2
2000	18.6	32.4	55.5	72.6	79.1	85.5	93.6	140.8
1999	9.8	15.3	24.1	27.3	30.2	32.6	36.8	41.4
1991	5.8	10.2	11.2	11.7	14.2	19.2	24.9	36.7
1990	8.6	15.4	23.1	31.3	32.3	32.3	32.7	33.2
1988	9.8	15.8	18.8	25.3	28.4	30.3	39.0	42.9
1985	9.2	10.6	13.1	14.2	16.8	22.8	31.8	32.2
1984	10.5	20.7	35.4	38.8	43.6	57.1	86.1	126.5
1983	7.9	12.4	21.5	25.7	29.4	35.7	54.8	60.3
1982	7.8	15.3	23.7	29.9	38.9	52.4	73.6	74.6
1980	8.3	15.4	19.3	22.1	27.6	32.3	34.5	34.9
1979	9.2	16.2	22.3	32.4	37.9	43.1	54.3	54.5

Fuente: Elaboración propia, basada en la información pluviográfica facilitada por la Dirección General de Aguas (DGA).

**Tabla N° 4.** Alturas máximas de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm). Estación Embalse Lliu-Lliu.

Año	Duraciones (h)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2002	23.2	45.6	64.5	88.7	108.7	124.4	166.8	186.6
2001	19.2	25.9	29.3	35.2	46.9	65.5	97.4	114.2
2000	21.2	36.7	72.3	91.8	120.1	141.3	153.5	300.7
1997	20.9	37.6	56.8	75.2	94.1	118.6	134.8	164.9
1994	11.2	18.8	28.2	38.4	45.1	65.4	86.4	129.7
1993	10.8	16.6	29.9	36.4	39.4	43.7	48.3	50.5
1992	20.2	24.3	34.6	50.5	53.7	78.6	105.5	118.6
1988	13.1	16.1	22.9	30.5	44.7	52.6	55.5	56.2
1984	23.4	32.3	64.2	87.3	91.5	134.6	211.7	272.5
1983	13.4	19.6	34.6	38.8	44.2	52.8	79.8	100.3
1982	17.2	33.2	58.7	76.2	86.6	113.2	166.3	192.8
1981	11.3	16.4	28.6	39.8	48.4	63.7	101.3	120.2
1980	15.1	23.7	29.2	39.6	47.3	65.2	80.1	94.1
1979	9.8	13.9	26.7	38.2	48.7	70.7	94.1	103.9

Fuente: Elaboración propia, basada en la información pluviográfica facilitada por la Dirección General de Aguas (DGA).

**Tabla N° 5.** Alturas máximas de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm). Estación Lago Peñuelas.

Año	Duraciones (h)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2001	21.6	38.2	60.1	78.9	90.2	119.2	196.8	227.2
2000	23.4	36.8	65.1	89.2	100.5	114.8	204.3	317.5
1999	13.9	26.2	26.5	36.6	41.2	57.3	65.9	95.2
1997	29.4	46.3	62.3	83.9	96.7	119.1	150.7	186.9
1995	15.8	27.7	51.3	59.3	68.2	93.7	112.2	127.9
1993	12.9	23.9	34.1	42.1	52.3	73.6	103.3	111.9
1990	8.5	16.2	28.6	33.1	34.3	42.8	70.9	75.4
1991	10.1	16.3	19.1	25.0	30.7	44.5	80.0	114.4
1989	16.1	25.1	31.9	41.7	44.0	51.7	77.4	92.4
1988	12.1	19.8	30.8	39.8	44.7	53.7	64.0	97.2
1987	13.1	23.5	28.9	42.4	51.7	73.3	112.3	168.2
1985	9.9	17.8	23.0	37.6	41.0	47.2	56.2	60.1
1984	16.7	28.6	54.3	77.8	99.4	146.7	229.7	270.7
1983	19.4	35.6	42.3	51.3	63.4	65.8	85.7	93.1
1982	11.9	19.6	32.6	48.0	58.6	62.1	93.8	118.6
1981	30.3	58.3	115.7	140.3	167.4	206.2	244.8	245.0
1979	22.3	42.2	76.8	108.2	127.6	164.6	211.1	225.7
1978	22.3	36.2	47.6	70.5	80.2	100.1	100.8	151.6
1977	25.3	46.8	65.9	95.5	103.1	116.8	165.8	298.2
1976	16.3	25.3	38.4	42.6	46.8	57.9	61.9	70.9
1974	20.4	38.3	41.5	58.2	62.9	74.4	87.8	118.3

Fuente: Elaboración propia, basada en la información pluviográfica facilitada por la Dirección General de Aguas (DGA).

## Región del Libertador Bdo. O'Higgins.

Tabla N° 6. Alturas máximas de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm). Estación Rengo

Año	Duraciones (h)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2002	9.2	15.1	27.0	37.0	48.8	65.5	80.2	122.2
2001	21.5	28.6	42.2	48.1	61.2	75.9	93.7	96.1
2000	14.3	16.0	21.4	28.4	34.4	50.5	75.3	114.8
1997	13.3	19.2	27.1	40.7	41.7	52.2	91.2	161.8
1995	9.7	16.2	23.7	29.1	36.8	45.9	53.5	53.5
1994	9.8	15.1	28.9	42.1	52.4	67.9	80.9	82.3
1993	12.2	14.5	20.9	30.5	38.4	47.2	45.9	56.4
1991	10.3	14.3	20.6	29.3	37.8	46.1	50.8	69.3
1988	8.2	10.8	12.4	15.1	17.2	19.2	36.1	38.4
1987	9.1	15.4	26.3	33.6	42.7	56.4	85.2	90.1
1986	13.8	25.8	39.6	54.3	59.1	62.1	112.0	125.3
1984	10.1	13.2	20.1	30.0	34.1	47.9	69.9	87.7
1983	7.7	13.5	24.8	33.6	43.7	60.9	68.4	69.3
1982	9.4	14.9	22.1	29.3	37.9	52.3	94.5	139.2
1981	13.7	17.2	22.6	31.2	35.0	37.4	44.2	44.7
1980	8.6	15.7	24.3	28.8	33.3	49.8	84.1	117.4
1979	7.8	13.2	19.0	25.5	33.7	43.8	78.4	84.6
1978	16.6	22.3	30.8	40.5	45.6	60.8	69.3	125.7
1977	14.8	19.6	26.5	33.9	38.2	46.3	49.7	84.3
1976	9.6	17.2	28.9	40.5	51.1	72.3	93.7	96.6
1975	11.4	14.4	25.1	31.8	33.7	42.9	51.4	92.1
1974	10.8	20.3	32.7	37.1	44.7	50.8	70.9	75.7
1973	11.9	12.2	24.1	32.6	33.6	38.3	65.1	84.3
1972	9.1	13.1	22.4	29.7	35.8	44.5	66.3	95.2
1971	14.3	21.2	30.1	39.3	44.5	55.3	75.8	98.8
1970	8.7	15.2	27.6	29.4	30.9	38.5	56.9	83.8

Fuente: Elaboración propia, basada en la información pluviográfica facilitada por la Dirección General de Aguas (DGA).

**Tabla N° 7.** Alturas máximas de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm). Estación Central las Nieves

Año	Duraciones (h)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2002	9.6	16.3	25.8	33.0	43.6	57.0	73.2	95.8
2001	12.3	20.3	38.3	51.0	59.3	81.8	128.4	153.5
2000	13.8	19.5	32.1	47.6	57.3	78.3	135.7	217.9
1997	9.7	16.3	24.8	25.2	27.6	28.1	48.8	66.5
1995	11.1	20.7	34.6	46.1	52.5	76.7	88.9	89.2
1994	10.1	19.6	31.8	45.5	58.3	81.6	96.8	116.8
1993	14.5	22.7	36.3	53.9	58.7	65.4	96.4	99.1
1992	11.5	18.5	25.6	37.3	46.0	62.0	105.2	146.6
1991	10.4	16.8	28.4	38.2	50.1	54.9	77.7	116.7
1990	6.1	11.7	20.4	24.5	27.6	30.6	42.3	53.5
1989	15.6	24.4	45.6	54.4	67.1	86.6	131.9	191.1
1988	11.6	14.9	21.6	29.3	34.7	51.4	63.6	85.9
1987	10.2	18.3	30.4	38.6	49.6	62.5	104.1	173.3
1986	13.1	25.7	43.2	59.0	72.2	80.2	142.9	162.0
1985	13.2	15.8	29.8	38.6	47.6	56.0	70.9	101.3
1984	10.2	17.3	29.1	36.7	44.7	63.8	100.7	130.5
1983	9.8	13.8	25.4	30.6	33.3	40.4	53.5	72.3
1982	15.4	24.5	33.1	40.7	50.2	71.7	126.7	190.1
1981	16.2	25.9	35.7	44.8	51.3	66.8	84.9	85.0
1980	15.1	20.0	31.5	38.7	48.8	64.9	113.9	157.8
1979	9.8	15.0	27.9	34.0	39.5	42.2	69.6	86.3
1978	12.4	24.4	36.8	43.8	48.0	68.8	90.1	137.9
1977	12.3	20.9	31.3	40.5	46.5	53.3	62.2	122.4
1976	14.3	26.4	52.3	70.0	90.0	124.7	178.6	201.2
1973	13.2	17.0	33.5	45.0	50.9	51.2	52.4	61.7
1972	10.2	11.2	20.8	21.3	21.5	27.7	43.3	52.6
1971	12.1	16.7	30.4	35.5	41.6	47.5	50.5	51.0

Fuente: Elaboración propia, basada en la información pluviográfica facilitada por la Dirección General de Aguas (DGA).

**Tabla N° 8.** Alturas máximas de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm). Estación Convento viejo.

Año	Duraciones (h)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2000	19.3	21.1	30.2	44.5	44.8	61.1	72.6	143.1
1997	12.9	23.9	36.1	46.2	51.1	66.1	80.4	130.8
1996	7.9	14.6	20.8	26.7	29.9	36.6	54.2	74.1
1995	10.2	18.2	26.1	35.8	37.2	49.2	73.1	79.1
1993	12.5	18.8	31.6	34.4	40.8	43.3	67.1	71.3
1992	15.2	22.6	31.7	39.4	44.9	58.4	93.3	125.5
1990	17.6	27.9	37.7	45.3	52.0	54.5	62.8	69.2
1988	15.8	15.6	26.9	32.1	37.3	38.3	43.4	43.6
1987	10.6	15.9	19.9	25.1	30.6	40.4	55.7	66.2
1985	8.4	14.3	24.7	31.6	36.5	41.1	45.7	55.9
1984	15.9	16.7	22.8	30.4	38.2	52.7	88.3	155.1
1983	11.4	17.2	30.3	43.1	54.8	68.3	94.1	95.1
1981	10.3	14.2	21.6	30.1	33.7	37.9	42.1	52.1
1980	9.6	16.1	29.1	38.6	44.1	52.1	91.1	116.6
1979	10.1	22.4	36.5	47.6	51.6	74.8	124.8	125.6
1978	17.8	23.1	31.2	40.1	48.7	62.4	73.7	112.4
1977	13.3	18.1	32.6	42.3	52.3	66.1	85.5	130.7
1976	7.8	12.8	21.8	31.2	40.9	48.0	62.9	64.5
1975	9.6	14.8	24.5	28.8	36.4	48.1	84.7	99.3
1974	16.2	22.6	38.8	45.4	59.8	75.7	96.1	109.6
1972	10.4	20.4	31.8	44.7	52.1	60.2	71.8	101.4

Fuente: Elaboración propia, basada en la información pluviográfica facilitada por la Dirección General de Aguas (DGA).

## 6.2. Obtención de las Intensidades Máximas de Precipitación en mm/h.

Una vez obtenidas las alturas máximas de precipitación para cada duración, se realizó el cálculo de los valores de intensidad de precipitación, que se encuentran disponibles en las tablas N° 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15.

### Región de Valparaíso.

**Tabla N° 9.** Valores de intensidad máxima de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm/h). Estación Hacienda Pedernal.

<b>Año</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>24</b>	<b>48</b>
<b>2001</b>	11.30	12.70	10.90	10.07	8.55	7.07	4.63	2.35
<b>2000</b>	8.20	7.90	6.38	5.92	5.58	4.43	2.50	1.32
<b>1993</b>	6.70	6.40	4.13	3.85	3.59	3.09	1.80	1.16
<b>1992</b>	10.20	7.75	6.63	5.75	4.78	3.88	2.45	1.46
<b>1987</b>	10.60	8.10	6.80	6.45	5.70	5.51	4.27	3.01
<b>1986</b>	8.60	8.30	6.95	5.32	5.06	4.31	3.36	1.78
<b>1984</b>	12.30	10.15	8.30	7.55	6.56	6.01	5.30	4.05
<b>1983</b>	17.80	15.20	12.55	10.22	8.79	6.53	4.55	2.58
<b>1982</b>	10.30	8.10	6.08	5.35	5.03	4.18	2.66	1.55
<b>1978</b>	7.60	6.40	5.18	4.12	3.51	2.68	2.02	1.14
<b>Media</b>	10.36	9.1	7.39	6.46	5.715	4.769	3.354	2.04
<b>Desv. Stand.</b>	3.14	2.82	2.56	2.21	1.81	1.46	1.24	0.95

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 10.** Valores de intensidad máxima de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm/h). Estación Quillota.

<b>Año</b>	<b>Duraciones (hr)</b>							
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>24</b>	<b>48</b>
<b>2002</b>	17.90	17.25	13.80	11.95	10.40	7.81	4.06	2.09
<b>2000</b>	18.60	16.20	13.88	12.10	9.89	7.13	3.90	2.93
<b>1999</b>	9.80	7.65	6.03	4.55	3.78	2.72	1.53	0.86
<b>1991</b>	5.80	5.10	2.80	1.95	1.78	1.60	1.04	0.76
<b>1990</b>	8.60	7.70	5.78	5.22	4.04	2.69	1.36	0.69
<b>1988</b>	9.80	7.90	4.70	4.22	3.55	2.53	1.63	0.89
<b>1985</b>	9.20	5.30	3.28	2.37	2.10	1.90	1.33	0.67
<b>1984</b>	10.50	10.35	8.85	6.47	5.45	4.76	3.59	2.64
<b>1983</b>	7.90	6.20	5.38	4.28	3.68	2.98	2.28	1.26
<b>1982</b>	7.80	7.65	5.93	4.98	4.86	4.37	3.07	1.55
<b>1980</b>	8.30	7.70	4.83	3.68	3.45	2.69	1.44	0.73
<b>1979</b>	9.20	8.10	5.58	5.40	4.74	3.59	2.26	1.14
<b>Media</b>	10.28	8.93	6.74	5.60	4.81	3.73	2.29	1.35
<b>Desv. Stand.</b>	3.92	3.90	3.64	3.25	2.70	1.97	1.09	0.79

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 11.** Valores de intensidad máxima de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm/h). Estación Embalse Lliu-Lliu.

Año	Duraciones (hr)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2002	23.20	22.80	16.13	14.78	13.59	10.37	6.95	3.89
2001	19.20	12.95	7.33	5.87	5.86	5.46	4.06	2.38
2000	21.20	18.35	18.08	15.30	15.01	11.78	6.40	6.26
1997	20.90	18.80	14.20	12.53	11.76	9.88	5.62	3.44
1994	11.20	9.40	7.05	6.40	5.64	5.45	3.60	2.70
1993	10.80	8.30	7.48	6.07	4.93	3.64	2.01	1.05
1992	20.20	12.15	8.65	8.42	6.71	6.55	4.40	2.47
1988	13.10	8.05	5.73	5.08	5.59	4.38	2.31	1.17
1984	23.40	16.15	16.05	14.55	11.44	11.22	8.82	5.68
1983	13.40	9.80	8.65	6.47	5.53	4.40	3.33	2.09
1982	17.20	16.60	14.68	12.70	10.83	9.43	6.93	4.02
1981	11.30	8.20	7.15	6.63	6.05	5.31	4.22	2.50
1980	15.10	11.85	7.30	6.60	5.91	5.43	3.34	1.96
1979	9.80	6.95	6.68	6.37	6.09	5.89	3.92	2.16
<b>Media</b>	16.43	12.88	10.37	9.13	8.21	7.09	4.71	2.98
<b>Desv. Stand.</b>	4.89	4.90	4.36	3.88	3.49	2.81	1.96	1.53

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 12.** Valores de intensidad máxima de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm/h). Estación Lago Peñuelas.

Año	Duraciones (hr)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2001	21.60	19.10	15.03	13.15	11.28	9.93	8.20	4.73
2000	23.40	18.40	16.28	14.87	12.56	9.57	8.51	6.61
1999	13.90	13.10	6.63	6.10	5.15	4.78	2.75	1.98
1997	29.40	23.15	15.58	13.98	12.09	9.93	6.28	3.89
1995	15.80	13.85	12.83	9.88	8.53	7.81	4.68	2.66
1993	12.90	11.95	8.53	7.02	6.54	6.13	4.30	2.33
1990	8.50	8.10	7.15	5.52	4.29	3.57	2.95	1.57
1991	10.10	8.15	4.78	4.17	3.84	3.71	3.33	2.38
1989	16.10	12.55	7.98	6.95	5.50	4.31	3.23	1.93
1988	12.10	9.90	7.70	6.63	5.59	4.48	2.67	2.03
1987	13.10	11.75	7.23	7.07	6.46	6.11	4.68	3.50
1985	9.90	8.90	5.75	6.27	5.13	3.93	2.34	1.25
1984	16.70	14.30	13.58	12.97	12.43	12.23	9.57	5.64
1983	19.40	17.80	10.58	8.55	7.93	5.48	3.57	1.94
1982	11.90	9.80	8.15	8.00	7.33	5.18	3.91	2.47
1981	30.30	29.15	28.93	23.38	20.93	17.18	10.20	5.10
1979	22.30	21.10	19.20	18.03	15.95	13.72	8.80	4.70
1978	22.30	18.10	11.90	11.75	10.03	8.34	4.20	3.16
1977	25.30	23.40	16.48	15.92	12.89	9.73	6.91	6.21
1976	16.30	12.65	9.60	7.10	5.85	4.83	2.58	1.48
1974	20.40	19.15	10.38	9.70	7.86	6.20	3.66	2.46
<b>Media</b>	17.70	15.45	11.63	10.33	8.96	7.48	5.11	3.24
<b>Desv. Stand.</b>	6.28	5.72	5.65	4.87	4.34	3.66	2.55	1.64

Fuente: Elaboración propia.

## Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

Tabla N° 13. Valores de intensidad máxima de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm/h). Estación Rengo.

Año	Duraciones (hr)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2002	9.20	7.55	6.75	6.17	6.10	5.46	3.34	2.55
2001	21.50	14.30	10.55	8.02	7.65	6.33	3.90	2.00
2000	14.30	8.00	5.35	4.73	4.30	4.21	3.14	2.39
1997	13.30	9.60	6.78	6.78	5.21	4.35	3.80	3.37
1995	9.70	8.10	5.93	4.85	4.60	3.83	2.23	1.11
1994	9.80	7.55	7.23	7.02	6.55	5.66	3.37	1.71
1993	12.20	7.25	5.23	5.08	4.80	3.93	1.91	1.18
1991	10.30	7.15	5.15	4.88	4.73	3.84	2.12	1.44
1988	8.20	5.40	3.10	2.52	2.15	1.60	1.50	0.80
1987	9.10	7.70	6.58	5.60	5.34	4.70	3.55	1.88
1986	13.80	12.90	9.90	9.05	7.39	5.18	4.67	2.61
1984	10.10	6.60	5.03	5.00	4.26	3.99	2.91	1.83
1983	7.70	6.75	6.20	5.60	5.46	5.08	2.85	1.44
1982	9.40	7.45	5.53	4.88	4.74	4.36	3.94	2.90
1981	13.70	8.60	5.65	5.20	4.38	3.12	1.84	0.93
1980	8.60	7.85	6.08	4.80	4.16	4.15	3.50	2.45
1979	7.80	6.60	4.75	4.25	4.21	3.65	3.27	1.76
1978	16.60	11.15	7.70	6.75	5.70	5.07	2.89	2.62
1977	14.80	9.80	6.63	5.65	4.78	3.86	2.07	1.76
1976	9.60	8.60	7.23	6.75	6.39	6.03	3.90	2.01
1975	11.40	7.20	6.28	5.30	4.21	3.58	2.14	1.92
1974	10.80	10.15	8.18	6.18	5.59	4.23	2.95	1.58
1973	11.90	6.10	6.03	5.43	4.20	3.19	2.71	1.76
1972	9.10	6.55	5.60	4.95	4.48	3.71	2.76	1.98
1971	14.30	10.60	7.53	6.55	5.56	4.61	3.16	2.06
1970	8.70	7.60	6.90	4.90	3.86	3.21	2.37	1.75
<b>Media</b>	11.38	8.35	6.46	5.65	5.03	4.27	2.95	1.92
<b>Desv. Stand.</b>	3.20	2.09	1.54	1.29	1.16	1.02	0.78	0.60

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 14.** Valores de intensidad máxima de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm/h). Estación Central las Nieves..

Año	Duraciones (hr)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2002	9.60	8.15	6.45	5.50	5.45	4.75	3.05	2.00
2001	12.30	10.15	9.58	8.50	7.41	6.82	5.35	3.20
2000	13.80	9.75	8.03	7.93	7.16	6.53	5.65	4.54
1997	9.70	8.15	6.20	4.20	3.45	2.34	2.03	1.39
1995	11.10	10.35	8.65	7.68	6.56	6.39	3.70	1.86
1994	10.10	9.80	7.95	7.58	7.29	6.80	4.03	2.43
1993	14.50	11.35	9.08	8.98	7.34	5.45	4.02	2.06
1992	11.50	9.25	6.40	6.22	5.75	5.17	4.38	3.05
1991	10.40	8.40	7.10	6.37	6.26	4.58	3.24	2.43
1990	6.10	5.85	5.10	4.08	3.45	2.55	1.76	1.11
1989	15.60	12.20	11.40	9.07	8.39	7.22	5.50	3.98
1988	11.60	7.45	5.40	4.88	4.34	4.28	2.65	1.79
1987	10.20	9.15	7.60	6.43	6.20	5.21	4.34	3.61
1986	13.10	12.85	10.80	9.83	9.03	6.68	5.95	3.38
1985	13.20	7.90	7.45	6.43	5.95	4.67	2.95	2.11
1984	10.20	8.65	7.28	6.12	5.59	5.32	4.20	2.72
1983	9.80	6.90	6.35	5.10	4.16	3.37	2.23	1.51
1982	15.40	12.25	8.28	6.78	6.28	5.98	5.28	3.96
1981	16.20	12.95	8.93	7.47	6.41	5.57	3.54	1.77
1980	15.10	10.00	7.88	6.45	6.10	5.41	4.75	3.29
1979	9.80	7.50	6.98	5.67	4.94	3.52	2.90	1.80
1978	12.40	12.20	9.20	7.30	6.00	5.73	3.75	2.87
1977	12.30	10.45	7.83	6.75	5.81	4.44	2.59	2.55
1976	14.30	13.20	13.08	11.67	11.25	10.39	7.44	4.19
1973	13.20	8.50	8.38	7.50	6.36	4.27	2.18	1.29
1972	10.20	5.60	5.20	3.55	2.69	2.31	1.80	1.10
1971	12.10	8.35	7.60	5.92	5.20	3.96	2.10	1.06
<b>Media</b>	11.99	9.53	7.93	6.81	6.10	5.17	3.75	2.48
<b>Desv. Stand.</b>	2.35	2.14	1.85	1.82	1.78	1.72	1.46	1.02

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 15.** Valores de intensidad máxima de precipitación asociadas a distintas duraciones horarias (mm/h). Estación Convento Viejo.

Año	Duraciones (hr)							
	1	2	4	6	8	12	24	48
2000	19.30	10.55	7.55	7.42	5.60	5.09	3.03	2.98
1997	12.90	11.95	9.03	7.70	6.39	5.51	3.35	2.73
1996	7.90	7.30	5.20	4.45	3.74	3.05	2.26	1.54
1995	10.20	9.10	6.53	5.97	4.65	4.10	3.05	1.65
1993	12.50	9.40	7.90	5.73	5.10	3.61	2.80	1.49
1992	15.20	11.30	7.93	6.57	5.61	4.87	3.89	2.61
1990	17.60	13.95	9.43	7.55	6.50	4.54	2.62	1.44
1988	15.80	7.80	6.73	5.35	4.66	3.19	1.81	0.91
1987	10.60	7.95	4.98	4.18	3.83	3.37	2.32	1.38
1985	8.40	7.15	6.18	5.27	4.56	3.43	1.90	1.16
1984	15.90	8.35	5.70	5.07	4.78	4.39	3.68	3.23
1983	11.40	8.60	7.58	7.18	6.85	5.69	3.92	1.98
1981	10.30	7.10	5.40	5.02	4.21	3.16	1.75	1.09
1980	9.60	8.05	7.28	6.43	5.51	4.34	3.80	2.43
1979	10.10	11.20	9.13	7.93	6.45	6.23	5.20	2.62
1978	17.80	11.55	7.80	6.68	6.09	5.20	3.07	2.34
1977	13.30	9.05	8.15	7.05	6.54	5.51	3.56	2.72
1976	7.80	6.40	5.45	5.20	5.11	4.00	2.62	1.34
1975	9.60	7.40	6.13	4.80	4.55	4.01	3.53	2.07
1974	16.20	11.30	9.70	7.57	7.48	6.31	4.00	2.28
1972	10.40	10.20	7.95	7.45	6.51	5.02	2.99	2.11
<b>Media</b>	12.51	9.32	7.23	6.22	5.46	4.51	3.10	2.00
<b>Desv. Stand.</b>	3.51	2.00	1.44	1.20	1.06	1.01	0.85	0.68

Fuente: Elaboración propia.

### 6.3. Ajuste de los datos a la función de distribución de probabilidad de Gumbel.

Los valores de intensidad máxima de precipitación (mm/h) fueron ajustados a la distribución de probabilidad de Gumbel, obteniéndose los parámetros ( $\mu$  y  $\sigma$ ) de la función para cada estación y duración, información que se entrega en las tablas N° 16 y 17.

#### Región de Valparaíso.

Tabla N° 16. Parámetros de la función de Gumbel para cada estación y duración.

Duración	Estación Hda. Pedernal		Estación Quillota		Estación Emb. Lliu-Lliu		Estación Lago Peñuelas	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
1	8.946	0.408	8.521	0.327	14.227	0.262	14.872	0.204
2	7.829	0.454	7.169	0.329	10.676	0.262	12.870	0.224
4	6.233	0.500	5.094	0.352	8.402	0.294	9.088	0.227
6	5.464	0.580	4.135	0.395	7.381	0.331	8.143	0.264
8	4.901	0.710	3.592	0.474	6.636	0.367	7.006	0.296
12	4.113	0.881	2.842	0.651	5.822	0.457	5.835	0.350
24	2.793	1.032	1.799	1.175	3.825	0.654	3.963	0.503
48	1.612	1.350	0.995	1.623	2.294	0.836	2.503	0.782

Fuente: Elaboración propia.

#### Región del Libertador Bdo. O'Higgins

Tabla N° 17. Parámetros de la función de Gumbel para cada estación y duración.

Duración	Estación Rengo		Estación Central las Nieves		Estación Convento Viejo	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
1	9.940	0.401	10.935	0.546	10.934	0.365
2	7.409	0.614	8.567	0.600	8.415	0.640
4	5.760	0.831	7.100	0.695	6.573	0.888
6	5.071	0.996	5.995	0.705	5.678	1.070
8	4.507	1.102	5.304	0.721	4.986	1.210
12	3.808	1.264	4.398	0.745	4.049	1.267
24	2.604	1.649	3.100	0.882	2.717	1.501
48	1.643	2.123	2.023	1.255	1.701	1.898

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.4. Determinación de las Pruebas de Bondad de Ajuste.

Una vez ajustados los datos a la función de Gumbel, se determinaron las pruebas de bondad de ajuste, utilizándose el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) y el test de Kolmogorov-Smirnov, cuyos resultados se encuentran en las tablas N° 18, 19, 20 y 21.

#### Región de Valparaíso

Tabla N° 18. Valores del Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ), para cada estación y duración.

Duración	Estación Hda. Pedernal	Estación Quillota	Estación Emb. Lliu-Lliu	Estación Lago Peñuelas
1	0.9691	0.865	0.8870	0.9634
2	0.8876	0.8580	0.9365	0.9592
4	0.9373	0.8908	0.8265	0.9811
6	0.9476	0.9197	0.8001	0.9544
8	0.9471	0.9185	0.8066	0.9670
12	0.9299	0.9305	0.8774	0.9565
24	0.8784	0.8957	0.9550	0.9263
48	0.9386	0.9014	0.9590	0.9416

Fuente: Elaboración propia.

#### Región del Libertador Bdo. O'Higgins

Tabla N° 19. Valores del Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ), para cada estación y duración.

Duración	Estación Rengo	Estación Central las Nieves	Estación Convento Viejo
1	0.9704	0.9620	0.9419
2	0.9657	0.9748	0.9577
4	0.9888	0.9842	0.9142
6	0.9636	0.9777	0.8880
8	0.9747	0.9433	0.9325
12	0.9797	0.9670	0.9429
24	0.9349	0.9737	0.9498
48	0.9618	0.9669	0.9162

Fuente: Elaboración propia.

## Región de Valparaíso.

Tabla N° 20. Determinación del nivel de ajuste del test Kolmogorov-Smirnov para cada estación y duración.

Duración	Estación Hda. Pedernal Dt = 0.410		Estación Quillota Dt = 0.375		Estación Emb. Lliu-Lliu Dt = 0.349		Estación Lago Peñuelas Dt = 0.2892	
	Dc	Ajuste	Dc	Ajuste	Dc	Ajuste	Dc	Ajuste
	1	0.095	A	0.117	A	0.166	A	0.094
2	0.190	A	0.213	A	0.121	A	0.127	A
4	0.139	A	0.206	A	0.201	A	0.088	A
6	0.115	A	0.147	A	0.255	A	0.141	A
8	0.112	A	0.118	A	0.228	A	0.092	A
12	0.110	A	0.162	A	0.160	A	0.131	A
24	0.167	A	0.168	A	0.098	A	0.138	A
48	0.118	A	0.154	A	0.109	A	0.141	A

Fuente: Elaboración propia.

Dt: Valor tabulado, del estadístico de Kolmogorov-Smirnov, Dc: Estadístico de Kolmogorov-Smirnov calculado, A: es aceptado el modelo.

## Región del Libertador Bdo. O'Higgins.

Tabla N° 21. Determinación del nivel de ajuste del test Kolmogorov-Smirnov para cada estación y duración.

Duración	Estación Rengo Dt = 0.264		Estación Central las Nieves Dt = 0.258		Estación Convento Viejo Dt = 0.289	
	Dc	Ajuste	Dc	Ajuste	Dc	Ajuste
	1	0.098	A	0.097	A	0.130
2	0.110	A	0.107	A	0.118	A
4	0.048	A	0.069	A	0.177	A
6	0.136	A	0.078	A	0.158	A
8	0.121	A	0.127	A	0.151	A
12	0.079	A	0.105	A	0.117	A
24	0.106	A	0.098	A	0.108	A
48	0.127	A	0.082	A	0.127	A

Fuente: Elaboración propia.

Dt: Valor tabulado del estadístico de Kolmogorov-Smirnov, Dc: Estadístico de Kolmogorov-Smirnov calculado, A: es aceptado el modelo.

### 6.5. Diseño de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para las 7 Estaciones Pluviográficas en Estudio.

Gráfico N° 1.

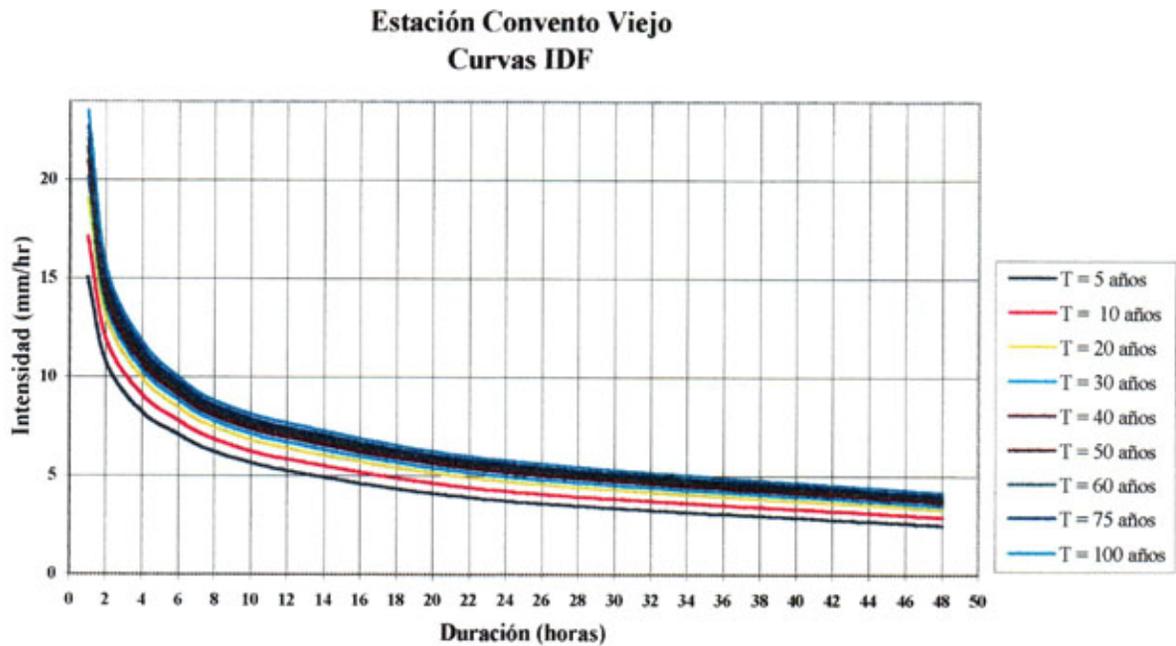


Gráfico N° 2.

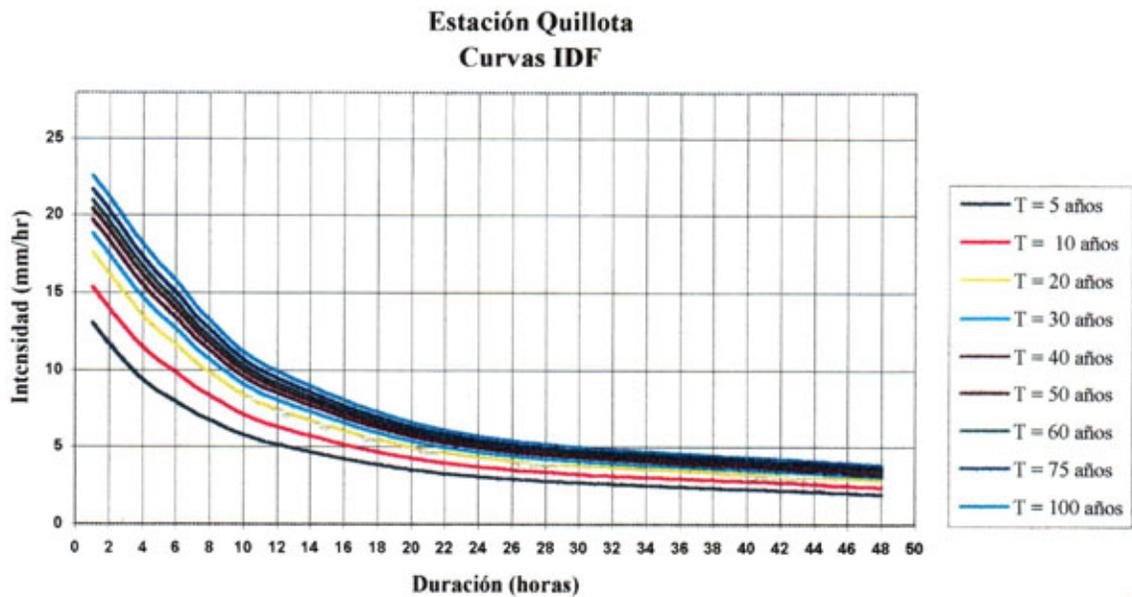


Gráfico N° 3.

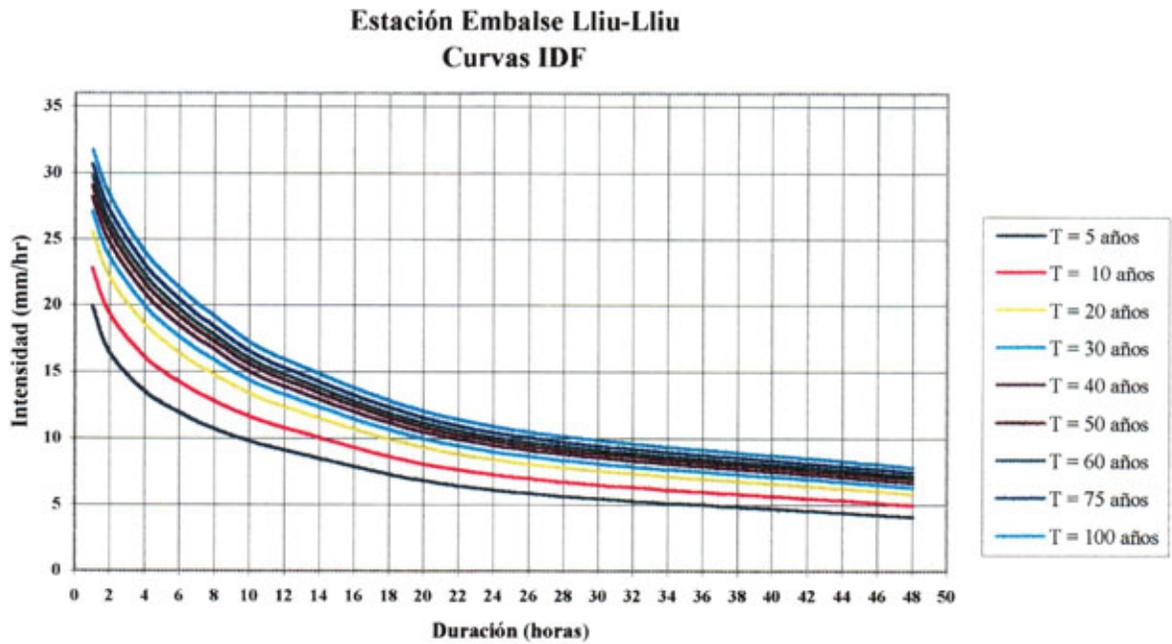


Gráfico N° 4.

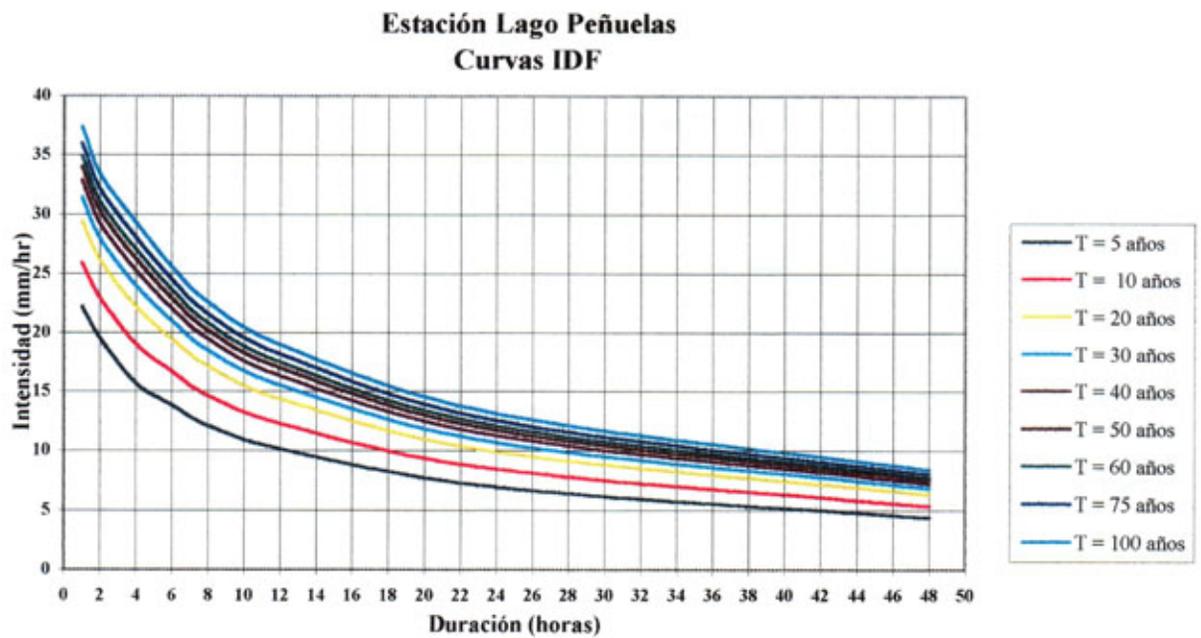


Gráfico N° 5.

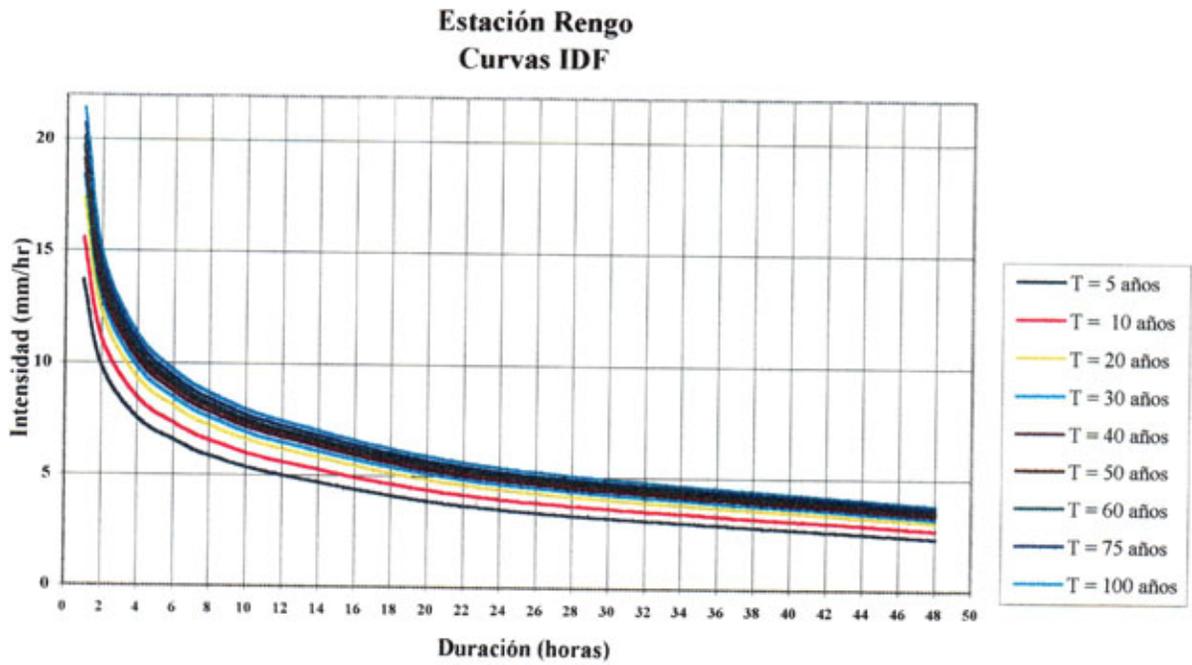


Gráfico N° 6.

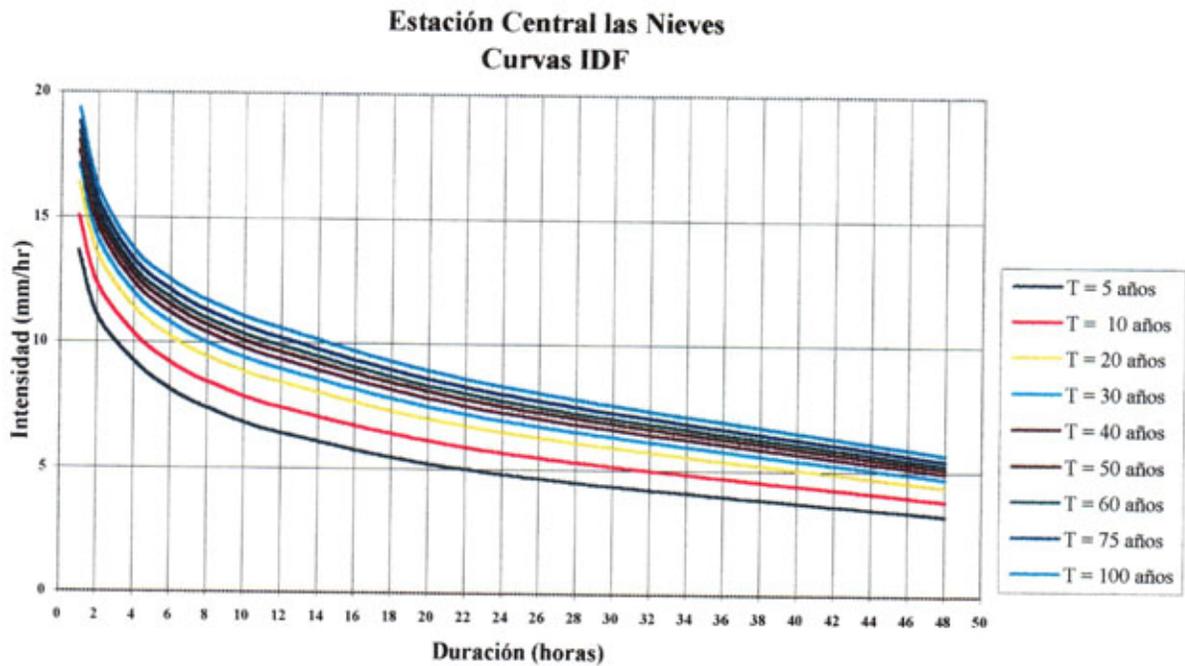
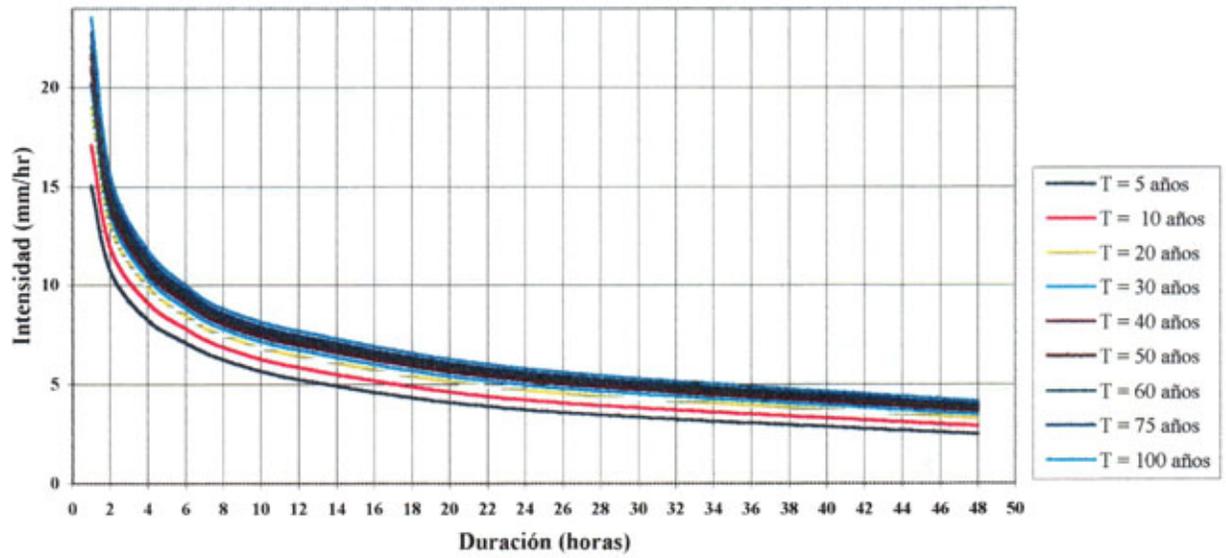


Gráfico N° 7.

Estación Convento Viejo  
Curvas IDF

## 6.6. Determinación de las Tablas de Uso Práctico.

Las Tablas de Uso Práctico, en las cuales aparecen los diferentes parámetros  $k$  calculados, que muestran la relación entre la intensidad horaria para cada duración y la intensidad de precipitación en 24 horas para cada período de retorno, se muestran a continuación. La obtención de estas relaciones permitirá la extrapolación a zonas o estaciones que carezcan de registros pluviográficos, pero que sí posean los registros de precipitaciones en 24 horas, es decir, estaciones pluviométricas. Para poder desarrollar esta etapa es necesario conocer los valores de las intensidades de precipitación calculadas para las distintas duraciones y períodos de retorno, en cada una de las estaciones estudiadas, información que aparece en las tablas N° 22, 23, 24, 25, 26, 27 y 28. Después de este desarrollo, son generadas las Tablas de Uso Práctico, disponibles en las tablas N° 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35.

### Región de Valparaíso.

**Tabla N° 22.** Intensidades de precipitación (mm/h), para cada duración y período de retorno. Estación Hacienda Pedernal.

Duración	Período de Retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T = 100
1	12.62	14.46	16.22	17.24	17.95	18.51	18.96	19.51	20.22
2	11.13	12.78	14.37	15.28	15.92	16.42	16.82	17.32	17.96
4	9.23	10.73	12.17	13.00	13.59	14.04	14.41	14.86	15.43
6	8.05	9.34	10.58	11.30	11.80	12.19	12.50	12.89	13.39
8	7.01	8.07	9.08	9.67	10.08	10.40	10.66	10.97	11.38
12	5.82	6.67	7.48	7.95	8.29	8.54	8.75	9.01	9.33
24	4.25	4.97	5.67	6.07	6.36	6.58	6.75	6.97	7.25
48	2.72	3.28	3.81	4.12	4.33	4.50	4.64	4.80	5.02

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 23.** Intensidades de precipitación (mm/h), para cada duración y periodo de retorno. Estación Quillota.

Duración	Períodos de Retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	13.10	15.39	17.59	18.86	19.75	20.44	21.00	21.69	22.57
2	11.73	14.01	16.20	17.46	18.35	19.04	19.60	20.28	21.16
4	9.35	11.48	13.53	14.70	15.53	16.17	16.70	17.33	18.16
6	7.93	9.84	11.66	12.71	13.45	14.02	14.48	15.05	15.79
8	6.75	8.34	9.85	10.73	11.34	11.82	12.20	12.68	13.29
12	5.15	6.30	7.41	8.04	8.49	8.84	9.12	9.47	9.91
24	3.08	3.71	4.33	4.68	4.93	5.12	5.28	5.47	5.71
48	1.92	2.38	2.83	3.08	3.26	3.40	3.51	3.65	3.83

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 24.** Intensidades de precipitación (mm/h), para cada duración y periodo de retorno. Estación Embalse Lliu-Lliu.

Duración	Períodos de Retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	19.95	22.81	25.55	27.13	28.25	29.11	29.81	30.67	31.77
2	16.41	19.28	22.03	23.61	24.73	25.59	26.29	27.15	28.26
4	13.51	16.06	18.51	19.92	20.91	21.68	22.30	23.07	24.05
6	11.92	14.18	16.36	17.61	18.50	19.18	19.73	20.41	21.29
8	10.72	12.77	14.73	15.86	16.65	17.27	17.77	18.38	19.17
12	9.10	10.75	12.32	13.23	13.87	14.36	14.77	15.26	15.89
24	6.12	7.26	8.36	9.00	9.44	9.79	10.07	10.41	10.86
48	4.09	4.98	5.85	6.34	6.69	6.96	7.18	7.45	7.79

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 25.** Intensidades de precipitación (mm/h), para cada duración y periodo de retorno. Estación Lago Peñuelas.

Duración	Períodos de Retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	22.22	25.90	29.42	31.45	32.88	33.99	34.89	35.99	37.41
2	19.56	22.91	26.12	27.97	29.27	30.28	31.10	32.10	33.39
4	15.69	18.99	22.16	23.98	25.27	26.26	27.07	28.06	29.33
6	13.83	16.68	19.41	20.98	22.09	22.95	23.65	24.50	25.60
8	12.08	14.62	17.05	18.45	19.44	20.20	20.82	21.58	22.56
12	10.12	12.26	14.31	15.49	16.33	16.97	17.50	18.14	18.97
24	6.94	8.43	9.86	10.69	11.27	11.72	12.08	12.53	13.10
48	4.42	5.38	6.30	6.83	7.20	7.49	7.72	8.01	8.38

Fuente: Elaboración propia.

### Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

**Tabla N° 26.** Intensidades de precipitación (mm/h), para cada duración y periodo de retorno. Estación Rengo.

Duración	Períodos de Retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	13.68	15.56	17.36	18.39	19.12	19.68	20.14	20.70	21.43
2	9.85	11.08	12.25	12.92	13.40	13.77	14.07	14.43	14.91
4	7.56	8.47	9.33	9.83	10.18	10.45	10.67	10.94	11.29
6	6.58	7.33	8.05	8.47	8.76	8.99	9.17	9.40	9.69
8	5.87	6.55	7.20	7.58	7.84	8.05	8.21	8.42	8.68
12	5.00	5.59	6.16	6.49	6.72	6.90	7.04	7.22	7.45
24	3.51	3.97	4.41	4.66	4.83	4.97	5.08	5.22	5.39
48	2.35	2.70	3.04	3.24	3.37	3.48	3.57	3.67	3.81

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 27.** Intensidades de precipitación (mm/h), para cada duración y periodo de retorno. Estación Central las Nieves.

Duración	Períodos de Retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	13.68	15.06	16.38	17.14	17.67	18.09	18.42	18.83	19.37
2	11.07	12.32	13.52	14.21	14.70	15.07	15.38	15.76	16.24
4	9.26	10.34	11.37	11.97	12.39	12.72	12.98	13.30	13.72
6	8.12	9.19	10.21	10.79	11.21	11.53	11.79	12.11	12.52
8	7.38	8.42	9.42	10.00	10.40	10.71	10.97	11.28	11.68
12	6.41	7.42	8.39	8.94	9.34	9.64	9.89	10.19	10.58
24	4.80	5.65	6.47	6.94	7.27	7.53	7.73	7.99	8.32
48	3.22	3.82	4.39	4.72	4.95	5.13	5.28	5.46	5.69

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 28.** Intensidades de precipitación (mm/h), para cada duración y periodo de retorno. Estación Convento Viejo.

Duración	Períodos de Retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	15.04	17.09	19.07	20.20	21.00	21.62	22.12	22.74	23.53
2	10.76	11.93	13.06	13.70	14.16	14.51	14.80	15.15	15.60
4	8.26	9.11	9.92	10.38	10.71	10.97	11.17	11.43	11.75
6	7.08	7.78	8.45	8.84	9.11	9.32	9.50	9.71	9.98
8	6.23	6.85	7.44	7.78	8.02	8.21	8.36	8.55	8.79
12	5.23	5.83	6.39	6.72	6.95	7.13	7.28	7.45	7.68
24	3.72	4.22	4.70	4.97	5.17	5.32	5.44	5.59	5.78
48	2.49	2.89	3.27	3.48	3.64	3.76	3.85	3.97	4.12

Fuente: Elaboración propia.

## Región de Valparaíso.

**Tabla N° 29.** Parámetro k para cada duración y para los distintos períodos de retorno. Estación Hacienda Pedernal.

Duración	Períodos de retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T = 100
1	2.97	2.91	2.86	2.84	2.82	2.81	2.81	2.80	2.79
2	2.62	2.57	2.53	2.52	2.51	2.50	2.49	2.48	2.48
4	2.17	2.16	2.15	2.14	2.14	2.14	2.13	2.13	2.13
6	1.90	1.88	1.87	1.86	1.86	1.85	1.85	1.85	1.85
8	1.65	1.62	1.60	1.59	1.59	1.58	1.58	1.57	1.57
12	1.37	1.34	1.32	1.31	1.30	1.30	1.30	1.29	1.29
24	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
48	0.64	0.66	0.67	0.68	0.68	0.69	0.69	0.69	0.69

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 30.** Parámetro k. para cada duración y para los distintos períodos de retorno. Estación Quillota.

Duración	Períodos de retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	4.26	4.15	4.07	4.03	4.01	3.99	3.98	3.97	3.95
2	3.82	3.77	3.75	3.73	3.72	3.72	3.71	3.71	3.70
4	3.04	3.09	3.13	3.14	3.15	3.16	3.16	3.17	3.18
6	2.58	2.65	2.70	2.72	2.73	2.74	2.75	2.75	2.76
8	2.20	2.24	2.28	2.29	2.30	2.31	2.31	2.32	2.33
12	1.67	1.70	1.71	1.72	1.72	1.73	1.73	1.73	1.74
24	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
48	0.62	0.64	0.65	0.66	0.66	0.66	0.67	0.67	0.67

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 31.** Parámetro k. para cada duración y para los distintos períodos de retorno.  
Estación Emb. Lliu-Lliu.

Duración	Períodos de retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	3.26	3.14	3.06	3.02	2.99	2.97	2.96	2.95	2.93
2	2.68	2.65	2.63	2.62	2.62	2.62	2.61	2.61	2.60
4	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.22	2.22	2.22	2.22
6	1.95	1.95	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
8	1.75	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.77	1.77	1.77
12	1.49	1.48	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.46
24	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
48	0.67	0.69	0.70	0.71	0.71	0.71	0.71	0.72	0.72

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 32.** Parámetro k para cada duración y para los distintos períodos de retorno.  
Estación Lago Peñuelas.

Duración	Períodos de retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	3.20	3.07	2.98	2.94	2.92	2.90	2.89	2.87	2.86
2	2.82	2.72	2.65	2.62	2.60	2.58	2.57	2.56	2.55
4	2.26	2.25	2.25	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24
6	1.99	1.98	1.97	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.95
8	1.74	1.73	1.73	1.73	1.73	1.72	1.72	1.72	1.72
12	1.46	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
24	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
48	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64

Fuente: Elaboración propia.

## Región del Libertador Bdo. O'Higgins.

**Tabla N° 33.** Parámetro k. para cada duración y para los distintos períodos de retorno.  
Estación Rengo.

Duración	Períodos de retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	3.90	3.92	3.94	3.95	3.96	3.96	3.96	3.97	3.97
2	2.80	2.79	2.78	2.78	2.77	2.77	2.77	2.77	2.76
4	2.15	2.13	2.12	2.11	2.11	2.10	2.10	2.10	2.09
6	1.87	1.85	1.83	1.82	1.81	1.81	1.81	1.80	1.80
8	1.67	1.65	1.64	1.63	1.62	1.62	1.62	1.61	1.61
12	1.42	1.41	1.40	1.39	1.39	1.39	1.39	1.38	1.38
24	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
48	0.67	0.68	0.69	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.71

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 34.** Parámetro k. para cada duración y para los distintos períodos de retorno.  
Estación Central Nieves.

Duración	Períodos de retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	2.85	2.66	2.53	2.47	2.43	2.40	2.38	2.36	2.33
2	2.31	2.18	2.09	2.05	2.02	2.00	1.99	1.97	1.95
4	1.93	1.83	1.76	1.73	1.70	1.69	1.68	1.67	1.65
6	1.69	1.63	1.58	1.56	1.54	1.53	1.52	1.52	1.51
8	1.54	1.49	1.46	1.44	1.43	1.42	1.42	1.41	1.40
12	1.34	1.31	1.30	1.29	1.28	1.28	1.28	1.28	1.27
24	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
48	0.67	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 35.** Parámetro k. para cada duración y para los distintos períodos de retorno.  
Estación. Convento Viejo.

Duración	Períodos de retorno T (años)								
	T = 5	T = 10	T = 20	T = 30	T = 40	T = 50	T = 60	T = 75	T=100
1	4.05	4.05	4.06	4.06	4.06	4.07	4.07	4.07	4.07
2	2.90	2.83	2.78	2.76	2.74	2.73	2.72	2.71	2.70
4	2.22	2.16	2.11	2.09	2.07	2.06	2.05	2.04	2.03
6	1.91	1.85	1.80	1.78	1.76	1.75	1.75	1.74	1.73
8	1.68	1.62	1.58	1.57	1.55	1.54	1.54	1.53	1.52
12	1.41	1.38	1.36	1.35	1.35	1.34	1.34	1.33	1.33
24	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
48	0.67	0.69	0.70	0.70	0.70	0.71	0.71	0.71	0.71

Fuente: Elaboración propia.

**6.7. Determinación de las Expresiones Matemáticas Generales de las Curvas IDF.**

Luego de generar las curvas IDF para cada una de las 7 estaciones, se debe cumplir un segundo objetivo asociado a esta investigación, que corresponde a la determinación de las expresiones matemáticas que representan el comportamiento de las variables de intensidad, duración y frecuencia que caracterizan las precipitaciones.

Para lograrlo, se utilizó la metodología recomendada por Aparicio (1997), cuya relación entre las variables señaladas en el párrafo anterior, se expresa de la siguiente forma:

$$I = \frac{kT^m}{D^n}$$

Luego, para obtener una expresión con la forma de un modelo de regresión lineal múltiple se aplicaron logaritmos, quedando de la siguiente manera:

$$\log I = \log k + m \log T - n \log d$$

O bien :

$$y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2$$

### 6.7.1. Modelo de Regresión Lineal Múltiple.

En una primera etapa, se generaron los modelos de regresión lineal múltiple para cada estación (Tabla N° 36). Para esto, fueron considerados los valores de intensidades máximas de precipitación, asociadas a distintas duraciones y períodos de retorno, que aparecen en las tablas N° 22, 23, 24, 25, 26, 27 y 28.

**Tabla N° 36.** Modelos de Regresión Lineal Múltiple.

Estación	Modelo de Regresión Lineal Múltiple	R <sup>2</sup>	E.E.E	E.D.W
Hacienda Pedernal	$y = 1.71426 + 0.168358X_1 - 0.376132X_2$	0.966	0.039438	0.177091
Quillota	$y = 1.95073 + 0.21108X_1 - 0.49112X_2$	0.928	0.0757968	0.108836
Embalse Lliu-Lliu	$y = 1.89151 + 0.186587X_1 - 0.380197X_2$	0.960	0.0435091	0.138775
Lago Peñuelas	$y = 1.96771 + 0.198809X_1 - 0.391538X_2$	0.947	0.0524973	0.153655
Rengo	$y = 1.82449 + 0.138792X_1 - 0.434546X_2$	0.996	0.0150133	0.386495
Central las Nieves	$y = 1.60404 + 0.150268X_1 - 0.319017X_2$	0.971	0.0307818	0.393797
Convento Viejo	$y = 1.87034 + 0.132025X_1 - 0.438747X_2$	0.996	0.014762	0.644869

Fuente: Elaboración propia.

$y$ : Variable dependiente,  $X_1$  y  $X_2$ : Variables independientes, R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación, E.E.E: Error estándar de estimación, E.D.W: Estadístico de Durbin-Watson.

En los Apéndices I, II, III, IV, V, VI y VII se encuentra el desarrollo de los análisis de Regresión y de Varianza, que resultaron de los modelos presentados en la Tabla N° 36. En ellos se puede observar que para la totalidad de los modelos se cumplió lo siguiente:

*Dóxicas de hipótesis para los coeficientes de la regresión lineal múltiple.*

\* Dócima para las pendientes:

Ho: Pendiente = 0

Ha: Pendiente  $\neq$  0

\* Dócima para el Intercepto:

Ho: Intercepto = 0

Ha: Intercepto  $>$  0

En todos los casos, el valor-p para la pendiente de la recta fue cero, debido a lo cual se rechaza la hipótesis nula (valor-p es inferior a  $\alpha/2$ ), pudiéndose concluir que las variables presentan una relación lineal entre ellas. Además, el valor-p del intercepto también resultó cero, rechazándose de igual manera la hipótesis nula.

Para dar mayor validez al modelo de regresión lineal planteado, es necesario verificar que se cumplan los supuestos básicos de la regresión, es decir, normalidad, homocedasticidad y no autocorrelación de los residuos. A continuación, en la Tabla N° 37, se muestran los resultados generales de dichos análisis:

**Tabla N° 37.** Supuestos de los Modelos de Regresión Lineal Múltiple.

Estación	Normalidad	Supuestos de Regresión	
		Homocedasticidad	No-Autocorrelación
<b>Hacienda Pedernal</b>	Cumple	Cumple	No cumple
<b>Quillota</b>	Cumple	Cumple	No cumple
<b>Emb. Lliu-Lliu</b>	No cumple	Cumple	No cumple
<b>Lago Peñuelas</b>	No cumple	Cumple	No cumple
<b>Rengo</b>	Cumple	Cumple	No cumple
<b>Central las Nieves</b>	Cumple	Cumple	No cumple
<b>Convento Viejo</b>	Cumple	Cumple	No cumple

Fuente: Elaboración propia.

El supuesto de Normalidad de los residuos, cuyo determinación se basa en los valores del test de Kolmogorov-Smirnov, que entrega el programa estadístico Statgraphics Plus V. 1.4., no se cumple para las estaciones de Embalse Lliu-Lliu y Lago Peñuelas, pese a lo cual se entregan los modelos ajustados para cada una de esas estaciones, sin que sea necesario realizar mayor análisis en dichos resultados.

El supuesto de Homocedasticidad, también llamado de homogeneidad de las varianzas, se cumplió en todos los casos y fue evaluado con el test de Goldfeld-Quandt, cuyo procedimiento se detalla en el Anexo I.

El supuesto de No-autocorrelación, que se verifica con el test de Durbin-Watson (Anexo II), no se cumple para todos los modelos de regresión planteados, pero este problema se puede corregir con el procedimiento de transformación de variables, que logra eliminar la autocorrelación de los residuos a través del método  $\rho$ , basado en el estadístico Durbin-Watson, cuya aplicación se detalla en el Anexo III.

#### **6.7.2. Primer Modelo de Regresión Lineal Múltiple Transformado.**

Los resultados del método Iterativo de Durbin-Watson, al cual fueron sometidos los datos de cinco estaciones, a saber, Hacienda Pedernal, Quillota, Rengo, Central las Nieves y Convento Viejo, cuyo único problema era la autocorrelación de sus residuos, se entregan en la Tabla N° 38, y constituyen los modelos de regresión lineal múltiple transformados.

Tabla N° 38. Modelos de Regresión Lineal Múltiple Transformados.

Estación	Modelo de Regresión Lineal Múltiple Transformado	R <sup>2</sup>	E.E.E	E.D.W
Hacienda Pedernal	$y_t^* = 0.135624 + 0.155325X_{1t}^* - 0.287781X_{2t}^*$	0.959	0.010228	1.58553
Quillota	$y_t^* = 0.0972137 + 0.207101X_{1t}^* - 0.415578X_{2t}^*$	0.918	0.019093	1.66112
Rengo	$y_t^* = 0.351042 + 0.135047X_{1t}^* - 0.42761X_{2t}^*$	0.991	0.004966	1.07317
Central las Nieves	$y_t^* = 0.305142 + 0.142697X_{1t}^* - 0.29099X_{2t}^*$	0.975	0.008023	1.25216
Convento Viejo	$y_t^* = 0.601739 + 0.126621X_{1t}^* - 0.432858X_{2t}^*$	0.993	0.006246	0.85343

Fuente: Elaboración propia.

$y_t^*$ : Variable dependiente transformada (primera iteración),  $X_{1t}^*$  y  $X_{2t}^*$ : Variables independientes transformadas (primera iteración), R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación, E.E.E: Error estándar de estimación, E.D.W: Estadístico de Durbin-Watson.

### 6.7.3. Segundo Modelo de Regresión Lineal Múltiple Transformado.

Luego de obtenidos los modelos transformados, se procedió a analizar el cumplimiento del supuesto de No-Autocorrelación. En todos los casos se obtuvo un valor del estadístico Durbin-Watson que indicó nuevamente presencia de correlación de los residuos, por lo que fue necesario aplicar nuevamente el método de iteración. En la Tabla N° 39 aparecen los modelos resultantes de esta nueva aplicación, que corresponden a los segundos modelos de regresión lineal múltiple transformados.

Tabla N° 39. Segundos Modelos de Regresión Lineal Múltiple Transformados.

Estación	Segundo Modelo de Regresión Lineal Múltiple Transformado	R <sup>2</sup>	E.E.E	E.D.W
Hacienda Pedernal	$yt^{**} = 0.107382 + 0.156134X_{1t}^{**} - 0.288966X_{2t}^{**}$	0.965	0.009938	1.99343
Quillota	$yt^{**} = 0.0832012 + 0.213196X_{1t}^{**} - 0.44879X_{2t}^{**}$	0.928	0.018796	1.97575
Rengo	$yt^{**} = 0.190467 + 0.137519X_{1t}^{**} - 0.43787X_{2t}^{**}$	0.990	0.004305	1.83225
Central las Nieves	$yt^{**} = 0.19353 + 0.145826X_{1t}^{**} - 0.301489X_{2t}^{**}$	0.978	0.007445	1.91099
Convento Viejo	$yt^{**} = 0.255609 + 0.126786X_{1t}^{**} - 0.429704X_{2t}^{**}$	0.986	0.005131	2.03254

Fuente: Elaboración propia.

$yt^{**}$ : Variable dependiente transformada (segunda iteración),  $X_{1t}^{**}$  y  $X_{2t}^{**}$ : Variables independientes transformadas (segunda iteración), R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación, E.E.E: Error estándar de estimación, E.D.W: Estadístico de Durbin-Watson.

Esta vez los modelos fueron aceptados en su totalidad, ya que se verificó el cumplimiento del supuesto de no-autocorrelación. El siguiente paso fue determinar los nuevos coeficientes de regresión del modelo original para el intercepto y las pendientes, procedimiento que se detalla, para cada una de las estaciones, en la Tabla N° 40.

Tabla N° 40: Coeficientes de Regresión del los Modelos Finales.

	Parámetros	Estaciones				
		Hacienda Pederal	Quillota	Rengo	Central las Nieves	Convento Viejo
<b>Coefficientes de la Segunda Iteración.</b>	<b>a0**</b>	0.10738	0.08320	0.19047	0.19353	0.25561
	<b>a1**</b>	0.15613	0.21320	0.13752	0.14583	0.12679
	<b>a2**</b>	-0.28897	-0.44879	-0.43787	-0.30149	-0.42970
	$\rho_2$	0.20724	0.16944	0.46342	0.37392	0.57329
<b>Coefficientes Transformados de la Primera Iteración.</b>	<b>a0*</b>	0.13545	0.10017	0.35497	0.30911	0.59903
	<b>a1*</b>	0.15613	0.21320	0.13752	0.14583	0.12679
	<b>a2*</b>	-0.28897	-0.44879	-0.43787	-0.30149	-0.42970
	$\rho_1$	0.91145	0.94558	0.80675	0.80310	0.67757
<b>Coefficientes del Modelo Final</b>	<b>a0</b>	1.52964	1.84068	1.83684	1.56988	1.85786
	<b>a1</b>	0.15613	0.21320	0.13752	0.14583	0.12679
	<b>a2</b>	-0.28897	-0.44879	-0.43787	-0.30149	-0.42970

Fuente: Elaboración propia.

a0\*\*, a1\*\*, a2\*\*: parámetros, a0\*:  $a0^{**}/(1-\rho_2)$ , a1\*: a1\*\*, a2\*: a2\*\*, a0:  $a0^{**}/(1-\rho_1)$ , a1: a1\*, a2: a2\*,  $\rho_1: (1-d_1/2)$ ,  $\rho_2: (1-d_2/2)$ ; donde  $d_1$  y  $d_2$ : estadístico de Durbin-Watson del modelo de regresión múltiple y del primer modelo transformado, respectivamente.

#### 6.7.4. Modelo de Regresión Lineal Múltiple Final.

En la Tabla N° 41, se muestran los modelos lineales finales para las siete estaciones en estudio, incluyéndose las que presentaron problemas de Normalidad, que no fueron sometidas a ningún método correctivo y las que presentaron problemas de Autocorrelación, cuyos modelos resultaron luego de transformar las variables por medio del Método Iterativo  $\rho$ , para eliminar dicho problema.

Por último, para obtener la función matemática propuesta por Aparicio (1997), que permite estimar la intensidad de las precipitaciones, en función de la duración y frecuencia de las mismas, se transforman y reemplazan las variables en los modelos lineales finales, quedando las ecuaciones que aparecen en la Tabla N° 41.

**Tabla N° 41:** Modelos de Regresión Lineal Múltiple y Expresiones Matemáticas Generales de las Curvas IDF.

Estación	Modelo de Regresión Múltiple Final	Modelo Ajustado
<b>Hacienda Pedernal</b>	$y = 1.529644 + 0.156134X_1 - 0.288966X_2$	$I = \frac{33.857 * T^{0.156134}}{D^{0.288966}}$
<b>Quillota</b>	$y = 1.840684 + 0.213196X_1 - 0.448791X_2$	$I = \frac{69.292 * T^{0.213196}}{D^{0.448791}}$
<b>* Embalse Lliu-Lliu</b>	$y = 1.89151 + 0.186587X_1 - 0.380197X_2$	$I = \frac{77.895 * T^{0.186587}}{D^{0.380197}}$
<b>* Lago Peñuelas</b>	$y = 1.96771 + 0.198809X_1 - 0.391538X_2$	$I = \frac{92.835 * T^{0.198809}}{D^{0.391538}}$
<b>Rengo</b>	$y = 1.836843 + 0.137519X_1 - 0.437870X_2$	$I = \frac{68.682 * T^{0.137519}}{D^{0.437870}}$
<b>Central las Nieves</b>	$y = 1.569883 + 0.145826X_1 - 0.301489X_2$	$I = \frac{37.144 * T^{0.145826}}{D^{0.301489}}$
<b>Convento Viejo</b>	$y = 1.877861 + 0.126786X_1 - 0.429704X_2$	$I = \frac{72.088 * T^{0.126786}}{D^{0.429704}}$

Fuente: Elaboración propia.

$y$ :  $\log I$ ,  $X_2$ :  $\log d$ ,  $X_1$ :  $\log T$ ,  $a_0$ :  $\log k$ ,  $a_1$ :  $m$ ,  $a_2$ :  $-n$ ,  $I$ : Intensidad de precipitación (mm/h),  $T$ : período de retorno (años),  $D$ : duración (minutos).

\*: Estaciones cuyos modelos lineales múltiples no cumplen con los supuestos de Normalidad y No-Autocorrelación.

### 6.7.5. Medidas de Bondad de Ajuste.

Una vez ajustados los modelos para cada estación pluviográfica, éstos debieron ser validados por medio de dos medidas de bondad de ajuste; la prueba U de Mann-Whitney y el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ). En la Tabla N° 42 se entregan las ecuaciones matemáticas que permiten obtener las curvas IDF para cada estación, junto con los resultados de las pruebas de bondad de ajuste aplicadas a sus respectivos modelos.

Tabla N° 42. Modelos ajustados para cada una de las estaciones pluviográficas.

Estación	Modelo Ajustado	Prueba U Mann-Whitney ( $Z_t = \pm 1.96$ )		$R^2$
		$Z_c$	Decisión	
Hacienda Pedernal	$I = \frac{33.857 * T^{0.156134}}{D^{0.288966}}$	-0.30366	Se acepta $H_0$	96.51%
Quillota	$I = \frac{69.292 * T^{0.213196}}{D^{0.448791}}$	-0.40355	Se acepta $H_0$	92.78%
Embalse Lliu-Lliu	$I = \frac{77.895 * T^{0.186587}}{D^{0.380197}}$	-0.51143	Se acepta $H_0$	96.03%
Lago Peñuelas	$I = \frac{92.835 * T^{0.198809}}{D^{0.391538}}$	-0.42752	Se acepta $H_0$	94.68%
Rengo	$I = \frac{68.682 * T^{0.137519}}{D^{0.437870}}$	-0.01998	Se acepta $H_0$	98.96%
Central las Nieves	$I = \frac{37.144 * T^{0.145826}}{D^{0.301489}}$	-0.18779	Se acepta $H_0$	97.84%
Convento Viejo	$I = \frac{72.088 * T^{0.126786}}{D^{0.429704}}$	-0.07192	Se acepta $H_0$	98.59%

Fuente: Elaboración propia.

$I$ : Intensidad de precipitación (mm/h),  $T$ : período de retorno (años),  $D$ : duración (minutos).

### 6.8. Análisis Gráfico Comparativo de las Intensidades Máximas de Precipitación.

Considerando los resultados obtenidos en estudios previos, para las regiones Metropolitana y del Maule, y sumando a ellos los obtenidos en esta investigación para las regiones de Valparaíso y de O'Higgins, se desarrolló un análisis comparativo con el fin de determinar si existe algún patrón en la distribución de las intensidades máximas de precipitación en dichas regiones. En la Tabla N° 43 aparecen las diecinueve estaciones incorporadas en este estudio, cada una con su respectiva ubicación geográfica, además de los valores de intensidad máxima que serán analizados con posterioridad.

Tabla N° 43. Estaciones pluviográficas incorporadas en el análisis gráfico.

	Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	1ª Intensidad Máxima	2ª Intensidad Máxima	Promedio Intensidades Máximas
<b>Región de Valparaíso</b>	Hacienda Pedernal	32°05'	70°48'	17.8	12.3	10.4
	Quillota	32°54'	71°13'	18.6	17.9	10.3
	Embalse Lliu-Lliu	33°06'	71°13'	23.4	23.2	16.4
	Lago Peñuelas	33°09'	71°32'	30.3	29.4	17.7
<b>Región Metropolitana</b>	Embalse Rungue	33°02'	70°54'	17.0	13.0	9.5
	Cerro Calán	33°23'	70°32'	19.2	15.5	11.2
	Los Panguiles	33°26'	71°00'	14.8	13.2	8.6
	Pirque	33°40'	70°36'	15.2	14.2	9.5
	Melipilla	33°42'	71°13'	38.5	15.0	9.6
<b>Región de O'Higgins</b>	Rengo	34°24'	70°52'	21.5	16.6	11.4
	Central las Nieves	34°29'	70°45'	16.2	15.6	12.0
	Convento Viejo	34°46'	71°06'	19.3	17.8	12.5
	Los Queñes	34°59'	70°48'	25.2	22.4	15.5
	Potrero Grande	35°10'	71°05'	25.7	24.8	15.7
<b>Región del Maule</b>	Pencahue	35°23'	71°48'	15.9	13.4	10.2
	Talca	35°26'	71°38'	14.3	13.1	9.2
	Colorado	35°37'	71°16'	25.6	22.3	13.9
	Melozal	35°44'	71°48'	23.0	14.6	10.2
	Embalse Ancoa	35°55'	71°17'	23.4	20.2	16.5
	Parral	36°11'	71°50'	19.3	18.3	12.1
	Embalse Digua	36°15'	71°32'	25.8	25.1	16.8
	Bullileo	36°17'	71°16'	22.4	21.2	16.4
San Manuel	36°21'	71°38'	23.0	22.6	14.4	

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1. Información Pluviométrica Seleccionada

Si bien las regiones de Valparaíso y del Libertador Bernardo O'Higgins, cuentan con un total de diez estaciones pluviográficas (cinco en cada región), sólo fue posible trabajar con siete estaciones de medición, ya que en las tres restantes se encontraron problemas notables tanto de escasez como de mal estado de los registros.

Una vez seleccionadas las estaciones incluidas en este estudio, se decidió trabajar con el máximo posible de años de estadística para cada estación. Si bien algunas estaciones cuentan con registros pluviográficos de hasta 30 años, todas ellas presentan algún porcentaje de bandas de pluviógrafo con registros defectuosos, como producto de la mala conservación de las bandas o del mal funcionamiento del equipo, lo que obligó a seleccionar sólo aquellos años en que los registros se encontraban en su mayoría completos y por ende con una estadística más potente. Finalmente, una vez analizados y revisados los registros anuales de cada una de las estaciones, se pudo extraer la información de los años que se indican en la Tabla N° 58.

A pesar de haber considerado y analizado tres estaciones pluviográficas de la Región de Valparaíso, que cuentan con menos de quince años de registros adecuados para realizar este estudio, la metodología y la estadística utilizada permiten asegurar la obtención de información lógica y confiable, dentro de un contexto hidrológico.

**Tabla N° 58.** Años de estadística seleccionada para realizar este estudio.

<b>Estación</b>	<b>Años de análisis</b>	<b>Total (años)</b>
<b>Hacienda Pedernal</b>	1978; 1982-1984; 1986; 1987; 1992; 1993; 2000; 2001.	10
<b>Quillota</b>	1979; 1980; 1982-1985; 1988; 1990; 1991; 1999; 2000; 2002.	12
<b>Embalse Lliu-Lliu</b>	1979-1984; 1988; 1992-1994; 1997; 2000-2002.	14
<b>Lago Peñuelas</b>	1974; 1976-1979; 1981-1985; 1987-1991; 1993; 1995; 1997; 1999-2001.	21
<b>Rengo</b>	1970-1984; 1986-1988; 1991; 1993-1995; 1997; 2000-2002.	26
<b>Central las Nieves</b>	1971-1973; 1976-1995; 1997; 2000-2002.	27
<b>Convento Viejo</b>	1972; 1974-1981; 1983-1985; 1987; 1988; 1990; 1992; 1993; 1995-1997; 2000.	21

**7.2. Intensidades Máximas Seleccionadas.**

En la Tabla N° 59 se encuentran los valores de intensidades máximas y mínimas para una duración de 1 hora, encontradas en los años de registro señalados, generándose de este modo un rango de intensidades máximas de precipitación para cada estación y para un mismo período de duración (1 hora).

Tabla N° 59. Rango de intensidades de precipitación para cada estación.

Estación	Intensidades de Precipitación (mm/h) para una Duración de 1 hora			
	Valor máximo	Año	Valor mínimo	Año
Hda. Pedernal	17.8	1983	6.7	1993
Quillota	18.6	2000	5.8	1991
Embalse Lliu-Lliu	23.4	1984	9.8	1979
Lago Peñuelas	30.3	1981	8.5	1995
Rengo	21.5	2001	7.7	1983
Central las Nieves	16.2	1981	6.1	1990
Convento Viejo	19.3	2000	7.8	1976

Como se observa en la Tabla N° 59, la máxima intensidad horaria de precipitación se registró en la estación Lago Peñuelas con 30.3 mm/h, para una duración de 1 hora, en el año 1981. En tanto, la menor intensidad se registró en la estación Quillota, con 5.8 mm/h, para una duración de 1 hora, en el año 1991.

### 7.3. Ajuste de los Datos a la Función de Gumbel.

Los valores de intensidad máxima de precipitación (mm/h), fueron ajustados a la distribución de probabilidad de Gumbel, función que presentó una muy buena calidad de ajuste para los datos extraídos de las siete estaciones pluviográficas en estudio.

Lo anterior se puede confirmar en función de los resultados de las medidas de bondad de ajuste; en el caso del test de Kolmogorov-Smirnov, éste fue ampliamente aprobado para cada duración y estación, ya que los valores D calculados eran mucho menores que los D

de tabla. Por otro lado, el análisis del Coeficiente de Determinación para cada estación y duración, también demostró una buena calidad de ajuste, ya que el promedio para las estaciones analizadas fue de 93.3%, y en donde el mayor valor lo obtuvo la estación Rengo con 98.9%, y el menor valor la estación Embalse Lliu-Lliu con 80.0%.

Los resultados obtenidos en esta etapa vienen a corroborar lo señalado por diversos autores; Pizarro y Novoa (1986), Bedient *et al* (1992), Fernández (1995), Abarza (2001) y Román (2003), quienes citan a la función de distribución de Gumbel como la función más apropiada para el ajuste de valores extremos y como la de más extendido uso, especialmente para el estudio de las precipitaciones.

#### **7.4. Diseño Gráfico de las Curvas IDF.**

El diseño gráfico de las curvas IDF, para cada una de las siete estaciones, se basó en la metodología propuesta por Témez (1978), en la cual la información debe ser extraída directamente de las bandas de registro de los pluviógrafos.

Para obtener resultados óptimos en la generación de las curvas, fue necesario realizar varios muestreos para que la relación entre la intensidad y la duración de las precipitaciones se ajustara adecuadamente y sin cambios abruptos en el recorrido de cada curva. El énfasis que se puso en este punto fue fundamental, ya que obedece a la hipótesis propuesta por Témez (1978), que propone que a duraciones más cortas, aumenta la probabilidad de encontrar valores mayores en la intensidad de precipitación.

En cada estación se efectuaron todos los muestreos necesarios para generar curvas IDF adecuadas y que por ende representaran de mejor manera el comportamiento de las precipitaciones del lugar. Es así como, si bien el número de muestreos fue variado, en todos los casos se realizó más de una búsqueda de los valores máximos de intensidad en las bandas de los pluviógrafos. Para el caso de las estaciones Hacienda Pedernal, Quillota y Lago Peñuelas se realizaron 4 muestreos; para las estaciones Embalse Lliu-Lliu y Central las Nieves, 5 muestreos y para las estaciones Convento Viejo y Rengo, 6 muestreos.

Luego de ajustar los valores de intensidades máximas, para distintas duraciones, a la distribución de probabilidad de Gumbel, se obtuvieron los gráficos de dichas variables asociadas a un determinado período de retorno (curvas IDF). En el análisis de las curvas de cada estación, en base a la información que se encuentra tabulada, se obtuvo que dos de las siete estaciones presentan valores de intensidad que superan ampliamente el promedio; ambas son de la Región de Valparaíso, a saber, estación Embalse Lliu-Lliu y estación Lago Peñuelas, y presentan intensidades para una duración de 1 hora y un período de retorno de 5 años de 19.9 mm/h y 22.2 mm/h, respectivamente. Asimismo, para la misma duración, y un período de retorno de 100 años, se verificaron intensidades de 31.7 mm/h y 37.4 mm/h, respectivamente. El resto de las estaciones, Hacienda Pedernal, Quillota, Rengo, Convento Viejo y Central las Nieves presentan intensidades, para una duración de 1 hora y un período de retorno de 5 años, que fluctúan entre los 12.6 mm/h y los 15.0 mm/h, y para la misma duración con un período de retorno de 100 años, valores que van desde los 19.4 mm/h a los 24.3 mm/h.

Para el resto de las duraciones y períodos de retorno, siguen siendo las estaciones Embalse Lliu-Lliu y Lago Peñuelas las que muestran los mayores valores de intensidad de precipitación, en tanto que el resto de las estaciones fluctúa en valores similares entre sí.

En cuanto a los valores de intensidad observados en las estaciones de cada región, es posible mencionar que si bien la mayor parte de las estaciones de ambas regiones presentan un comportamiento similar, al momento de establecer rangos de intensidad para cada región es posible encontrar diferencias. De hecho, si se considera una duración de 1 hora para un período de retorno de 5 años, en la Región de Valparaíso el rango fluctúa entre los 12.6 mm/h y los 22.2 mm/h, en tanto que en la Región de O'Higgins éste fluctúa entre los 13.6 mm/h y los 15 mm/h, observándose que el rango de esta última región es menor y por ende el comportamiento de las precipitaciones es más homogéneo; en cambio, en la Región de Valparaíso el rango tiene una mayor amplitud, lo que indica que el comportamiento de las precipitaciones es más variado.

### **7.5. Determinación Analítica de las Curvas IDF.**

La metodología para determinar analíticamente las curvas IDF fue la propuesta por Aparicio (2003), que relaciona en una expresión matemática las variables de intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones. La elección de esta metodología se basa en los estudios encontrados en la etapa de revisión de esta investigación que, basados en este procedimiento, arrojaron excelentes resultados en cuanto al ajuste de las variables. Además, el modelo propuesto por Aparicio (2003) ha sido ampliamente utilizado en la generación de las curvas IDF a nivel nacional, lo que suma mayor confiabilidad a los resultados.

En cuanto a la regresión del modelo, para todas las estaciones se cumplió el supuesto de Homocedasticidad de los residuos. Contrariamente, el supuesto de No-autocorrelación, no se cumplió inicialmente en ninguna de las estaciones, para lo cual fue necesario aplicar el método correctivo  $\rho$ , basado en el estadístico de Durbin-Watson, por medio del cual se debió iterar dos veces, en todos los casos, para cumplir con el supuesto. El supuesto de Normalidad, en cambio, no se cumplió en dos de las siete estaciones en estudio (Embalse Lliu-Lliu y Lago Peñuelas), sin que exista método alguno que pueda solucionar este problema.

Ahora bien, como se mencionó anteriormente, si el único objetivo es la estimación puntual de los parámetros de regresión, es suficiente desarrollar el método de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO), el cual no hace supuestos sobre la distribución de los residuos. Considerando lo anterior, los modelos de las dos estaciones que no cumplen el supuesto de Normalidad, y tampoco el de No-autocorrelación, fueron igualmente presentados, ya que resultan válidos siempre y cuando el objetivo no sea la inferencia, en cuyo caso se debe determinar si los residuos siguen alguna distribución de probabilidad.

Para validar los modelos generados para cada estación, se utilizaron como medidas de bondad de ajuste la prueba U de Mann-Whitney y el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ). En cuanto a la prueba U, el valor calculado para cada uno de los modelos fue superior al valor tabla, lo que significa que el valor estimado del modelo ajustado proviene de la misma

población que el valor real del modelo adimensional. Los valores del coeficiente de determinación, aprueban igualmente cada uno de los modelos con valores que fluctúan entre 92.8%, para la estación Quillota y 99.0%, para la estación Rengo, lo que corresponde a un muy buen ajuste.

#### **7.6. Análisis Comparativo de las Intensidades Máximas de Precipitación.**

El análisis gráfico de las intensidades máximas de precipitación, fue planteado de dos maneras con el objetivo de determinar, si existiese, un patrón de ocurrencia entre las máximas intensidades de precipitación registradas en cada estación y la ubicación geográfica de estas últimas.

En los gráficos N° 8, 9 y 10 se dispusieron las variables consideradas en este análisis; las coordenadas de ubicación geográfica de cada estación pluviográfica, en el eje de las abcisas y la intensidad de precipitación, en el eje de las ordenadas. A continuación, se relacionó cada coordenada con los dos valores máximos de intensidad y con el valor promedio de las intensidades máximas registrados en dicho punto. Los valores de intensidad máxima, en todos los casos, fueron los asociados a una duración de una hora.

La diferencia entre los gráficos, se basa en la distribución de las coordenadas de ubicación en el eje X; en el gráfico N° 8 las coordenadas se dispusieron en estricto sentido Norte-Sur; en el N° 9, en estricto sentido Este-Oeste y, en el N° 10, en sentido Este-Oeste, pero distinguiéndose además cada una de las regiones.

Gráfico N° 8

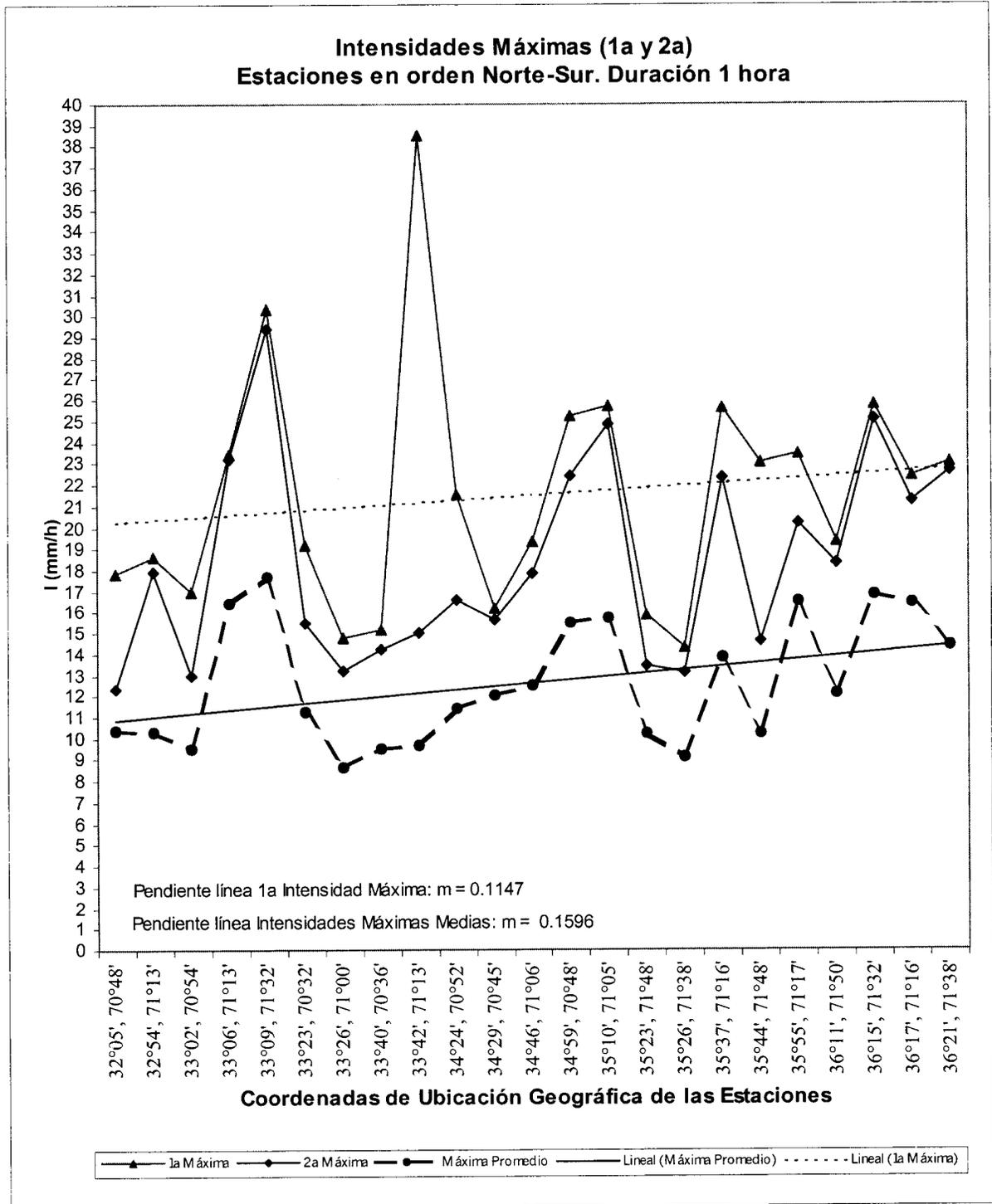
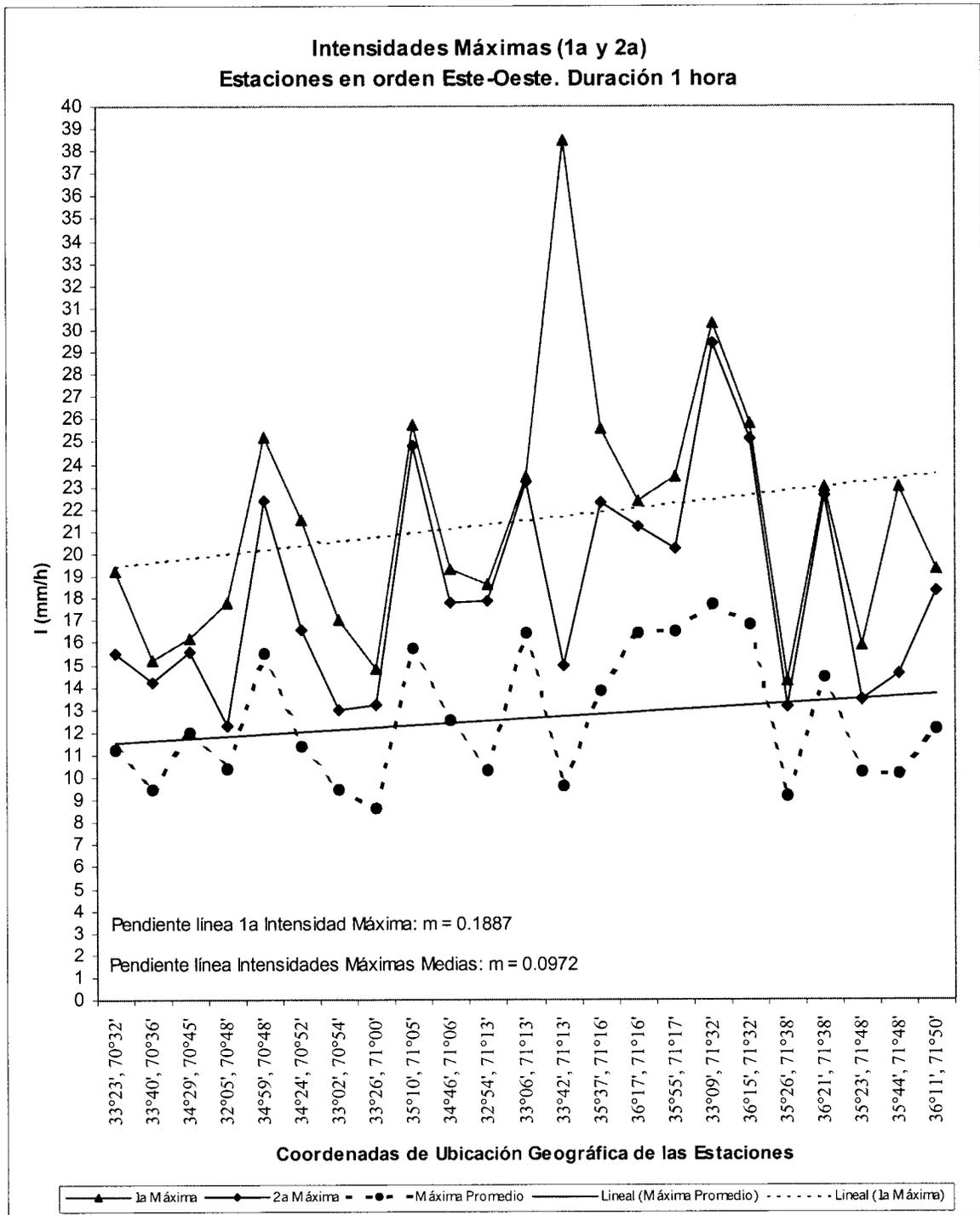


Gráfico N° 9





La observación de los gráficos N° 8, 9 y 10, permite señalar que las máximas intensidades de precipitación, no siguen ningún patrón específico, ya sea en sentido Norte-Sur o Este-Oeste.

Para aseverar lo anterior, el análisis se realizó, en una primera etapa, observando cada curva resultante por separado, es decir, se analizaron las curvas de las dos intensidades máximas y la curva promedio de las máximas intensidades de precipitación (media de las máximas intensidades registradas en el total de años de estudio, para cada estación). Esta observación inicial demostró que la tendencia de las máximas intensidades (1<sup>a</sup> y 2<sup>a</sup>), es muy similar a la tendencia del promedio y sólo en algunos casos puntuales se escapan a esta última. Una de las estaciones que destaca por este comportamiento es la de Melipilla (Región Metropolitana), cuya primera intensidad máxima alcanza a los 38.5 mm/h, valor que dista mucho del promedio cercano a los 12 mm/h. Lo anterior resulta muy difícil de explicar y puede deberse a eventos climáticos puntuales, que requieren de un estudio más extenso y detallado.

En el gráfico N° 8 es posible observar, aunque pequeña, una pendiente positiva en la recta de tendencia de la intensidad máxima promedio, a medida que ésta avanza hacia el sur, situación que se mantiene al analizar las curvas de la primera y la segunda intensidad máxima, lo que de manera general, demuestra que esta variable es mayor a mayores latitudes. Otro punto importante, es el hecho de que se observa una mayor variabilidad de los datos en latitudes menores; esto difiere de latitudes mayores, donde la variabilidad es menor y las intensidades se mantienen en un promedio más homogéneo

En el mismo gráfico, N° 8, es posible identificar que en la mayoría de los casos las intensidades máximas corresponden a estaciones que se encuentran junto a lagos o embalses, destacándose, entre otras, las estaciones Lago Peñuelas y Embalse Lliu-Lliu, en la Región de Valparaíso y Embalse Digua, Embalse Ancoa, Bullileo y Colorado, en la Región del Maule. Esto puede deberse a la mayor evaporación que ocurre en dichos lugares, lo que puede afectar directamente la pluviometría del sector.

En el gráfico N° 9, donde las coordenadas se encuentran dispuestas de Este a Oeste, se observa una tendencia positiva en esta última dirección, es decir, la curva muestra que las mayores intensidades en general, se aprecian hacia latitudes costeras. Esto último resulta poco comprensible desde un punto de vista técnico e indicaría en una primera aproximación, una escasez de información y la necesidad de incorporar a este análisis un mayor número de estaciones pluviográficas. Por otro lado, en el mismo gráfico es posible apreciar detalles similares a los señalados para el gráfico N° 8, como el hecho de que gran parte de los registros máximos se asocian con la cercanía a cuerpos de agua, como lagos o embalses.

Para el caso del gráfico N° 10, es posible detallar comportamientos más puntuales, ya que es posible distinguir cada una de las regiones incluidas en este estudio. La Región de Valparaíso, por ejemplo, representada por las cuatro primeras coordenadas que aparecen en el gráfico, muestra una clara tendencia de que las máximas intensidades de precipitación ocurren en las estaciones más cercanas a la costa, además de ubicarse junto a cuerpos de agua, tales como el Embalse Lliu-Lliu y el Lago Peñuelas. En la Región Metropolitana, sin embargo, la tendencia no es muy clara, ya que no existe ninguna influencia marítima por tratarse de estaciones que se encuentran ubicadas en la Depresión Intermedia. En la Región de O'Higgins la tendencia tampoco es muy clara, y se mantiene muy regular, ya que las tres estaciones estudiadas pertenecen a la Depresión Intermedia. En la Región del Maule, es posible distinguir con claridad que las tres coordenadas con mayor intensidad corresponden a las estaciones Embalse Ancoa, Embalse Digua y Bullileo, todas ubicadas alrededor de cuerpos de agua. Además de esto, es difícil establecer alguna otra relación característica; sin embargo en la Región del Maule las mayores intensidades se encuentran en sectores pre-cordilleranos, además de estar cerca de cuerpos de agua, lo que revierte la tendencia general del gráfico N° 9, que mostraba que las mayores intensidades se producían hacia la zona costera.

## **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **8.1. Conclusiones.**

A partir de los resultados obtenidos en el estudio de las curvas IDF para las regiones de Valparaíso y de O'Higgins, es posible plantear las siguientes conclusiones:

- La metodología gráfica propuesta por Témez (1978), resultó ser adecuada para generar las curvas IDF de las regiones de Valparaíso y de O'Higgins, a partir de la información pluviográfica disponible.
- El modelo matemático propuesto por Aparicio (2004), arrojó excelentes resultados para su aplicación en las regiones de Valparaíso y de O'Higgins, ya que entregó una excelente calidad de ajuste, lo que se traduce en una estimación confiable de las intensidades máximas para una determinada duración y período de retorno.
- Las tendencias de las curvas IDF, en cuanto al tipo y forma de la gráfica, tanto para las estaciones de la Región de Valparaíso como para las de la Región de O'Higgins, no difieren mayormente una de otra, encontrándose sólo diferencias a nivel de escala de precipitaciones.
- Al analizar las curvas obtenidas en esta investigación, si bien sólo se apreciaron diferencias a nivel de escala, en los valores de intensidad máxima de precipitación, es necesario destacar que en el caso de dos estaciones de la Región de Valparaíso, Embalse Lliu-Lliu y Lago Peñuelas, se observaron valores sobresalientes de intensidad para una duración de 1 hora y un período de retorno de 100 años, que alcanzan los 32 y 37 mm/h, respectivamente. Esto, considerando que el promedio para el resto de las estaciones, es de aproximadamente 22 mm/h, incluyendo las estaciones de la Región de O'Higgins, constituye un antecedente destacable.

- A pesar de que no se cumplen todos los supuestos de regresión, en la generación de los modelos que permiten estimar la intensidad de precipitación para siete estaciones de las regiones de Valparaíso y de O'Higgins, la calidad de las estimaciones no se ve alterada, aunque ello lesiona las posibilidades de inferir más detalles de los parámetros en cada uno de los modelos.
- En el análisis comparativo de las máximas intensidades de precipitación, para diecinueve estaciones de las regiones de Valparaíso, Metropolitana, de O'Higgins y del Maule, no se aprecia ningún patrón característico relevante, ya sea por incrementos de la latitud o de la longitud.
- De las diecinueve estaciones analizadas desde la Región de Valparaíso hasta la Región del Maule, es importante destacar que gran parte de las mayores intensidades de precipitación, se registraron en estaciones que se ubican junto a cuerpos de agua, ya sea lagos o embalses. Lo anterior puede deberse a una mayor evaporación, por lo que no es recomendable extrapolar los modelos obtenidos en dichas estaciones a grandes distancias.
- A pesar de no encontrar un patrón específico que determine si las mayores intensidades ocurren a una mayor o menor latitud, queda en evidencia el hecho de que las intensidades de precipitación en la zona norte del área en estudio, regiones de Valparaíso y Metropolitana, manifiestan valores promedio muy similares a los de la zona sur, regiones de O'Higgins y del Maule, no obstante que en la zona norte precipita un monto casi tres veces menor que en la zona sur. Ello demuestra que en la zona norte existe una mayor probabilidad de encontrar eventos de alta intensidad.

**8.2. Recomendaciones.**

- Se recomienda la utilización de los modelos ajustados en esta investigación, para cada una de las estaciones estudiadas en la Región de Valparaíso.

- Estación Hacienda Pedernal, 
$$I = \frac{33.857 * T^{0.156134}}{D^{0.288966}}$$

- Estación Quillota, 
$$I = \frac{69.292 * T^{0.213196}}{D^{0.448790}}$$

- Estación Embalse Lliu-Lliu, 
$$I = \frac{77.895 * T^{0.186587}}{D^{0.380197}}$$

- Estación Lago Peñuelas, 
$$I = \frac{92.835 * T^{0.198809}}{D^{0.391538}}$$

- Asimismo, se recomienda el uso de los modelos ajustados en esta investigación, para cada estación estudiada en la Región de O'Higgins.

- Estación Rengo, 
$$I = \frac{68.682 * T^{0.137519}}{D^{0.437870}}$$

- Estación Central las Nieves, 
$$I = \frac{37.144 * T^{0.145826}}{D^{0.301489}}$$

- Estación Convento Viejo, 
$$I = \frac{72.088 * T^{0.126786}}{D^{0.429704}}$$

- Se recomienda utilizar los modelos matemáticos obtenidos en esta investigación, y señalados anteriormente, para extrapolar dicha información a zonas cercanas con regímenes climáticos similares.
- Se sugiere la utilización de los valores del parámetro  $k$ , que se encuentran contenidos en las tablas de uso práctico, para aquellas situaciones en que se cuente con datos de precipitación en 24 horas, es decir registros de estaciones pluviométricas, siempre y cuando se trate de puntos de medición cercanos a las estaciones seleccionadas en este estudio.
- Se recomienda complementar este estudio, considerando desarrollar las curvas IDF de otras estaciones pluviográficas presentes en las regiones de Valparaíso y de O'Higgins, lo que permitiría disponer de información similar a la entregada por esta investigación y así aumentar la posibilidad de determinar un patrón de comportamiento de las precipitaciones, para todo el territorio de las regiones aquí consideradas.
- Se recomienda incluir un mayor número de estaciones, tanto en las regiones incluidas en esta investigación, como en las analizadas en estudios anteriores, para evaluar de mejor manera la posible existencia de un patrón de distribución de las máximas intensidades de precipitación.
- Finalmente, se sugiere complementar y revisar este estudio en un plazo máximo de quince años, ya que transcurrido este período los resultados aquí expuestos podrían ser modificados por nuevos eventos de precipitación extremos.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- ABARZA, A. 2001. Análisis Comparativo de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), en seis Estaciones Pluviográficas distribuidas en la zona Cordillerana Andina y el Valle Central de la VII Región de Chile. Tesis para optar al Título de Ingeniero Forestal. Universidad de Talca, Chile. 105 p.
- APARICIO, F. 2003. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Undécima edición. Editorial Limusa S.A. México D.F., México. 303 p.
- ARAYA, S. 2003. Análisis de la Evaluación Temporal de los Caudales Punta Instantáneos en la Cuenca del Río Purapel, Séptima región. Tesis para optar al Título de Ingeniero Forestal. Universidad de Talca, Chile. 102 p.
- BEDIANT, P.; HUBER, W. 1992. Hidrology and Foodplain Analysis. Segunda edición. Editorial Addison-Wesley. Estados Unidos. 692 p.
- CANAVOS, G. 1994. Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos. Primera edición. Editorial Mc Graw-Hill. España.
- CHOW, V.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. 1994. Hidrología Aplicada. Primera edición. Editorial Mc Graw-Hill. Santa Fé de Bogotá, Colombia. 584 p.
- CONAMA. “Recursos Naturales de la Región de O’Higgins”. Consultado 12 abr. 2004. Disponible en: <http://www.conama.cl/portal/1255/article-26179.html>.
- CUADRAT, J.; PITA, M. 2000. Climatología. Segunda edición. Ediciones Cátedra. Madrid, España. 495 p.
- DE FRAJA, E. 1993. Saneamiento de la Cuenca Hidrológica del río Bío-Bío y del Area Costera Adyacente. Estudio de Prefactibilidad. Universidad de Concepción. Primera edición. Gráfica Andes Ltda.. Concepción, Chile. 600 p.

- DEPETTRIS, C.; PILAR, J. 2001. Trabajo a ser presentado en la Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2001. Secretaria General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste. Provincia del Chaco, Argentina.
- FERNÁNDEZ, F. 1995. Manual de Climatología Aplicada. Primera edición. Editorial Síntesis, S.A. Madrid, España. 285 p.
- GREENE, W. 2000. Econometric Analysis. Cuarta edición. Editorial Prentice-Hall Inc. New Jersey, Estados Unidos. 1.004 p.
- GOBIERNO REGIONAL DE VALPARAÍSO. “Territorio, Descripción General”. Consultado 15 abr. 2004. Disponible en:  
[http://www.gorevalparaiso.cl/modules.php?name=contenido\\_estatico&seccion=territorio\\_general](http://www.gorevalparaiso.cl/modules.php?name=contenido_estatico&seccion=territorio_general)
- GUJARATI, D. 2004. Econometría. Cuarta edición. Editorial Mc Graw-Hill. México. 972 p.
- JORDÁN, C. 2002. Análisis de los Coeficientes de Escorrentía para la Cuneca del Río Purapel, Estación Nirivilo, Período 1970-1990. Tesis para optar al Título de Ingeniero Forestal. Universidad de Talca, Chile. 112 p.
- LLAMAS, J. 1993. Hidrología General. Principios y Aplicaciones. Primera edición. Editorial de la Universidad del País Vasco. España. 635 p.
- LÓPEZ CADENAS, F. 1998. Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión. Tragsa, Tragsatec y Ministerio del Medio ambiente. Segunda edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 902 p.
- MAIDMENT, D. 1993. Handbook of Hidrology. Primera edición. Editorial Mc Graw-Hill. New York, Estados Unidos.

- MARTÍNEZ, A.; NAVARRO, J. 1996. Hidrología Forestal, el Ciclo Hidrológico. Segunda edición. Secretariado de Publicaciones, Univ. de Valladolid. España. 286p.
- MASON, R.; LIND, D. 1995. Estadística para Administración y Economía. Tercera edición. Editorial Iberoamericana. México D. F., México. 707 p.
- MEINZER, O. 1949. Hidrology. Primera edición. Ediciones Dover. New York, Estados Unidos. 712 p.
- MINTEGUIL, J.; LÓPEZ, F. 1990. La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Primera edición. Vitoria-Gasteiz, España. 306p.
- NOVALES, A. 1997. Estadística y Econometría. Primera edición. Editorial Mc Graw-Hill. Madrid, España. 638 p.
- PIZARRO, R.; NOVOA, P. 1986. Elementos Técnicos de Hidrología I. Instructivos Técnicos. Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura. La Serena, Chile. 57 p.
- ROMÁN, L. 2003. Análisis Comparativo de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), en cinco Estaciones Pluviográficas de la Región Metropolitana. Tesis para optar al Título de Ingeniero Forestal. Universidad de Talca, Chile. 121 p.
- ROSS, S. 2002. Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Segunda edición. Editorial Mc Graw-Hill. México. 585 p.
- TÉMEZ, J. 1978. Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid, España. 111 p.
- SHENG, T. 1992. Manual de Campo para la Ordenación de Cuencas Hidrográficas. Estudio y Planificación de Cuencas Hidrográficas. Guía de Conservación FAO 13/6. Roma, Italia. 185 p.

# APÉNDICES

## **APÉNDICE I**

### **Análisis de Regresión y Supuestos Estación Hacienda Pedernal**

## APÉNDICE I

### 1. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple, Estación Hacienda Pedernal (72 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple:  $Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	1.71426	0.0296674	57.7827	0.0000
a1	0.168358	0.0115823	14.5358	0.0000
a2	-0.376132	0.00903461	-41.6324	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	3.02445	2	1.51223	972.27	0.0000
Error	0.10732	69	0.00155536		
Total	3.13177	71			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 96.5732%

$R^2$  ajustado = 96.4739%

Error Estándar de Estimación = 0.039438

Error Absoluto = 0.0311751

Estadístico Durbin-Watson = 0.177091

Residuos Inusuales

Fila	Y	Y estimado	Residuos	Residuos Stand.
9	1.3057	1.38216	-0.0764562	-2.06
64	0.434966	0.530749	-0.0957824	-2.68

Puntos Influyentes

Fila	Influencia	Distancia	DFITS
1	0.105266	7.24966	-0.577933
7	0.0580171	3.32541	-0.441496
8	0.0636044	3.76881	-0.493338
9	0.0731983	4.54265	-0.579087
64	0.105266	7.24966	-0.919301
65	0.0718828	4.43559	-0.489149

## 2. Supuestos de Regresión, Estación Hacienda Pedernal (72 Datos)

### 2.1. Supuesto de Normalidad

#### Test de Kolmogorov Smirnov

Estimación Estadístico Kolmogorov DPLUS = 0.13045

Estimación Estadístico Kolmogorov DMINUS = 0.146316

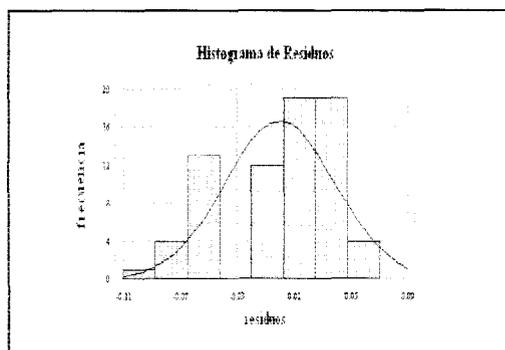
Estimación Completa Estadístico DN = 0.146316

Valor-p Aproximado = 0.0916636

Este test de Kolmogorov-Smirnov revela que existe normalidad de los residuos, por cuanto el valor-p (0.0916636) es mayor a  $\alpha$  (0.05).

En el histograma de frecuencias se observa una forma más o menos simétrica de los residuos, con una cola más o menos liviana en un extremo y con algunas irregularidades en la otra, sin que ello signifique falta de Normalidad.

Gráfico N°1



### 2.2. Supuesto de Homocedasticidad

#### Test Goldfeld Quandt ( $c = n/3 = 21$ ) ( $\alpha = 0.05$ )

Y v/s X1

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.0567966	1	0.0567966	1.26	0.2731
Residuos	0.988945	22	0.044952		
Total	1.04574	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.00354867	1	0.00354867	0.09	0.7707
Residuos	0.897003	22	0.0407729		
Total	0.900552	23			

K calculado =  $(SCR_2/G.I.)/(SCR_1/G.I.)$

K calculado = 0.90703

K tabla = 2.02

Y v/s /X2

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.0828509	1	0.0828509	18.34	0.0003
Residuos	0.0993922	22	0.00451783		
Total	0.182243	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.394806	1	0.394806	80.00	0.0000
Residuos	0.108574	22	0.00493518		
Total	0.50338	23			

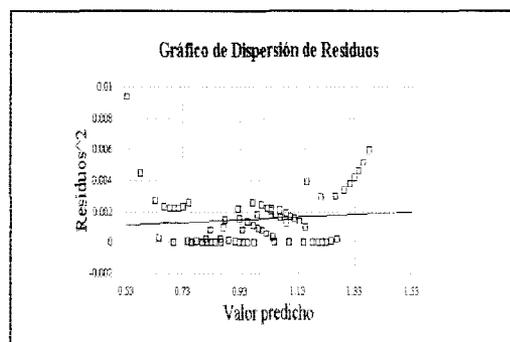
$$K \text{ calculado} = (SCR_2/G.I.) / (SCR_1/G.I.)$$

$$K \text{ calculado} = 1.09237$$

$$K \text{ tabla} = 2.02$$

Como el K calculado es menor que el K de tabla, existe una gran posibilidad de Homocedasticidad de los residuos. Además, en forma gráfica, no se observa un patrón de comportamiento de los residuos definido, lo que muestra que no existe heterocedasticidad.

Grafico N° 2



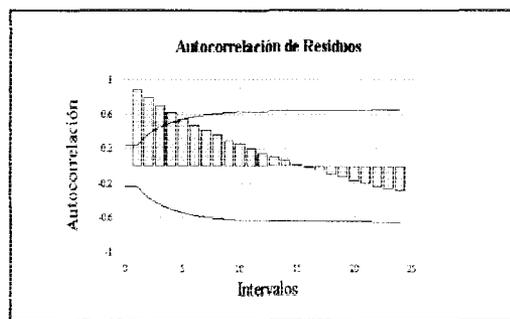
### 2.3. Supuesto de No-Autocorrelación

Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 0.177092$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$0 < d < dL$
$0 < 0.177 < 1.56$

El valor de  $d = 0.177$ , se encuentra dentro de la región de decisión Rechazar. Luego, existe Autocorrelación positiva de los residuos, que además se aprecia gráficamente. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Grafico N° 3



### 3. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple Transformado, Estación Hacienda Pedernal (71 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple Transformado:  $Y^*t = a_0 + a_1x_1^*t + a_2x_2^*t$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	0.135624	0.00463504	29.2605	0.0000
a1*	0.155325	0.00479233	32.4111	0.0000
a2*	-0.287781	0.0240328	-11.9745	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.16775	2	0.083875	801.71	0.0000
Error	0.00711419	68	0.00010462		
Total	0.174864	70			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 95.9316 %

$R^2$  ajustado = 95.8119 %

Error Estándar de Estimación = 0.0102284

Error Absoluto = 0.00705941

Estadístico Durbin-Watson = 1.58553

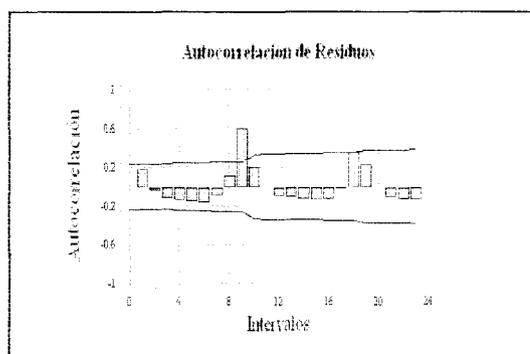
#### *Supuesto de No-Autocorrelación*

#### Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 1.586$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$dL \leq d \leq dU$
$1.56 \leq 1.585 \leq 1.67$

El valor de  $d = 1.586$ , se encuentra dentro de la región en que No hay decisión. Luego, pudiera existir Autocorrelación positiva y negativa de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Gráfico N° 4



#### 4. Análisis de Regresión del Segundo Modelo Lineal Múltiple Transformado, Estación Hacienda Pedernal (70 Datos)

Análisis de Regresión, Segundo Modelo Lineal Múltiple Transformado:

$$Y^{**t} = a_0 + a_1x_1^{**t} + a_2x_2^{**t}$$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	0.107382	0.00425825	25.2175	0.0000
a1**	0.156134	0.00514285	30.3594	0.0000
a2**	-0.288966	0.0279295	-10.3463	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.183193	2	0.0915963	927.32	0.0000
Error	0.00661793	67	0.0000987751		
Total	0.189811	69			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 96.5134 %

$R^2$  ajustado = 96.4093 %

Error Estándar de Estimación = 0.00993856

Error Absoluto = 0.00616925

Estadístico Durbin-Watson = 1.99343

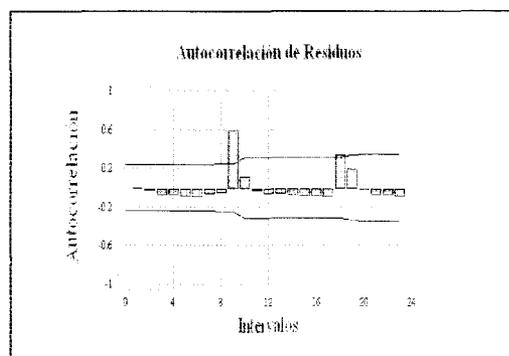
#### Supuesto de No-Autocorrelación

#### Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 1.993$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$dU < d < 4-dU$
$1.67 < 1.993 < 2.33$

El valor de  $d = 1.993$ , se encuentra dentro de la región de decisión No Rechazar. Luego, no existe Autocorrelación positiva o negativa de los residuos.

Gráfico N° 5



## **APÉNDICE II**

### **Análisis de Regresión y Supuestos Estación Quillota**

## APÉNDICE II

### 1. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple, Estación Quillota (72 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple:  $Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	1.95073	0.0570184	34.2124	0.0000
a1	0.21108	0.0222602	9.48241	0.0000
a2	-0.49112	0.0173638	-28.2841	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	5.11264	2	2.55632	444.95	0.0000
Residuos	0.396416	69	0.00574516		
Total	5.50906	71			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 92.8043%

$R^2$  ajustado = 92.5957 %

Error Estándar de Estimación = 0.0757968

Error Absoluto = 0.0661062

Estadístico Durbin-Watson = 0.108836

Residuos Inusuales

Fila	Y	Y estimado	Residuos	Residuos Stand.
9	1.35351	1.49961	-0.146096	-2.05

Puntos Influyentes

Fila	Influencia	Distancia	DFITS
1	0.105266	7.24966	-0.519942
6	0.0546545	3.06108	-0.415843
7	0.0580171	3.32541	-0.447677
8	0.0636044	3.76881	-0.496232
9	0.0731983	4.54265	-0.575541
64	0.105266	7.24966	-0.56211

## 2. Supuestos de Regresión, Estación Quillota (72 Datos)

### 2.1. Supuesto de Normalidad

#### Test de Kolmogorov Smirnov

Estimación Estadístico Kolmogorov DPLUS = 0.0971508

Estimación Estadístico Kolmogorov DMINUS = 0.1497

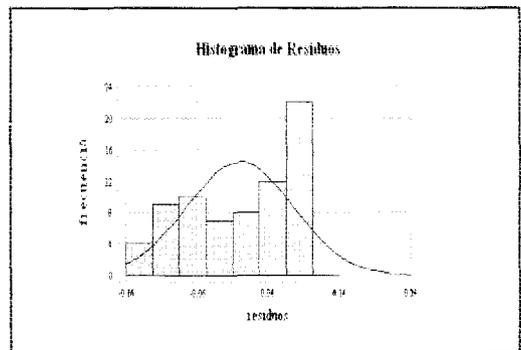
Estimación Completa Estadístico DN = 0.1497

Valor-p aproximado = 0.0793515

Este test revela que existe normalidad de los residuos, por cuanto el valor-p (0.079) es mayor a  $\alpha$  (0.05).

En el histograma de frecuencias se observa una forma aproximadamente simétrica de los residuos, con una cola liviana en un extremo y en el otro una cola con algunas irregularidades, sin que ello signifique falta de Normalidad.

Gráfico N° 1



### 2.2. Supuesto de Homocedasticidad

#### Test Goldfeld Quandt ( $c = n/3 = 21$ ) ( $\alpha = 0.05$ )

Y v/s X1

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.0951549	1	0.0951549	1.22	0.2806
Residuos	1.71069	22	0.0777586		
Total	1.80584	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.00504515	1	0.00504515	0.07	0.7965
Residuos	1.62921	22	0.0740549		
Total	1.63425	23			

K calculado =  $(SCR_2/G.I.) / (SCR_1/G.I.)$

K calculado = 0.9523701

K tabla = 2.02

## Y v/s /X2

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.075348	1	0.075348	10.48	0.0033
Residuos	0.152857	22	0.00694802		
Total	0.228204	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.781664	1	0.781664	109.37	0.0000
Residuos	0.157229	22	0.00714677		
Total	0.938893	23			

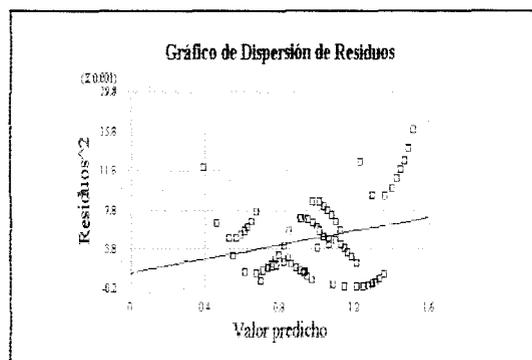
$$K \text{ calculado} = (SCR_2/G.l.) / (SCR_1/G.l.)$$

$$K \text{ calculado} = 1.0286019$$

$$K \text{ tabla} = 2.02$$

Como el K de tabla es mayor que el calculado, existe una gran posibilidad de Homocedasticidad de los residuos. Además, en forma gráfica, no se observa un patrón de comportamiento de los residuos definido, lo que muestra que no existe heterocedasticidad.

Gráfico N° 2



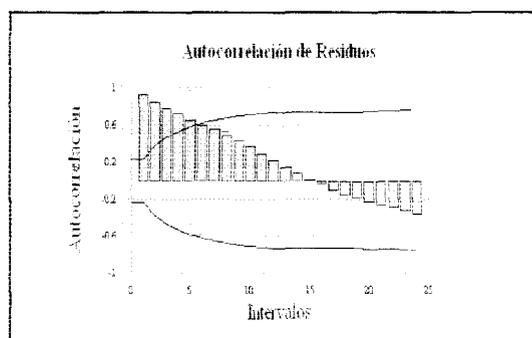
### 2.3. Supuesto de No-Autocorrelación

Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 0.109$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$0 < d < dL$
$0 < 0.109 < 1.56$

El valor de  $d = 0.109$ , se encuentra dentro de la región de decisión Rechazar. Luego, existe Autocorrelación positiva de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Gráfico N° 3



### 3. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple Transformado, Estación Quillota (71 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple Transformado:  $Y^*t = a_0 + a_1x_1^*t + a_2x_2^*t$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	0.0972137	0.00681034	14.2744	0.0000
a1*	0.207101	0.0111731	18.5356	0.0000
a2*	-0.415578	0.0617637	-6.72852	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.278467	2	0.139234	381.96	0.0000
Error	0.0247877	68	0.000364524		
Total	0.303255	70			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 91.8261%

$R^2$  ajustado = 91.5857 %

Error Estándar de Estimación = 0.0190925

Error Absoluto = 0.0112352

Estadístico Durbin-Watson = 1.66112

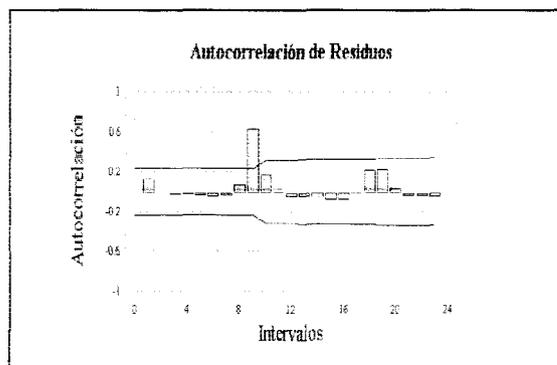
#### *Supuesto de No-Autocorrelación*

#### Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 1.661$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$dU < d < 4 - dU$
$1.67 < 1.661 < 2.33$

El valor de  $d = 1.661$ , se encuentra dentro de la región en que No hay decisión. Luego, pudiera existir Autocorrelación positiva y negativa de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Gráfico N° 4



#### 4. Análisis de Regresión del Segundo Modelo Lineal Múltiple Transformado, Estación Quillota (70 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple Transformado:

$$Y^{**t} = a_0 + a_1x_1^{**t} + a_2x_2^{**t}$$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	0.0832012	0.00619384	13.4329	0.0000
a1**	0.213196	0.0117516	18.1419	0.0000
a2**	-0.448791	0.0672366	-6.67481	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.304004	2	0.152002	430.27	0.0000
Error	0.0236692	67	0.000353271		
Total	0.327673	69			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 92.7766%

$R^2$  ajustado = 92.561 %

Error Estándar de Estimación = 0.0187955

Error Absoluto = 0.0100248

Estadístico Durbin-Watson = 1.97575

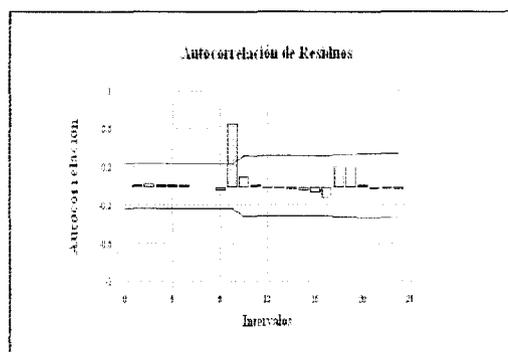
#### *Supuesto de No-Autocorrelación*

Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

d = 1.976
DL = 1.56
DU = 1.67
$dU < d < 4 - dU$
$1.67 < 1.979 < 2.33$

El valor de  $d = 1.976$ , se encuentra dentro de la región de decisión No Rechazar. Luego, no existe Autocorrelación positiva o negativa de los residuos.

Gráfico N° 5



## **APÉNDICE III**

### **Análisis de Regresión y Supuestos Estación Embalse Lliu-Lliu**

## APÉNDICE III

### 1. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple, Estación Embalse Lliu-Lliu (72 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple:  $Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	1.89151	0.0327298	57.7915	0.0000
a1	0.186587	0.0127779	14.6024	0.0000
a2	-0.380197	0.00996723	-38.1447	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	3.15806	2	1.57903	834.12	0.0000
Residuos	0.13062	69	0.00189304		
Total	3.28868	71			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 96.0282%

$R^2$  ajustado = 95.9131%

Error Estándar de Estimación = 0.0435091

Error Absoluto = 0.0378777

Estadístico Durbin-Watson = 0.138775

Residuos Inusuales

Fila	Y	Y estimado	Residuos	Residuos Stand.
9	1.50202	1.58863	-0.0866148	-2.12
64	0.611447	0.706675	-0.0952279	-2.39

Puntos Influyentes

Fila	Influencia	Distancia	DFITS
7	0.0580171	3.32541	-0.434742
8	0.0636044	3.76881	-0.496062
9	0.0731983	4.54265	-0.595659
64	0.105266	7.24966	-0.820359
65	0.0718828	4.43559	-0.43751

## 2. Supuestos de Regresión, Estación Embalse Lliu-Lliu (72 Datos)

### 2.1. Supuesto de Normalidad

#### Test de Kolmogorov Smirnov

Estimación Estadístico Kolmogorov DPLUS = 0.106912

Estimación Estadístico Kolmogorov DMINUS = 0.177683

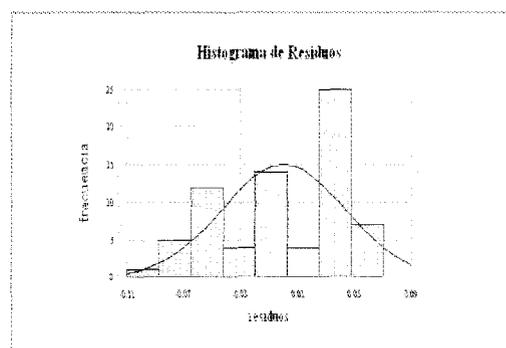
Estimación Completa Estadístico DN = 0.177683

Valor-p aproximado = 0.0212136

Este test revela que no existe normalidad de los residuos, por cuanto el valor-p (0.021) es menor a  $\alpha$  (0.05).

En el histograma de frecuencias se observa igualmente la falta de normalidad de los residuos, ya que no existe ninguna simetría y aparecen notorias desviaciones en una de las colas.

Gráfico N° 1



### 2.2. Supuesto de Homocedasticidad

#### Test Goldfeld Quandt ( $c = n/3 = 21$ ) ( $\alpha = 0.05$ )

Y v/s X1

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.0716336	1	0.0716336	1.55	0.2265
Residuos	1.01777	22	0.0462622		
Total	1.0894	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.00417201	1	0.00417201	0.10	0.7552
Residuos	0.920749	22	0.0418522		
Total	0.924921	23			

K calculado =  $(SCR_2/G.l.) / (SCR_1/G.l.)$

K calculado = 0.90467

K tabla = 2.02

Y v/s /X2

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.102258	1	0.102258	19.47	0.0002
Residuos	0.115535	22	0.00525158		
Total	0.217793	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.478196	1	0.478196	82.43	0.0000
Residuos	0.127624	22	0.00580108		
Total	0.60582	23			

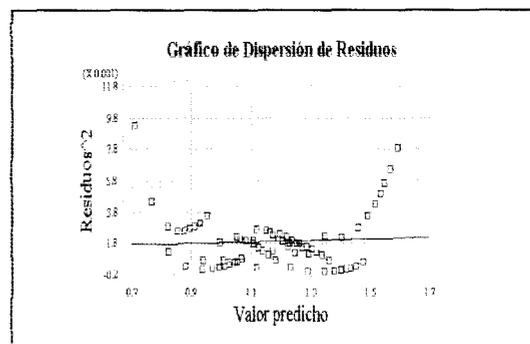
$$K \text{ calculado} = (SCR_2/G.I.) / (SCR_1/G.I.)$$

$$K \text{ calculado} = 1.10463$$

$$K \text{ tabla} = 2.02$$

Como el K de tabla es mayor que el calculado, existe una gran posibilidad de Homocedasticidad de los residuos. Además, en forma gráfica, no se observa un patrón de comportamiento de los residuos definido, lo que muestra que no existe heterocedasticidad.

Gráfico N°2



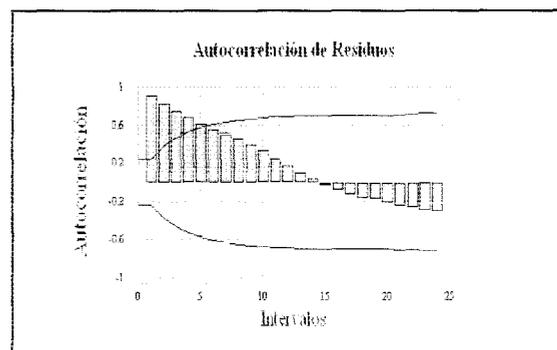
### 2.3. Supuesto de No-Autocorrelación

Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 0.139$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$0 < d < dL$
$0 < 0.139 < 1.56$

El valor de  $d = 0.139$ , se encuentra dentro de la región de decisión Rechazar. Luego, existe Autocorrelación positiva de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Gráfico N° 3



## **APÉNDICE IV**

### **Análisis de Regresión y Supuestos Estación Lago Peñuelas**

## APÉNDICE IV

### 1. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple, Estación Lago Peñuelas (72 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple:  $Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	1.96771	0.0394777	49.8437	0.0000
a1	0.198809	0.0154123	12.8994	0.0000
a2	-0.391538	0.0120222	-32.568	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	3.37944	2	1.68972	613.54	0.0000
Residuos	0.190031	69	0.00275407		
Total	3.56947	71			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 94.6762 %

$R^2$  ajustado = 94.5219 %

Error Estándar de Estimación. = 0.0524793

Error Absoluto = 0.0441779

Estadístico Durbin-Watson = 0.153655

Residuos Inusuales

Fila	Y	Y estimado	Residuos	Residuos Stand.
64	0.645396	0.75219	-0.106795	-2.21

Puntos Influyentes

Fila	Influencia	Distancia	DFITS
1	0.105266	7.24966	-0.449172
7	0.0580171	3.32541	-0.409364
8	0.0636044	3.76881	-0.462463
9	0.0731983	4.54265	-0.549251
64	0.105266	7.24966	-0.758438
65	0.0718828	4.43559	-0.453144
71	0.0636044	3.76881	-0.427333
72	0.0731983	4.54265	-0.494091

## 2. Supuestos de Regresión, Estación Lago Peñuelas (72 Datos)

### 2.1. Supuesto de Normalidad

#### Test de Kolmogorov Smirnov

Estimación Estadístico Kolmogorov DPLUS = 0.121599

Estimación Estadístico Kolmogorov DMINUS = 0.18078

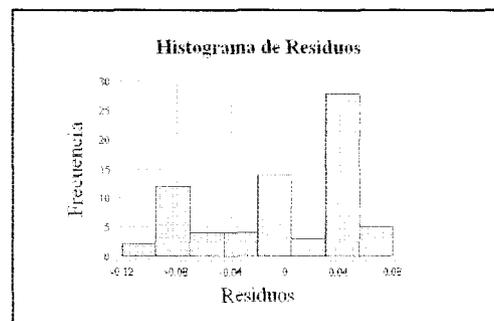
Estimación Completa Estadístico DN = 0.18078

Valor-p Aproximado = 0.0180791

Este test revela que no existe normalidad de los residuos, por cuanto el valor-p (0.018) es menor a  $\alpha$  (0.05).

En el histograma de frecuencias se observa igualmente la falta de normalidad de los residuos, ya que no hay evidencia de simetría y aparecen profundas desviaciones en una de las colas.

Gráfico N° 1



### 2.2. Supuesto de Homocedasticidad

#### Test Goldfeld Quandt ( $c = n/3 = 21$ ) ( $\alpha = 0.05$ )

Y v/s X1

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.0828646	1	0.0828646	1.65	0.2117
Residuos	1.10165	22	0.0500748		
Total	1.18451	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.00460718	1	0.00460718	0.10	0.7548
Residuos	1.01308	22	0.0460491		
Total	1.01769	23			

K calculado =  $(SCR_2/G.l.) / (SCR_1/G.l.)$

K calculado = 0.85527

K tabla = 2.02

## Y v/s /X2

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.0854936	1	0.0854936	14.54	0.0010
Residuos	0.129372	22	0.00588053		
Total	0.214865	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.60138	1	0.60138	98.26	0.0000
Residuos	0.134652	22	0.00612055		
Total	0.736032	23			

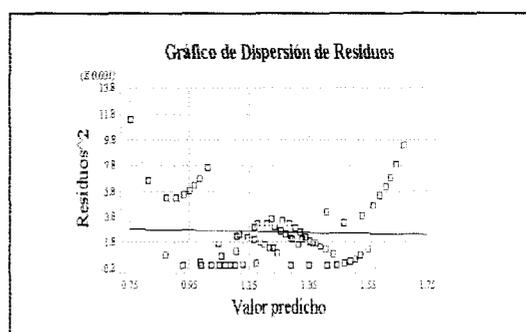
$$K \text{ calculado} = (SCR_2/G.l.) / (SCR_1/G.l.)$$

$$K \text{ calculado} = 1.04081$$

$$K \text{ tabla} = 2.02$$

Como el K de tabla es mayor que el calculado, existe una gran posibilidad de Homocedasticidad de los residuos. Además, en forma gráfica, no se observa un patrón de comportamiento de los residuos definido, lo que muestra que no existe heterocedasticidad.

Gráfico N° 2



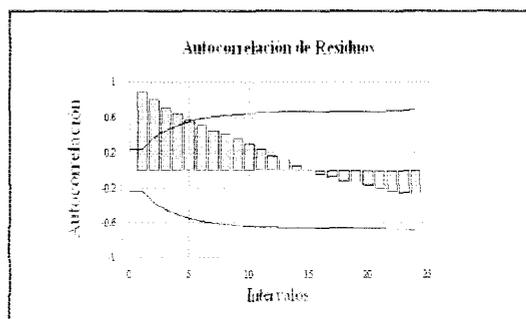
### 2.3. Supuesto de No-Autocorrelación

Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 0.154$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$0 < d < dL$
$0 < 0.154 < 1.56$

El valor de  $d = 0.154$ , se encuentra dentro de la región de decisión Rechazar. Luego, existe Autocorrelación positiva de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación

Gráfico N° 3



## **APÉNDICE V**

### **Análisis de Regresión y Supuestos Estación Rengo**

## APÉNDICE V

### 1. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple, Estación Rengo (72 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple:  $Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
<b>Constante</b>	1.82449	0.0112938	161.548	0.0000
<b>a1</b>	0.138792	0.00440915	31.4783	0.0000
<b>a2</b>	-0.434546	0.00343931	-126.347	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
<b>Modelo</b>	3.82152	2	1.91076	8477.24	0.0000
<b>Residuos</b>	0.0155525	69	0.000225399		
<b>Total</b>	3.83708	71			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 99.5947%

$R^2$  ajustado = 99.5829%

Error Estándar de Estimación = 0.0150133

Error Absoluto = 0.0122338

Estadístico Durbin-Watson = 0.386495

Residuos Inusuales

Fila	Y	Y estimado	Residuos	Residuos Stnd.
64	0.370957	0.418237	-0.04728	-3.61

Puntos Influyentes

Fila	Influencia	Distancia	DFITS
10	0.0834619	5.38843	-0.519596
64	0.105266	7.24966	-1.23739
65	0.0718828	4.43559	-0.553546

## 2. Supuestos de Regresión, Estación Rengo (72 Datos)

### 2.1. Supuesto de Normalidad

#### Test de Kolmogorov Smirnov

Estimación Estadístico Kolmogorov DPLUS = 0.0878905

Estimación Estadístico Kolmogorov DMINUS = 0.110145

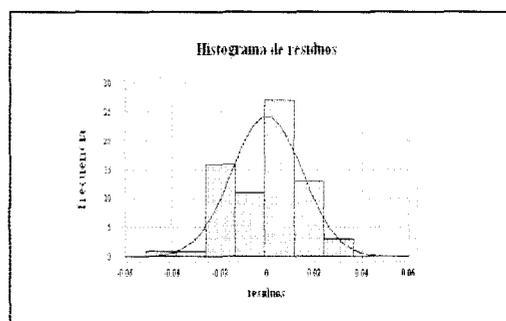
Estimación Completa Estadístico DN = 0.110145

Valor-p Aproximado = 0.349511

Este test revela que existe normalidad de los residuos, por cuanto el valor-p (0.349511) es mayor a  $\alpha$  (0.05)

En el histograma de frecuencias se observa una forma más o menos simétrica de los residuos, con una cola más o menos liviana en un extremo y en la otra con una pequeña desviación, sin que ello signifique falta de Normalidad.

Gráfico N° 1



### 2.2. Supuesto de Homocedasticidad

Test Goldfeld Quandt ( $c = n/3 = 21$ ) ( $\alpha = 0.05$ )

Y v/s /X1

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.0367881	1	0.0367881	0.66	0.4245
Residuos	1.22211	22	0.0555503		
Total	1.25889	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.00258544	1	0.00258544	0.05	0.8291
Residuos	1.19155	22	0.0541615		
Total	1.19414	23			

K calculado =  $(SCR_2/G.I.)/(SCR_1/G.I.)$

K calculado = 0.97499

K tabla = 2.02

Y v/s X2

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.322056	1	0.322056	95.75	0.0000
Residuos	0.073964	22	0.003362		
Total	0.39602	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.408134	1	0.408134	129.35	0.0000
Residuos	0.0694134	22	0.00315516		
Total	0.477548	23			

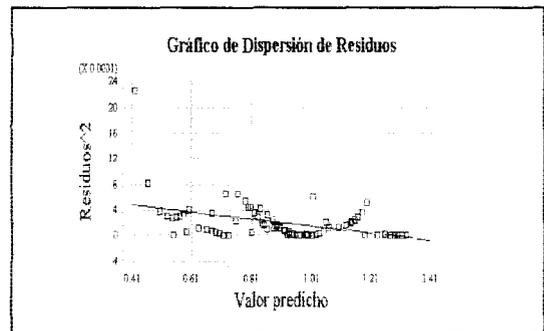
$$K \text{ calculado} = (SCR_2/G.l.) / (SCR_1/G.l.)$$

$$K \text{ calculado} = 0.93848$$

$$K \text{ tabla} = 2.02$$

Como el K de tabla es mayor que el calculado, existe una gran posibilidad de Homocedasticidad de los residuos. Además, en forma gráfica, no se observa un patrón de comportamiento de los residuos definido, lo que muestra que no existe heterocedasticidad.

Gráfico N° 2



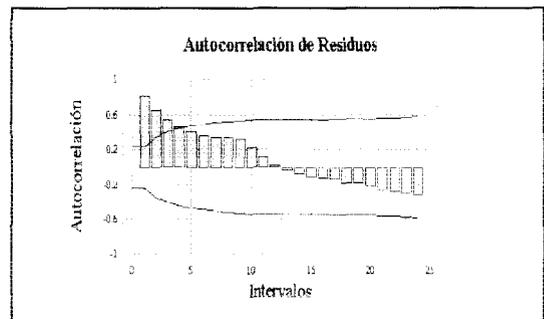
### 2.3. Supuesto de No-Autocorrelación

Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 0.386$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$0 < d < dL$
$0 < 0.386 < 1.56$

El valor de  $d = 0.386$ , se encuentra dentro de la región de decisión Rechazar. Luego, existe Autocorrelación positiva de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Gráfico N° 3



### 3. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple Transformado, Estación Rengo (71 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple Transformado:  $Y^*t = a_0 + a_1x_1^*t + a_2x_2^*t$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	0.351042	0.002669574	131.498	0.0000
a1*	0.135047	0.00173254	77.9476	0.0000
a2*	-0.42761	0.00588388	-72.6748	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.18227	2	0.0911352	3694.93	0.0000
Error	0.00167722	68	0.000024665		
Total	0.183948	70			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 99.0882%

$R^2$  ajustado = 99.0614%

Error Estándar de Estimación = 0.00496638

Error Absoluto = 0.00365455

Estadístico Durbin-Watson = 1.07317

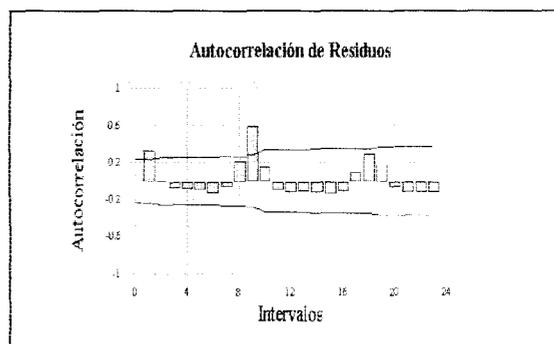
#### *Supuesto de No-Autocorrelación*

#### Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 1.073$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$0 < d < dL$
$0 < 1.073 < 1.56$

El valor de  $d = 1.073$ , se encuentra dentro de la región de decisión Rechazar. Luego, existe Autocorrelación positiva de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Gráfico N° 4



#### 4. Análisis de Regresión del Segundo Modelo Lineal Múltiple Transformado, Estación Rengo (70 Datos)

Análisis de Regresión, Segundo Modelo Lineal Múltiple Transformado:

$$Y^{**t} = a_0 + a_1x_1^{**t} + a_2x_2^{**t}$$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	0.190467	0.00215043	88.5714	0.0000
a1**	0.137519	0.00178069	77.2279	0.0000
a2**	-0.43787	0.00900767	-48.6108	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.118351	2	0.0591756	3193.61	0.0000
Error	0.00124147	67	0.0000185294		
Total	0.119593	69			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 98.9619%

$R^2$  ajustado = 98.9309%

Error Estándar de Estimación = 0.00430458

Error Absoluto = 0.0027651

Estadístico Durbin-Watson = 1.83225

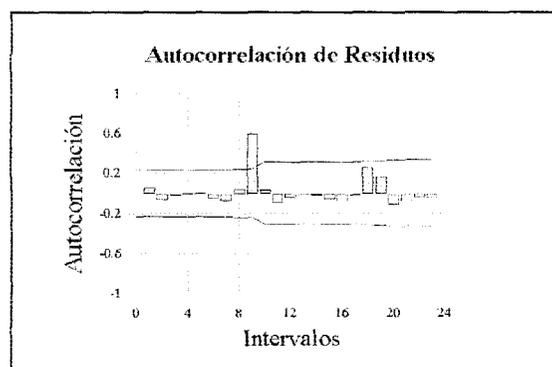
#### *Supuesto de No-Autocorrelación*

#### Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 1.832$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$dU < d < 4-dU$
$1.67 < 1.832 < 2.33$

El valor de  $d = 1.832$ , se encuentra dentro de la región de decisión No Rechazar. Luego, no existe Autocorrelación positiva o negativa de los residuos.

Gráfico N° 5



## **APÉNDICE VI**

### **Análisis de Regresión y Supuestos Estación Central las Nieves**

## APÉNDICE VI

### 1. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple, Estación Central Las Nieves (72 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple:  $Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	1.60404	0.0231557	69.272	0.0000
a1	0.150268	0.0090401	16.6224	0.0000
a2	-0.319017	0.00705163	-45.2402	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	2.20107	2	1.10054	1161.49	0.0000
Residuos	0.065379	69	0.000947522		
Total	2.26645	71			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 97.1154%

$R^2$  ajustado = 97.0317%

Error Estándar de Estimación = 0.0307818

Error Absoluto = 0.025251

Estadístico Durbin-Watson = 0.393797

Residuos Inusuales

Fila	Y	Y estimado	Residuos	Residuos Stand.
64	0.507613	0.605472	-0.0978591	-3.65
65	0.581631	0.650707	-0.0690762	-2.41

Puntos Influyentes

Fila	Influencia	Distancia	DFITS
9	0.0731983	4.54265	-0.483762
64	0.105266	7.24966	-1.25144
65	0.0718828	4.43559	-0.670437
66	0.054131	3.0201	-0.434647
72	0.0731983	4.54265	-0.440688

## 2. Supuestos de Regresión, Estación Central las Nieves (72 Datos)

### 2.1. Supuesto de Normalidad

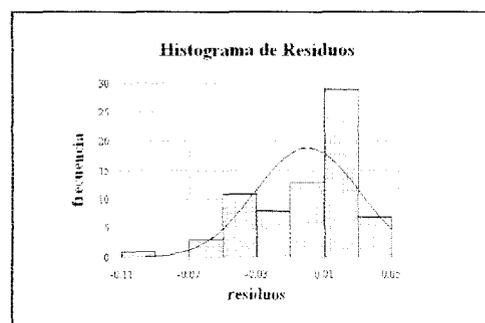
#### Test de Kolmogorov Smirnov

Estimación Estadístico Kolmogorov DPLUS = 0.111226  
 Estimación Estadístico Kolmogorov DMINUS = 0.156248  
 Estimación Completa Estadístico DN = 0.156248  
 Valor-p Aproximado = 0.0594644

Este test revela que existe normalidad de los residuos, por cuanto el valor-p (0.059464) es mayor a  $\alpha$  (0.05).

A pesar de tratarse de un valor-p muy cercano a  $\alpha$ , en el histograma de frecuencias se observa una forma más o menos simétrica de los residuos, con una cola más o menos liviana en un extremo y en la otra con algunas irregularidades, sin que ello signifique falta de Normalidad.

Gráfico N°1



### 2.2. Supuesto de Homocedasticidad

Test Goldfeld Quandt ( $c = n/3 = 21$ ) ( $\alpha = 0.05$ )

Y v/s X1

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.0441308	1	0.044791	1.27	0.2716
Residuos	0.763559	22	0.0347072		
Total	0.80769	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.00292936	1	0.00292936	0.11	0.7463
Residuos	0.600207	22	0.0272821		
Total	0.603136	23			

$$K \text{ calculado} = (SCR_2/G.I.) / (SCR_1/G.I.)$$

$$K \text{ calculado} = 0.78606$$

$$K \text{ tabla} = 2.02$$

Y v/s /X2

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.117515	1	0.117515	45.34	0.0000
Residuos	0.0570228	22	0.00259194		
Total	0.174538	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.37582	1	0.37582	79.84	0.0000
Residuos	0.103553	22	0.00470695		
Total	0.479373	23			

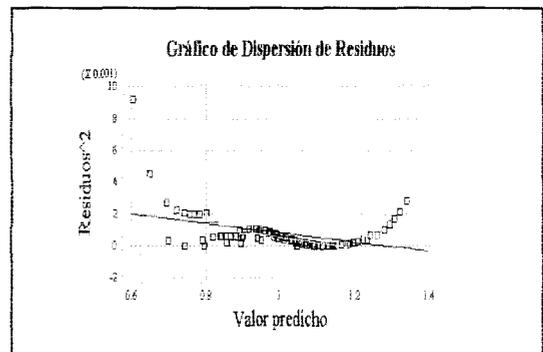
K calculado =  $(SCR_2/G.l)/(SCR_1/G.l)$

K calculado = 1.81599

K tabla = 2.02

Como el K de tabla es mayor que el calculado, existe una gran posibilidad de Homocedasticidad de los residuos. Además, en forma gráfica, no se observa un patrón de comportamiento de los residuos definido, lo que muestra que no existe heterocedasticidad.

Gráfico N° 2



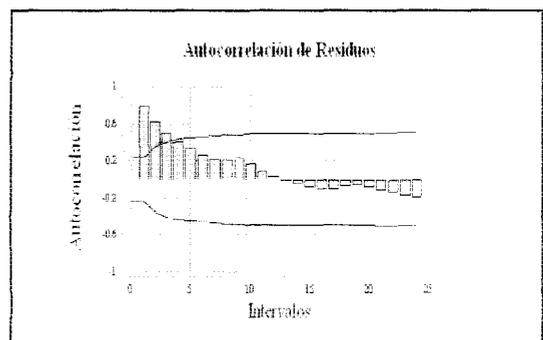
### 2.3. Supuesto de No-Autocorrelación

Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 0.394$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$0 < d < dL$
$0 < 0.394 < 1.56$

El valor de  $d = 0.394$ , se encuentra dentro de la región de decisión Rechazar. Luego, existe Autocorrelación positiva de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Gráfico N° 3



### 3. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple Transformado, Estación Central las Nieves (71 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple Transformado:  $Y^*t = a_0 + a_1x_1^*t + a_2x_2^*t$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	0.305142	0.00432357	70.5765	0.0000
a1*	0.142697	0.00278745	51.1926	0.0000
a2*	-0.29099	0.00933811	-31.1616	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.170042	2	0.085021	1320.63	0.0000
Error	0.00437777	68	0.0000643789		
Total	0.17442	70			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 97.4901%

$R^2$  ajustado = 97.4163%

Error Estándar de Estimación = 0.00802365

Error Absoluto = 0.00602174

Estadístico Durbin-Watson = 1.25216

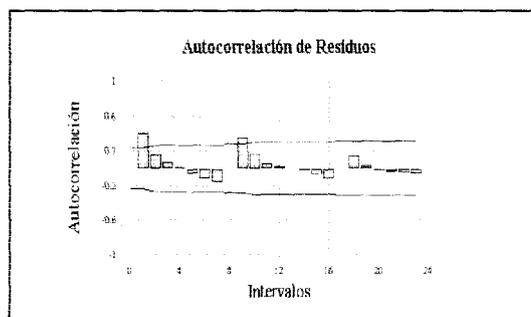
#### *Supuesto de No-Autocorrelación*

#### Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 1.252$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$0 < d < dL$
$0 < 1.252 < 1.56$

El valor de  $d = 1.252$ , se encuentra dentro de la región de decisión Rechazar. Luego, existe Autocorrelación positiva de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Gráfico N° 4



#### 4. Análisis de Regresión del Segundo Modelo Lineal Múltiple Transformado, Estación Central las Nieves (70 Datos)

Análisis de Regresión, Segundo Modelo Lineal Múltiple Transformado:  
 $Y^{**t} = a_0 + a_1x_1^{**t} + a_2x_2^{**t}$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	0.19353	0.00385014	50.2656	0.0000
a1**	0.145826	0.002883	50.5815	0.0000
a2**	-0.301489	0.0135171	-22.3042	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.168197	2	0.0840987	1517.26	0.0000
Error	0.00371368	67	0.0000554281		
Total	0.171911	69			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 97.8398%

$R^2$  ajustado = 97.7753%

Error Estándar de Estimación = 0.007445

Error Absoluto = 0.0050635

Estadístico Durbin-Watson = 1.91099

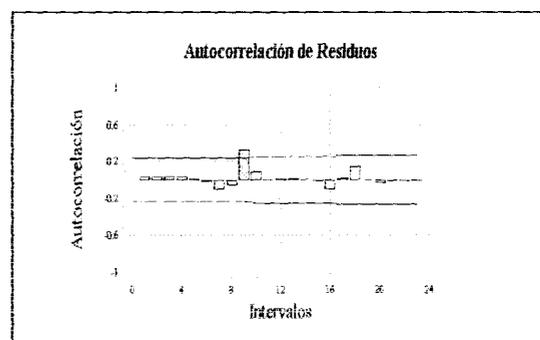
*Supuesto de No-Autocorrelación*

Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 1.911$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$dU < d < 4-dU$
$1.67 < 1.911 < 2.33$

El valor de  $d = 1.911$ , se encuentra dentro de la región de decisión No Rechazar. Luego, no existe Autocorrelación positiva o negativa de los residuos.

Gráfico N° 5



## **APÉNDICE VII**

### **Análisis de Regresión y Supuestos Estación Convento Viejo**

## APÉNDICE VII

### 1. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple, Estación Convento Viejo (72 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple:  $Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	1.87034	0.0111048	168.427	0.0000
a1	0.132025	0.00433534	30.4533	0.0000
a2	-0.438747	0.00338174	-129.74	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	3.87018	2	1.93509	8879.96	0.0000
Error	0.0150362	69	0.000217917		
Total	3.88522	71			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 99.613%

$R^2$  ajustado = 99.6018%

Error Estándar de Estimación = 0.014762

Error Absoluto = 0.0119232

Estadístico Durbin-Watson = 0.644869

Residuos Inusuales

Fila	Y	Y estimado	Residuos	Residuos Stand.
18	1.19318	1.22215	-0.0289725	-2.06
64	0.396443	0.44482	-0.0483762	-3.78

Puntos Influyentes

Fila	Influencia	Distancia	DFITS
18	0.0513939	2.80657	-0.479967
64	0.105266	7.24966	-1.29797
65	0.0718828	4.43559	-0.4792

## 2. Supuestos de Regresión: Estación Convento Viejo (72 Datos)

### 2.1. Supuesto de Normalidad

#### Test de Kolmogorov Smirnov

Estimación Estadístico Kolmogorov DPLUS = 0.0795302

Estimación Estadístico Kolmogorov DMINUS = 0.095464

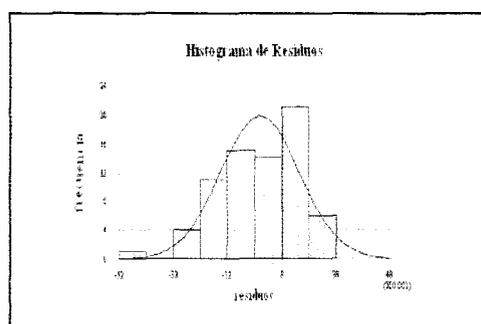
Estimación Completa Estadístico DN = 0.0954639

Valor-p Aproximado = 0.543632

Este test revela que existe normalidad de los residuos, por cuanto el valor-p (0.543632) es mayor a  $\alpha$  (0.05)

En el histograma de frecuencias se observa una forma más o menos simétrica de los residuos, con una cola más o menos liviana en un extremo, sin que ello signifique falta de Normalidad.

Gráfico N° 1



### 2.2. Supuesto de Homocedasticidad

Test Goldfeld Quandt ( $c = n/3 = 21$ ) ( $\alpha = 0.05$ )

Y v/s X1

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.0330339	1	0.0330339	0.57	0.4569
Residuos	1.26725	22	0.0576021		
Total	1.30028	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.00236847	1	0.00236847	0.04	0.8368
Residuos	1.19938	22	0.0545173		
Total	1.20175	23			

K calculado =  $(SCR_2/G.l.) / (SCR_1/G.l.)$

K calculado = 0.94644

K tabla = 2.02

Y v/s /X2

Análisis de Varianza. Recta 1 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.355048	1	0.355048	118.37	0.0000
Residuos	0.0659884	22	0.00299947		
Total	0.421037	23			

Análisis de Varianza. Recta 2 (24 valores)

Fuente	S. De Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.368999	1	0.368999	109.72	0.0000
Residuos	0.0739871	22	0.00336305		
Total	0.442986	23			

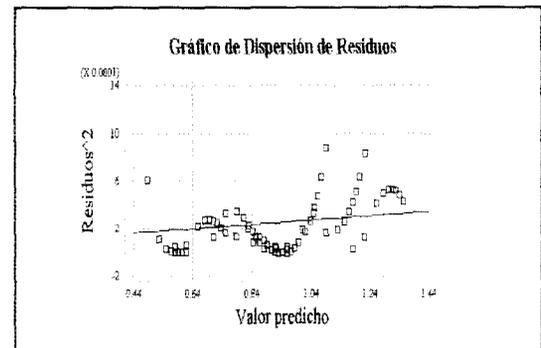
K calculado =  $(SCR_2/G.I.)/(SCR_1/G.I.)$

K calculado = 1.12121

K tabla = 2.02

Como el K de tabla es mayor que el calculado, existe una gran posibilidad de Homocedasticidad de los residuos. Además, en forma gráfica, no se observa un patrón de comportamiento de los residuos definido, lo que muestra que no existe heterocedasticidad.

Gráfico N° 2



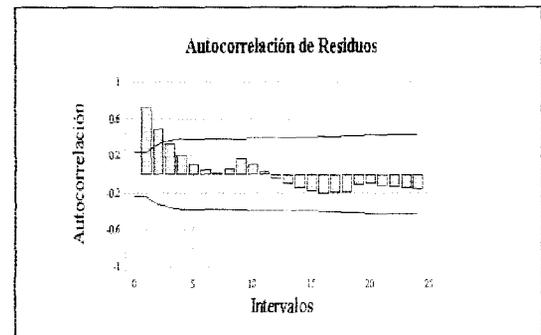
### 2.3. Supuesto de No-Autocorrelación

Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 0.645$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$0 < d < dL$
$0 < 0.645 < 1.56$

El valor de  $d = 0.645$ , se encuentra dentro de la región de decisión Rechazar. Luego, existe Autocorrelación positiva de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Gráfico N° 3



### 3. Análisis de Regresión del Modelo Lineal Múltiple Transformado, Estación Convento Viejo (71 Datos)

Análisis de Regresión, Modelo Lineal Múltiple Transformado:  $Y^*t = a_0 + a_1x_1^*t + a_2x_2^*t$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	0.601739	0.00357569	168.286	0.0000
a1*	0.126621	0.00204698	61.8573	0.0000
a2*	-0.432858	0.00449993	-96.1922	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.l	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.398482	2	0.199241	5107.66	0.0000
Error	0.00265256	68	0.0000390083		
Total	0.401134	70			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 99.3387 %

$R^2$  ajustado = 99.3193 %

Error Estándar de Estimación = 0.00624566

Error Absoluto = 0.00509864

Estadístico Durbin-Watson = 0.853431

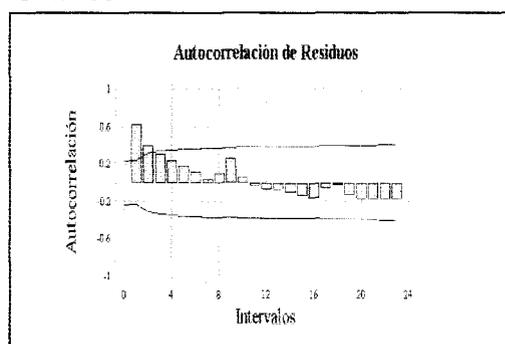
#### *Supuesto de No-Autocorrelación*

#### Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )

$d = 0.853$
$dL = 1.56$
$dU = 1.67$
$0 < d < dL$
$0 < 0.854 < 1.56$

El valor de  $d = 0.853$ , se encuentra dentro de la región de decisión Rechazar. Luego, existe Autocorrelación positiva de los residuos. No se cumple el supuesto de No-Autocorrelación.

Gráfico N° 4



#### 4. Análisis de Regresión del Segundo Modelo Lineal Múltiple Transformado, Estación Convento Viejo (70 Datos)

Análisis de Regresión, Segundo Modelo Lineal Múltiple Transformado:

$$Y^{**t} = a_0 + a_1x_1^{**t} + a_2x_2^{**t}$$

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor -p
Constante	0.255609	0.00272139	93.926	0.0000
a1**	0.126786	0.0018569	68.2782	0.0000
a2**	-0.429704	0.00844143	-50.9042	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	S. de Cuadrados	G.I	Cuadrados Medios	F	Valor -p
Modelo	0.123071	2	0.0615355	2337.46	0.0000
Error	0.00176383	67	0.0000263258		
Total	0.124835	69			

Coefficiente de Determinación ( $R^2$ ) = 98.5871 %

$R^2$  ajustado = 98.5449 %

Error Estándar de Estimación = 0.00513087

Error Absoluto = 0.00339394

Estadístico Durbin-Watson = 2.03254

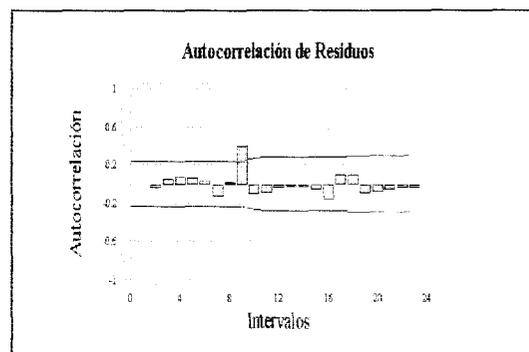
**Supuesto de No-Autocorrelación**

**Prueba de Durbin-Watson ( $\alpha = 0.05$ )**

d = 2.033
dL = 1.56
dU = 1.67
dU < d < 4-dU
1.67 < 2.033 < 2.33

El valor de  $d = 2.033$ , se encuentra dentro de la región de decisión No Rechazar. Luego, no existe Autocorrelación positiva o negativa de los residuos.

**Gráfico N° 5**



# **ANEXOS**

## **ANEXO I**

### **Test de Goldfeld-Quandt**

## ANEXO I

### Test de Goldfeld-Quandt Procedimiento de Aplicación

La aplicación de este estadístico consta de 7 pasos, que se detallan a continuación:

**PASO 1:** Construir una tabla con los datos de origen X e Y.

**PASO 2:** Ordenar los datos de menor a mayor según la magnitud de la variable X.

**PASO 3:** Omitir las “c” observaciones centrales ( $c = n/3$ , donde n es el número total de datos).

**PASO 4:** Ajustar 2 rectas de regresión lineal simple independientes ( $R_1$  y  $R_2$ ), donde  $R_1$  y  $R_2$  corresponden a los grupos de varianzas pequeñas y grandes, respectivamente.

**PASO 5:** Calcular la suma de cuadrados de los residuos de cada una de las rectas ( $SCR_1$  y  $SCR_2$ ).

**PASO 6:** Calcular  $k = \frac{SCE_2/g.l.}{SCE_1/g.l.}$ , que se distribuye como una prueba F de Snedecor con  $[(n - c)/2 - 2]$  grados de libertad (g.l.), tanto para el numerador como para el denominador.

**PASO 7:** Comparar el valor  $k$  de tabla con el valor  $k$  calculado. Si el  $k$  de tabla es mayor que el  $k$  calculado, se asume que para un nivel de confianza dado no existe heterocedasticidad de las varianzas.

## **ANEXO II**

### **Test de Durbin-Watson**

## ANEXO II

### Test de Durbin-Watson Reglas de Decisión de la prueba

Tabla N° 1: Reglas de decisión de la prueba  $d$  de Durbin-Watson.

Hipótesis Nula ( $H_0$ )	Decisión	Si
No hay autocorrelación positiva	Rechazar	$0 < \mathbf{d} < d_L$
No hay autocorrelación positiva	Sin decisión	$d_L \leq \mathbf{d} \leq d_U$
No hay correlación negativa	Rechazar	$4 - d_U < \mathbf{d} < 4$
No hay correlación negativa	Sin decisión	$4 - d_U \leq \mathbf{d} \leq 4 - d_L$
No hay autocorrelación, positiva o negativa	No rechazar	$d_U < \mathbf{d} < 4 - d_U$

Fuente: Gujarati, 2003.

## **ANEXO III**

### **Método Iterativo ó Método $\rho$**

## ANEXO III

### Método Iterativo o Método $\rho$ Procedimiento de Aplicación

La aplicación de este método consta de 5 pasos, que se detallan a continuación:

**PASO 1:** Determinar  $\rho$ , donde  $\rho = (1 - d/2)$ , donde  $d$  = indicador matemático de Durbin-Watson.

**PASO 2:** Transformar las variables:

Se tiene el modelo original (1)  $Y_t = a_0 + a_1 X_{1t} + a_2 X_{2t}$ .

Si la expresión (1) se cumple para  $t$ , también se cumple para  $t - 1$ .

Luego, se tiene la expresión (2)  $Y_{t-1} = a_0 + a_1 X_{1t-1} + a_2 X_{2t-1}$ .

Ahora, multiplicando (2) por  $\rho$  queda:

$$(3) \quad \rho Y_{t-1} = \rho a_0 + \rho a_1 X_{1t-1} + \rho a_2 X_{2t-1}$$

Restando (1) con (3), se obtiene lo siguiente:

$$Y^*t = a_0^* + a_1^* X_{1^*t} + a_2^* X_{2^*t}$$

Donde:  $a_0^* = a_0(1 - \rho)$ ,  $Y^*t = (Y_t - \rho Y_{t-1})$ ,  $X_{1^*t} = (X_{1t} - \rho X_{1t-1})$ ,  $X_{2^*t} = (X_{2t} - \rho X_{2t-1})$ .

**PASO 3:** Correr la regresión lineal  $Y^*t$  v/s  $X_{1^*t}$ ,  $X_{2^*t}$ .

**PASO 4:** Determinar los coeficientes de regresión originales ( $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$ ), donde:  
 $a_0 = a_0^*/(1 - \rho)$ ,  $a_1 = a_1^*$  y  $a_2 = a_2^*$ .

**PASO 5:** Verificar la no-autocorrelación de los modelos (Test de Durbin-Watson). Si persiste este problema se debe iterar el procedimiento nuevamente, ya que existen modelos con autocorrelación mayor a primer orden.

## **ANEXO IV**

### **Prueba U de Mann-Whitney**

## ANEXO IV

### Prueba U de Mann-Whitney Procedimiento de Aplicación

La aplicación de este estadístico consta de 6 pasos, que se detallan a continuación:

**PASO 1:** Ordenar todas las observaciones, de ambas poblaciones ( $n_a$  y  $n_b$ ), de acuerdo a su magnitud, de menor a mayor.

**PASO 2:** Asignar un valor ordinal a cada una de las observaciones ya ordenadas.

**PASO 3:** Calcular  $RA$  y  $RB$ , que corresponden a la suma de los rangos para las muestras A y B, respectivamente.

**PASO 4:** Determinar  $UA$  y  $UB$ , a partir de las siguientes ecuaciones:

$$UA = n_a \times n_b + n_a \times \frac{(n_a + 1)}{2} - RA$$

$$UB = n_a \times n_b + n_b \times \frac{(n_b + 1)}{2} - RB$$

**PASO 5:** Determinar el estadístico  $Z_c$ , a partir de la siguiente ecuación:

$$Z_c = \frac{U - E(U)}{\sqrt{Var(U)}}$$

Donde:

$U$  = valor más pequeño entre  $UA$  y  $UB$ .

$$E(U) = \frac{n_a \times n_b}{2} \qquad Var(U) = n_a \times n_b \times \frac{(n_a + n_b + 1)}{12}$$

**PASO 6:** Por último, se establece la regla de decisión en la cual se acepta  $H_0$  (ambas muestras provienen de la misma población) a un nivel de significancia  $\alpha$ , si  $Z_c$  se encuentra entre los valores críticos de  $Z_t$ .