



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

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INFORMÁTICO DE
SIMULACIÓN PARA EL DISEÑO DE OBRAS DE
CONSERVACIÓN DE AGUAS Y SUELOS PARA LAS REGIONES
DE COQUIMBO y MAULE**

JOSEFINA DEL CARMEN LÓPEZ NEIRA

Tesis para optar al título de INGENIERO FORESTAL

Profesor Guía: Dr. Ing. ROBERTO PIZARRO TAPIA

TALCA – CHILE

2012

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. | OBJETIVOS..... | 3 |
| 2.1. | Objetivo General | 3 |
| 2.2. | Objetivo específico..... | 3 |
| 3. | REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 3.1. | Erosión Hídrica | 4 |
| 3.2. | El Rol de las Obras de Conservación de Aguas y Suelos | 5 |
| 3.2.1. | Bancales | 6 |
| 3.2.2. | Bordos semicirculares o barreiros | 7 |
| 3.2.3. | Canal de desviación..... | 7 |
| 3.2.4. | Colectores de piedra | 8 |
| 3.2.5. | Diques transversales | 9 |
| 3.2.6. | Empalizadas..... | 10 |
| 3.2.7. | Estanques de captación del agua | 11 |
| 3.2.8. | Fajinas | 11 |
| 3.2.9. | Limanos | 12 |
| 3.2.10. | Muretes..... | 13 |
| 3.2.11. | Surcos en contorno..... | 13 |
| 3.2.12. | Terrazas | 14 |
| 3.2.13. | Tratamiento lineal..... | 14 |
| 3.2.14. | Zanjas de infiltración | 15 |
| 3.3. | Diseño Hidrológico de las Obras | 16 |
| 3.3.1. | Zanjas de infiltración | 16 |
| 3.3.2. | Canales de desviación..... | 18 |
| 3.3.3. | Terrazas de infiltración..... | 23 |
| 3.4. | Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) | 26 |
| 3.4.1. | Ajuste de Gumbel..... | 26 |
| 3.4.2. | Pruebas de bondad del ajuste..... | 27 |
| 3.4.3. | Probabilidad de excedencia y período de retorno | 28 |
| 3.4.4. | Determinación gráfica..... | 29 |
| 3.4.5. | Determinación matemática de las curvas IDF..... | 30 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.5. | Índice de Tormenta | 31 |
| 3.6. | Investigaciones Relacionadas | 34 |
| 4. | ANTECEDENTES GENERALES | 38 |
| 4.1. | Región de Coquimbo..... | 38 |
| 4.1.1. | Clima | 38 |
| 4.1.2. | Relieve | 38 |
| 4.1.3. | Vegetación..... | 39 |
| 4.2. | Región del Maule | 39 |
| 4.2.1. | Clima | 40 |
| 4.2.2. | Relieve | 40 |
| 4.2.3. | Vegetación..... | 40 |
| 5. | MATERIALES Y MÉTODOS..... | 41 |
| 5.1. | Revisión bibliográfica | 41 |
| 5.2. | Captura de Información Base | 41 |
| 5.3. | Curvas IDF | 42 |
| 5.3.1. | Curvas IDF existentes..... | 42 |
| 5.3.2. | Construcción de Curvas IDF | 44 |
| 5.4. | Cartografía Base | 48 |
| 5.5. | Análisis del Simulador EIAS y Nuevos Requerimientos | 48 |
| 5.6. | Programación definitiva..... | 49 |
| 5.7. | Calibración de variables y Validación técnica | 50 |
| 5.8. | Presentación de resultados | 51 |
| 5.9. | Análisis y discusión..... | 51 |
| 5.10. | Conclusión y recomendaciones | 51 |
| 5.11. | Materiales | 52 |
| 6. | PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS | 53 |
| 6.1. | Información Base..... | 53 |
| 6.1.1. | Curvas IDF Obtenidas por las Estaciones Pluviométricas | 53 |
| 6.1.2. | Parámetros | 58 |
| 6.2. | Simulador EIAS..... | 60 |
| 6.2.1. | Interfaz..... | 61 |
| 6.2.2. | Menú principal..... | 62 |
| 6.2.3. | Barra de herramientas | 63 |

| | | |
|--------|--------------------------------------|----|
| 6.2.4. | Ingreso de datos..... | 63 |
| 6.2.5. | Resultados de dimensiones..... | 64 |
| 6.2.6. | Salidas | 64 |
| 6.2.7. | Ayudas | 67 |
| 6.2.8. | Diseños | 68 |
| 6.2.9. | Parámetros | 70 |
| 6.3. | Intensidad..... | 71 |
| 6.3.1. | Estación más cercana..... | 71 |
| 6.3.2. | Serie propia | 73 |
| 6.3.3. | Pruebas..... | 75 |
| 7. | ANÁLISIS Y DISCUSIÓN | 76 |
| 7.1. | Software | |
| 7.2. | Información Base | |
| 7.2.1. | Índice de Tormenta | |
| 8. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 83 |
| 9. | BIBLIOGRAFÍA..... | 88 |

Apéndice i: Diagramas de flujo

Apéndice ii: Capturas del simulador EIAS

Anexo i: Precipitaciones

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura N° 1: Bancal | 6 |
| Figura N° 2: Barreiro utilizado para cultivo agrícola | 7 |
| Figura N° 3: Canal de desviación | 8 |
| Figura N° 4: Esquema colector de piedra..... | 8 |
| Figura N° 5: Dique de mampostería en seco..... | 9 |
| Figura N° 6: Canal recubierto con empalizada..... | 10 |
| Figura N° 7: Empalizada de bambú..... | 10 |
| Figura N° 8: Estanque de agua..... | 11 |
| Figura N° 9: Esquema fajinas vista de perfil..... | 11 |
| Figura N° 10: Fajina utilizada para proteger un talud | 12 |
| Figura N° 11: Limán de piedra..... | 12 |
| Figura N° 12: Murete de piedra | 13 |
| Figura N° 13: Surcos en contorno | 13 |
| Figura N° 14: Miniterraza de piedra..... | 14 |
| Figura N° 15: tratamiento lineal con bolsas de arena..... | 15 |
| Figura N° 16: Zanjas de infiltración..... | 15 |
| Figura N° 17: Diseño Zanjas de infiltración trapezoidal | 16 |
| Figura N° 18: Diseño canal de desviación trapezoidal..... | 19 |
| Figura N° 19: Esquema diseño terraza de infiltración | 23 |
| Figura N° 20: Esquema infiltración de agua en terrazas | 25 |
| Figura N° 21: equipo pluviográfico y su banda milimétrica..... | 26 |
| Figura N° 22: Representación gráfica Curvas IDF | 30 |
| Figura N° 23: Diagrama de flujo de datos para un diseño de obras | 50 |
| Figura N° 24: Interfaz usuario | 61 |
| Figura N° 25: Ventana de cálculo intensidad utilizando serie propia de datos | 73 |
| Figura N° 26: Interfaz usuario | 61 |
| Figura N° 27: Documento de texto generado por el simulador | 65 |
| Figura N° 28: Reporte para ser enviado a la impresora | 66 |
| Figura N° 29: Vista de la ventana de ayuda..... | 67 |
| Figura N° 30: Ventana para el cálculo de zanjas..... | 68 |
| Figura N° 31: Ventana para el cálculo de canales | 69 |
| Figura N° 32: Ventana para el cálculo de terrazas | 730 |
| Figura N° 33: Ventana para la obtención de parámetros | 731 |
| Figura N° 34: Ventana de cálculo de la intensidad con estación más cercana | 732 |
| Figura N° 35: Ventana de cálculo intensidad utilizando serie propia de datos | 733 |
| Figura N° 36: Ventana de cálculo intensidad utilizando serie propia de datos | 734 |
| Figura N° 37: Gráfico de todas las intensidades pluviográficas | 739 |
| Figura N° 38: Gráfico de todas las estaciones pluviográficas..... | 80 |

| | |
|---|----|
| Figura N° 39: Gráfico de apariencia de las Curvas IDF..... | 81 |
| Figura N° 40: Gráfico de todas las estaciones pluviométricas | 82 |
| Figura N° 41: distanciamiento de zanjas con distintos valores de intensidad de lluvia | 83 |
| Figura N° 42: base de zanjas con distintos valores de intensidad de lluvia | 84 |
| Figura N° 43: Altura de zanjas con distintos valores de intensidad de lluvia | 85 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Tabla N° 1: Intensidades a diferentes horarios y períodos de retorno de estación Curicó | 29 |
| Tabla N° 2: Estac. Pluviométrica Tabla N° 3: Estac. pluviográfica | 31 |
| Tabla N° 4: Índice de Tormenta..... | 32 |
| Tabla N° 5: Intensidades obtenidas con el Índice de Tormenta..... | 33 |
| Tabla N° 6: Estaciones Pluviográficas Región de Coquimbo..... | 42 |
| Tabla N° 7: Estaciones Pluviográficas Región del Maule..... | 43 |
| Tabla N° 8: Estaciones Pluviográficas Región del Maule..... | 43 |
| Tabla N° 9: Estaciones Pluviométricas Región de Coquimbo | 44 |
| Tabla N° 10: Estaciones Pluviométricas Región del Maule..... | 46 |
| Tabla N° 11: Estación patrón y funciones región de Coquimbo | 53 |
| Tabla N° 12: Estación patrón y funciones región del Maule..... | 55 |
| Tabla N° 13: Coeficiente de escorrentía..... | 58 |
| Tabla N° 14: Coeficiente de rugosidad | 58 |
| Tabla N° 15: Velocidad de infiltración mínima..... | 59 |
| Tabla N° 16: Velocidad de infiltración promedio..... | 60 |
| Tabla N° 17: Velocidad de diseño..... | 60 |
| Tabla N° 18: Cálculo de distanciamiento | 83 |
| Tabla N° 19: Cálculo de base | 60 |
| Tabla N° 20: Cálculo de la altura..... | 60 |

RESUMEN

La presente memoria pretende mejorar una herramienta que facilite el cálculo de las dimensiones físicas de obras de conservación de aguas y suelos. En este caso, zanjas de infiltración, canales de desviación y terrazas de infiltración.

El software llamado Simulador EIAS, fue creado como un programa ejecutable, utilizando el lenguaje *visual basic* de *visual studio 2003* para su programación. Su interfaz es típica del ambiente *Windows* y su esquema principal es ingresar una serie de variables que originen un resultado final.

El desarrollo se inicia con el análisis de la primera versión de este simulador, la que funcionaba *on-line*, ingresando a la página *web* del grupo que lleva su mismo nombre. Esto arrojó como deficiencias una interfaz poco amigable, resultados erróneos y ayuda insuficiente, entre otras. Sobre las novedades están el diseño trapezoidal de las zanjas, la incorporación de las terrazas de infiltración como nuevo diseño y la creación de mapas más detallados para elegir una estación, sumado a una nueva oferta de estaciones e intensidades.

Sobre este último punto, se amplió significativamente el número de estaciones disponibles con datos de una hora, utilizando el método del índice de tormenta para extrapolar datos de las estaciones pluviográficas a las pluviométricas. La información que hizo posible este trabajo, fue proporcionada por la Dirección General de Aguas, a quien se solicitó las precipitaciones mensuales máximas en 24 horas para todas las estaciones pluviométricas de las regiones de Coquimbo y el Maule.

El resultado final es un programa descargable desde internet, que además de calcular las dimensiones físicas de todas estas obras, ofrece alternativas para obtener los parámetros exigidos, con datos sólidos y confiables para el componente más importante en el cálculo, que es la intensidad de lluvia. La operación finaliza con la posibilidad de guardar y/o generar un reporte para imprimirlo.

SUMMARY

This work has the objective to improve a simulation tool facilitate the calculation of the physical dimensions of works of soil and water conservation. In this case, infiltration trenches, deviation channels and infiltration terraces.

The software called EIAS Simulator, was created as an executable program using the visual basic language from visual studio 2003. Its interface is typical of the Windows environment and its main scheme is to enter a set of variables that will originate a final result.

The development begins with the analysis of the first version of this simulator, which worked on-line by entering to the website of the group that bears the same name. This threw out as deficiencies an unfriendly interface, erroneous results and insufficient help, among others. Concerning the new developments are the design of trapezoidal ditches, the incorporation of the infiltration terraces as a new design and the creation of more detailed maps to choose a station, plus a new offer of stations and intensities.

About this last point, an important goal reached was to increase the number of available stations with data from one hour, using the index storm method to extrapolate data from rain gauge stations with continuous data to rain gauge stations with data each 24 hours only. The information that made possible to carry out this work was provided by the Dirección General de Aguas, which supplied all the information monthly rainfall for Coquimbo and Maule regions in Chile.

Final result is a program available for download from the Internet, for carrying out the calculations of physical dimensions from all these works, and also offers alternatives to get the required parameters, with robust and reliable

data for the most important component in the calculation, which is the intensity of rain. The operation ends with the possibility to save and/or generate a report for printing.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de disminuir el impacto de la erosión de los suelos en Chile, es una urgencia, especialmente porque este recurso no es renovable y se ha utilizado indiscriminadamente, lo que ha terminado por degradarlo sustancialmente en algunos casos. Por otra parte, la erosión se asocia a la falta de una cobertura vegetal eficiente, que proteja al suelo del impacto de las gotas de lluvia. En este marco, las laderas de los cerros se convierten en un peligro al estar descubiertas de vegetación, pudiendo abalanzarse el material suelto hacia viviendas y zonas de interés en un evento de lluvia torrencial, lo que define situaciones de riesgo potencial a la población involucrada; por el contrario, estas laderas podrían convertirse en una zona de cultivos o de captación de aguas, si se recurre a la construcción de obras que detengan la escorrentía y hagan infiltrar la precipitación.

Según Ciren (2010), en Chile la superficie total de suelos con algún grado de erosión alcanza el 49,1%. Los mayores porcentajes de erosión severa y muy severa se encuentran en el norte del país, respondiendo en gran medida a causas geológicas gracias a su topografía montañosa y fuertes intensidades de lluvia, mientras que en la zona central y sur, es el hombre el que ha dañado su propio suelo producto de las actuaciones agrícolas y el uso no sustentable de este terreno.

Suárez (1980) dice que es necesario diseñar obras de defensa de los suelos que impliquen el encauzamiento de aguas de escorrentía, teniendo en cuenta que la principal función de dichas obras, será desempeñada en cortos períodos en los cuales ocurren aguaceros intensos. De esta forma, son estas estructuras las que se hacen cargo de las escorrentías máximas, haciéndose indispensable proveerse de diseños con estándares de ingeniería que eviten desbordamientos que se traduzcan en mal funcionamiento, costosas reparaciones o pérdida total del trabajo ejecutado.

La obtención de los estándares de ingeniería, es una tarea costosa y muchas veces difícil de aplicar, por la carencia de información válida y de conocimientos técnicos para la obtención de tal información. Por ello, es importante contar con herramientas computacionales que fomenten los diseños, considerando para ello aspectos hidrológicos, hidráulicos y edáficos, de tal manera que se obtengan valores de diseños ajustados a la realidad local de forma rápida y empleando diseños de ingeniería. Tal fue el caso del simulador EIAS, desarrollado en la Universidad de Talca en el año 2005, para el diseño eficiente de zanjas de infiltración y canales de desviación de aguas. En este caso, esta investigación pretende aportar una nueva versión de este simulador, incorporando mayores niveles de capacidad y ductilidad para la que éste originalmente fue creado.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Establecer un sistema de simulación que entregue las dimensiones físicas de obras de conservación de aguas y suelos en base a criterios de ingeniería hidrológica.

2.2. Objetivo específico

Entregar a usuarios remotos vía web, una herramienta de simulación mejorada y actualizada (Simulador EIAS), que calcule las dimensiones físicas de zanjas de infiltración, canales de desviación y terrazas de infiltración.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Erosión Hídrica

Según Donoso (1994), el suelo se origina a partir de una roca madre transformada a través del tiempo, gracias a la acción del clima y diversos organismos. A su vez, la topografía y la vegetación actúan modificando la humedad y creando pequeños microclimas. Suárez de Castro (1980) señala a la lluvia y a la temperatura como los elementos del clima que más afectan la evolución de los suelos.

En cuanto a este último punto, Porta *et al.* (2003) definen la erosión como, “una pérdida gradual del material que constituye el suelo, al ir siendo arrastradas las partículas a medida que van quedando en la superficie”. Pizarro *et al.* (2005), indica que estas partículas son trasladadas principalmente por acción del agua (escorrentía), lo que se conoce como *erosión hídrica*.

Thompson (1965), asegura que existe una estrecha relación entre la erosión, la lluvia caída en exceso y la capacidad de absorción del suelo. Un terreno con pendiente pronunciada, poca vegetación y suelo impermeable, producirá altos niveles de escorrentía al enfrentar una larga e intensa lluvia (Foster 1967). Sin embargo, cuando existe cobertura vegetal, ésta le brinda rugosidad al suelo, reduciendo la velocidad del flujo del agua (Morgan, 2005 citado por UNESCO *et al.*, 2010). En cuanto a la velocidad de infiltración, dependerá de cómo se unan y ordenan las partículas primarias (arena, limo y arcilla (Pizarro, 1996).

La erosión hídrica puede ocurrir de diferentes formas. Las más comunes son la erosión por salpicadura o erosión laminar, la erosión por surcos o en regueros, la erosión por cárcavas y la erosión en bancos aluviales.

La erosión por salpicadura, comienza con la caída de las primeras gotas de lluvia que impactan fuertemente en el suelo, disgregando sus partículas. Estas gotas son mayores a 0.5 mm y se forman en nubes que pueden llegar a tener dimensiones verticales de 10 km (Mauro, 2002). Cuando la lluvia logra remover capas delgadas de suelo, se le llama erosión laminar.

Si el agua comienza a escurrir por pequeñas irregularidades en la pendiente del terreno, adquiriendo suficiente velocidad, puede formar surcos transportando el material a canales o regueros.

La erosión en barrancos o cárcavas se produce cuando los surcos aumentan considerablemente su profundidad y llevan consigo el arrastre de suelo y piedras. Con el tiempo se libera el material suelto desde las zonas altas, volviéndolas inestables y peligrosas, produciéndose la erosión en bancos aluviales.

3.2. El Rol de las Obras de Conservación de Aguas y Suelos

Una alternativa para frenar o disminuir la erosión de los suelos, son las obras de conservación. Ellas actúan principalmente deteniendo el escurrimiento y disminuyendo con esto la erosión hídrica. El efecto se manifiesta de inmediato, tanto en el aumento de la infiltración de agua en el suelo, como en su humedad, posibilitando el desarrollo de la vegetación.

Estas obras, captan el agua proveniente de las lluvias, lo que también recibe el nombre de “cosecha de agua”. Esto puede hacerse con fines productivos para algunos cultivos, en donde el agua capturada se considera como una forma de riego que se incorpora al suelo sin ningún control ni calendarización (Critchley *et al.*, 1991). Así mismo, el término “cosecha de agua” es una mala traducción del inglés *runoff-harvesting*, dado que imprime la idea de que éste es un proceso fácil y accesible de realizar. Quizás y según Pizarro *et al.* (2005), el término más adecuado es “captación de aguas lluvias”,

que tendría su acepción en inglés en el término “*wáter catchment*”, y que da la idea de un proceso más trabajoso que debe ser realizado de forma previa a una posterior captura y uso del agua.

Según Pizarro *et al.*, (2003), las obras de conservación de aguas y suelos se clasifican en dos grupos según su función. Las primeras tienen por objetivo proteger la ladera, deteniendo la escorrentía y generando condiciones para el desarrollo de alguna especie arbustiva o arbórea. Las segundas, protegen los cauces, suavizando su pendiente y disminuyendo el tiempo de concentración de la cuenca.

A continuación se muestran las obras más utilizadas, extraídas del libro “Revisión y análisis de prácticas tradicionales de conservación de aguas y suelos en zonas áridas y semiáridas de Chile Central” (Pizarro *et al.*, 2003).

3.2.1. Bancales

Es una pequeña terraza semicircular (figura N°1), usada para plantaciones forestales o agrícolas, con dimensiones de 1,2 m de diámetro y 0,5 m de ancho. Los bancales protegen la ladera, dando origen a un suelo más fértil, lo que permite instalar en él alguna especie arbórea.



Figura N° 1: Bancaal
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.2. Bordos semicirculares o barreiros

Son pequeños diques de tierra en forma de semicírculo (figura N°2), ubicados en la curva de nivel. Se utilizan principalmente para la rehabilitación de pastizales, producción de forraje y en algunos casos, para el cultivo de árboles y arbustos en zonas semiáridas. El radio de los bordos varía entre 6 y 20 m. La altura se recomienda de 25 cm con pendiente lateral (taludes) de 1/1.

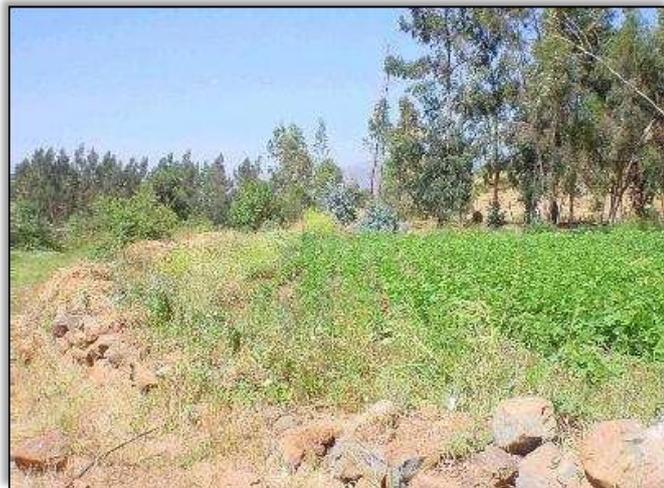


Figura N° 2: Barreiro utilizado para cultivo agrícola
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.3. Canal de desviación

Son estructuras que tienen como objetivo interceptar, desviar y conducir el agua de escorrentía, que proviene de las zonas altas, hacia drenajes debidamente protegidos o hacia estructuras de almacenamiento de agua (figura N°3). Su construcción se hace siguiendo la curva de nivel, con una pequeña pendiente.



Figura N° 3: Canal de desviación
Fuente: Pizarro *et al.* (2005)

3.2.4. Colectores de piedra

Son obras ubicadas en zonas de concentración del flujo superficial, que tienen como propósito regular la velocidad de escurrimiento. Corresponden a un foso cilíndrico, relleno de bolones de piedra (figura N°4), con una vía de ingreso del agua y otra de evacuación ubicada aguas abajo.

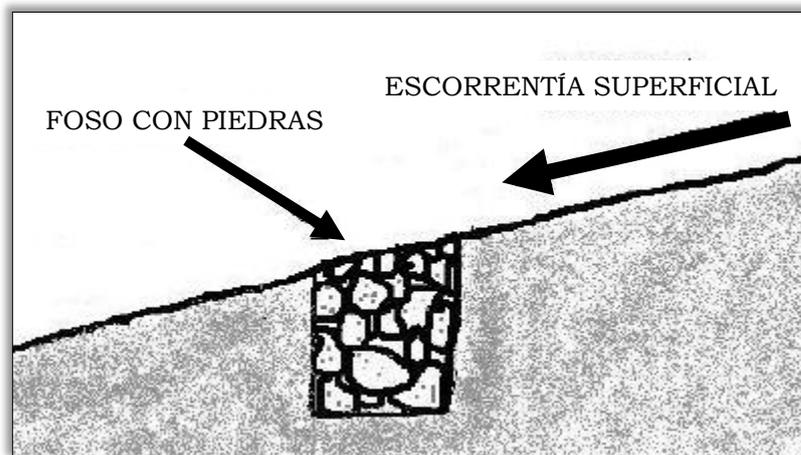


Figura N° 4: Esquema colector de piedra
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.5. Diques transversales

Son estructuras más complejas, ubicadas en forma perpendicular al eje del cauce y están orientadas a controlar los procesos de transporte sólido y de erosión en el lecho y sus márgenes. Estas estructuras deben estar debidamente ancladas y poseen vertedero de caudales en exceso y colchón amortiguador o disipador de energía. Su diseño obedece a cálculos hidrológicos e hidráulicos y dependiendo del tamaño de la quebrada o cárcava y de acuerdo a los requerimientos hidráulicos, éstos pueden ser diques de gravedad o diques de anclaje.

Dependiendo de los materiales empleados para su construcción, se clasifican en diques de mampostería en seco (figura N°5), diques de mampostería gavionada, diques de mampostería hidráulica y diques de concreto armado. Éstos se usan en ríos y quebradas torrenciales. También, existen estructuras hechas de postes y otras de sacos de tierra, que no responden a un diseño de mecánica y por lo tanto, se usan para cauces de poca envergadura como las pequeñas cárcavas y regueros.



Figura N° 5: Dique de mampostería en seco
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.6. Empalizadas

Son estructuras de polines generalmente impregnados y pueden ser de dos tipos; por un lado, están las empalizadas longitudinales, cuya función es la protección de taludes en laderas (figura N°6) y, por otro, las empalizadas transversales (figura N°7), cuya función es la protección de quebradas y cursos de agua. Estas últimas se diferencian de los diques de polines en que no presentan vertedero.



Figura N° 6: Canal recubierto con empalizada
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)



Figura N° 7: Empalizada de bambú
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.7. Estanques de captación del agua

Son estructuras construidas para almacenar el agua superficial y subsuperficial captada y conducida por drenes subterráneos (figura N°8). Éstos permiten la acumulación en épocas de lluvia, producto de la mayor escorrentía superficial y subterránea y su fin es un uso posterior en épocas de mayor demanda.



Figura N° 8: Estanque de agua
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.8. Fajinas

Las fajinas consisten en cuerpos cilíndricos de 10 a 40 cm de diámetro que contienen ramillas lo menos ramificadas posible, atadas con alambre (figura N°9). Se pueden utilizar para la regeneración de vegetación ripícola, por lo que se colocan en la orilla del cauce de tal forma que las partes que deben enraizar, estén fuera del agua y en contacto con el suelo, las que se cubren con tierra.

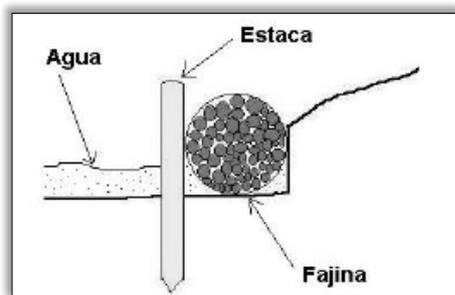


Figura N° 9: Esquema fajinas vista de perfil
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

Por fajinas también se entiende a una capa o manto de ramas atadas que se colocan sobre las taludes (figura N°10), protegiéndolos del impacto directo de la lluvia.



Figura N° 10: Fajina utilizada para proteger un talud
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.9. Limanes

Es una terraza sostenida con un murete de piedras (figura N°11). Normalmente la pared de los bordes tiene entre 50 y 70 cm en la base, mientras que el diámetro puede ser de 10 a 20 m. Debido a la superficie del limán, normalmente mayor a 80 m², es apto solamente para lugares de poca pendiente (hasta 8%) y para captación externa o de avenidas de agua. En la construcción se debe hacer un desagüe a partir de la cota máxima de colección de agua, para evitar rupturas en la pared en casos de grandes escorrentías. Generalmente, un limán es útil para establecer un conjunto de más de 30 árboles, considerando 3 m² de superficie por cada árbol.

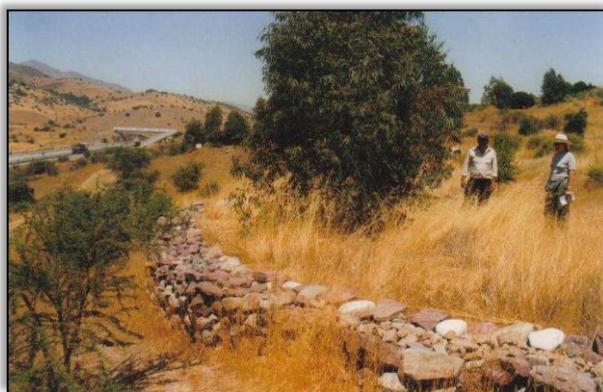


Figura N°11: Limán de piedra
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.10. Muretes

Los muretes son diques que no presentan vertedero y al igual que éstos, se ubican de forma perpendicular al eje hidráulico (figura N°12). Su objetivo es presentar un obstáculo a la escorrentía superficial, disminuyendo de esta forma, el transporte de material sólido. Su altura es generalmente menor a 1 metro y el largo es variable. Pueden ser hechos de diferentes materiales, como mampostería en seco, polines o de sacos rellenos con tierra.



Figura N° 12: Murete de piedra
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.11. Surcos en contorno

Esta práctica consiste en el trazado de surcos en sentido transversal a la pendiente, ya sea en curvas de nivel o dándoles un ligero declive longitudinal, generalmente del 0,5% (figura N°13). De este modo, se consigue retener el agua de escorrentía, facilitando su infiltración y favoreciendo la conservación del suelo.



Figura N° 13: Surcos en contorno
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.12. Terrazas

Una terraza es una plataforma formada artificialmente (figura N°14), que interrumpe la pendiente del terreno, lo que permite el cultivo agrícola o la plantación de especies forestales. La clasificación más usual de las terrazas es la que las divide en terrazas de talud y terrazas con muro. En las primeras es el talud natural el que define el escalón en el terreno y sólo debe aplicarse a pendientes relativamente bajas; mientras que en las segundas, el talud natural queda protegido por un muro de contención, normalmente de mampostería en seco. El ancho de la terraza está determinado tanto por la naturaleza del suelo y su profundidad, como por la pendiente del terreno.

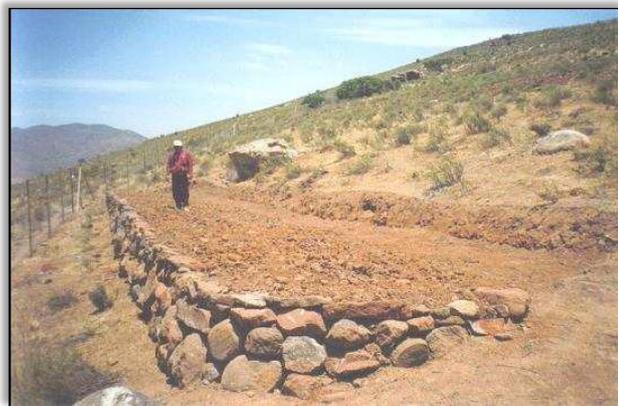


Figura N° 14: Miniterraza de piedra
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.13. Tratamiento lineal

Son obras de control de taludes y laderas; este tipo de obra resulta muy adecuado en laderas de pendientes moderadas, medianas y escarpadas. No resulta recomendable en taludes de derrubios o de suelos de alta pedregosidad. Se pueden construir de diversos materiales como postes de pino impregnados, sacos de tierra (figura N°15), fajinas de ramas o sarmientos o ramas trenzadas.



Figura N° 15: tratamiento lineal con bolsas de arena
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.2.14. Zanjas de infiltración

Se construyen de forma manual o mecanizada; su objetivo es capturar el agua proveniente de la escorrentía e infiltrarla en el suelo. Su construcción es transversal a la pendiente, sin desnivel y la sección puede ser trapezoidal o rectangular (figura N°16), aunque se aconseja la primera para evitar derrumbes indeseables.



Figura N° 16: Zanjas de infiltración
Fuente: Pizarro *et al.* (2003)

3.3. Diseño Hidrológico de las Obras

Se revisa a continuación el diseño matemático de zanjas de infiltración, canales de desviación y terrazas de infiltración usados en el Simulador EIAS. Estos diseños provienen del Manual de Diseño para Obras de Recuperación y Conservación de Aguas y Suelos de Pizarro *et al.*, (2009).

3.3.1. Zanjas de infiltración

Para que el diseño de una zanja de infiltración sea eficiente, se debe cumplir que el volumen de agua aportado por el área de impluvio, debe ser menor o igual al volumen captado por la zanja (figura N°17). Con este principio se genera la primera expresión:

$$V_e \leq V_o + V_i$$

Donde,

V_e : volumen de escorrentía aportado por la zona de impluvio

V_o : volumen de captación de la obra

V_i : volumen de infiltración

Las expresiones se definen para un lapso de una hora.

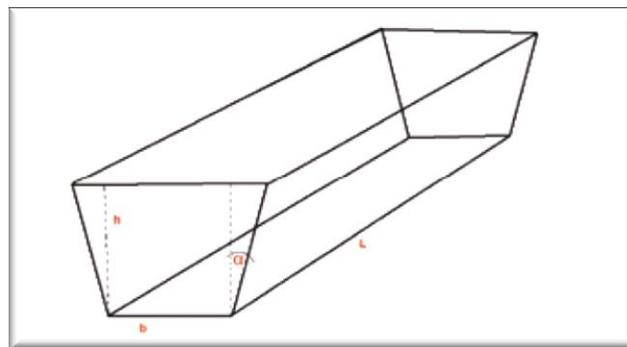


Figura N° 17: Diseño Zanjas de infiltración trapezoidal
Fuente: Pizarro *et al.* (2009)

A continuación, se presentan las tres ecuaciones que componen la primera expresión:

- V_e

$$V_e = I * l * dh * e$$

Donde,

V_e : volumen de escorrentía aportado por la zona de impluvio (m^3)

I : Intensidad de precipitación máxima para 1 hora (mm/h)

l : largo de la zanja (m)

dh : distancia horizontal entre zanjas de infiltración (m)

e : coeficiente de escorrentía (0,9 – 1), como factor de seguridad)

- V_o

$$V_o = h * (b + htg\alpha) * l$$

Donde,

V_o : volumen de captación de la obra (m^3/h)

b : base de la zanja (m)

h : altura de la zanja (m)

l : largo de la zanja (m)

α : ángulo de talud con respecto a la vertical ($^\circ$)

- V_i

$$V_i = b * l * v$$

Donde,

V_i : volumen de infiltración (m^3/h)

b : base de la zanja (m)

l : largo de la zanja (m)

v : velocidad de infiltración de la zanja (m/h)

Definida cada una de las variables, se presenta a continuación la ecuación completa:

$V_e = V_o + V_i$, de lo que se desprende,

$$I * l * dh * e = h * (b + htg\alpha) * l + b * l * v$$

Despejando y reduciendo los términos semejantes se presentan las ecuaciones finales para cada dimensión:

- Distanciamiento horizontal (dh)

$$dh = \frac{b * (h + b) + h^2 \operatorname{tg} \alpha}{I * e}$$

- Base (b)

$$b = \frac{dh * I * e - h^2 \operatorname{tg} \alpha}{h + v}$$

- Altura (h)

$$h = \frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4 * \operatorname{tg} \alpha * -(dh * I * e - bv)}}{2 * \operatorname{tg} \alpha}$$

Para la altura se debió resolver la siguiente ecuación cuadrática,

$$h^2 \operatorname{tg} \alpha + hb - (dh * I * e - bv) = 0$$

Donde todos los términos de estas expresiones son conocidos.

3.3.2. Canales de desviación

Para el simulador se utilizó la sección trapezoidal (figura N°18), ya que ofrece las mejores perspectivas de construcción, en función de diseño y aspectos de costos.

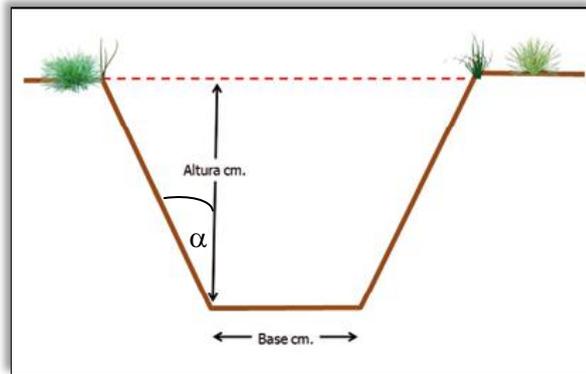


Figura N° 18: Diseño canal de desviación trapezoidal
Fuente: Pizarro *et al.* (2009)

Donde,

h = Altura canal (cm).

b = Base canal (cm).

α = Ángulo del talud con respecto a la vertical.

l = Longitud de talud (cm).

A continuación se definen los elementos de diseño de un canal trapezoidal, mediante una metodología ampliamente utilizada, que se basa en la ecuación de continuidad y en la ecuación de Manning, entre otros aspectos (Pizarro *et al.*, 2009).

Un efectivo diseño deberá contemplar la maximización del valor del radio hidráulico, definido como el cociente entre el área de la sección (A) y el perímetro mojado (P_m).

$$R = \frac{A}{P_m}$$

Donde:

R = radio hidráulico.

P_m = perímetro mojado

De esta manera, se desprende que el radio ideal estará definido por el perímetro mojado mínimo, situación que llega a definir para este caso.

$$R = \frac{h}{2}$$

- Cálculo del caudal a conducir

El caudal a conducir es una información esencial en el diseño.

$$Q = C * I * A$$

Donde,

Q = Caudal de aportación al canal (m³/s).

C = Coeficiente de escorrentía.

I = Intensidad de precipitaciones (mm/hr).

A = Área de aportación (m²).

- Cálculo de la sección del canal

El caudal se define como el producto de la sección del canal y la velocidad del agua. Despejando, queda la siguiente expresión para calcular la sección

$$A = Q / V$$

Donde,

A = sección del canal (m²)

Q = caudal en m³/s.

V = velocidad de diseño en m/s.

- Cálculo del tirante (h)

El tirante o altura efectiva del canal, para ser definido, necesita previamente determinar el ángulo de inclinación del talud del canal (ver figura n°18), con respecto a la vertical, dado que la formulación matemática obtenida a través de la maximización del radio hidráulico así lo determina. En este contexto, h se define como sigue:

$$h = \sqrt{\frac{A \cos \alpha}{2 - \text{sen}\alpha}}$$

Donde,

A = sección transversal del canal

α = ángulo del talud con respecto a la vertical.

Sólo si el canal se encuentra revestido α puede tomar cualquier valor, aunque se recomienda $\alpha \geq 20^\circ$.

- Cálculo de la base de fondo (b)

La base del canal está determinada por la siguiente expresión:

$$b = \frac{A}{h} - h * \text{tg}\alpha$$

Donde todos los términos son conocidos.

- Cálculo de la longitud del talud

La longitud del talud se define como sigue:

$$I = \frac{h}{\text{cosa}}$$

- Cálculo de la pendiente del canal (s).

Aplicando la ecuación de Manning la pendiente se calcula de la siguiente forma:

$$S = \left(\frac{Q * n}{A * R^{2/3}} \right)^2$$

donde:

Q = Caudal a conducir en m³/s.

n = Coeficiente de rozamiento de Manning

S = Pendiente longitudinal del canal (m/m)

R = Radio hidráulico (m)

A = Sección transversal (m²)

Así, el radio hidráulico se define a través de la expresión que permite su maximización:

$$R = \frac{h}{2}$$

Por lo tanto, todos los términos de la ecuación de Manning son conocidos.

- Cálculo de la revancha (r)

Con el objetivo de estructurar un margen de seguridad ante derrames, se adiciona a la longitud del talud, el valor “r”, o revancha, que se define a continuación:

$$r = \frac{1}{5} * h$$

También se puede aplicar el conocimiento que el constructor tenga para este tipo de obras.

3.3.3. Terrazas de infiltración

Pizarro *et al.* (2009), aseguran que las consideraciones a la hora de diseñar las terrazas de infiltración, son similares a las zanjas. La cantidad de agua de lluvia que escurre desde la zona de captación, debe ser menor o igual a la que capta o absorbe la terraza (figura N°19).

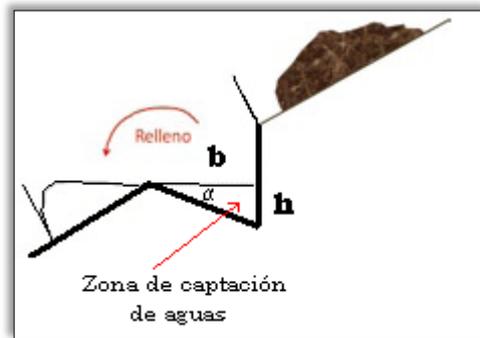


Figura N° 19: Esquema diseño terraza de infiltración
Fuente: Pizarro *et al.* (2009)

Así, h corresponde a la altura de la terraza, b es la base y l es el largo de la terraza. Por lo tanto, b y h son los catetos de un triángulo que representan la sección de captación de la terraza.

Así, se tiene la siguiente expresión:

$$V_e = V_o + V_i$$

Donde,

V_e = volumen de escorrentía aportado por la zona de impluvio

V_o = volumen de captación de la obra

V_i = volumen de infiltración

Todas las expresiones definidas anteriormente son para un lapso de una hora. Por otra parte, las ecuaciones que definen cada una de las variables son las siguientes:

- Ve

$$Ve = I * l * dh * e$$

Donde,

Ve = volumen de escorrentía aportado por la zona de impluvio (m³)

I = Intensidad de precipitación máxima para 1 hora (m/h)

L = largo de la terraza (m)

Dh = distancia horizontal entre terrazas de infiltración (m)

e = coeficiente de escorrentía (0,7 a 0.9)

- Vo

Luego, para el cálculo del volumen de captación de las obras, se debe considerar una sección triangular $b * (h/2)$, que ponderada por el largo de la terraza, da lo siguiente:

$$Vo = b * \frac{h}{2} * l$$

Donde,

Vo = volumen de captación de la obra (m³/h)

b = base de la terraza (m)

h = altura de la terraza (m)

l = largo de la terraza (m)

- Vi

$$Vi = b * l * v$$

Donde,

Vi: volumen de infiltración (m³/h)

b: base de la terraza (m)

l: largo de la terraza (m)

v: velocidad de infiltración de la terraza (m/h)

En términos estrictos, el volumen de infiltración debería considerar el tramo m y no la base b de la terraza (figura N°20). Sin embargo, se considera a la base b para facilitar el cálculo y porque establece un factor de seguridad en la estimación de la infiltración, dado que la subestima en relación a si fuera considerado el tramo m .

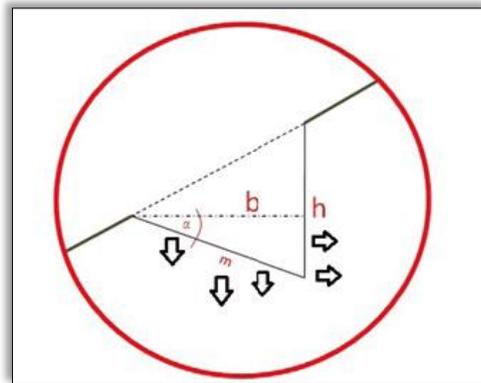


Figura N° 20: Esquema infiltración de agua en terrazas
Fuente: Pizarro *et al.* (2009)

Reemplazando en la primera expresión, queda la siguiente forma:

$$I * l * dh * e = b * \frac{h}{2} * l + b * l * v$$

Reduciendo los términos semejantes, a continuación se muestran las ecuaciones de cada dimensión física calculada por el simulador:

- Dh

$$dh = \frac{b * \left(\frac{h}{2} + v\right)}{I * e}$$

- Base

$$b = \frac{dh * I * e}{\left(\frac{h}{2} + v\right)}$$

- Altura

$$h = 2 \left(\frac{dh * I * e}{b} \right) - v$$

Donde todos los términos son conocidos.

3.4. Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

El contar con información de intensidades máximas de lluvia, es determinante en la construcción de cualquier obra de conservación de aguas y suelos. Así, la elaboración de las curvas IDF se basa en la unión de los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez, 1978 citado por Pizarro *et al.*, 2009).

Se comienza por la elección de una estación pluviográfica (figura N°21), de la cual se obtienen las alturas máximas de precipitación en mm para diferentes intervalos de tiempo (h) en un año, ya que poseen bandas milimétricas que registran estos eventos. La estación escogida debe contar con una serie mínima de quince años, con el objetivo de conseguir un buen ajuste.

Luego, se divide cada dato de precipitación por su intervalo de tiempo, según la metodología planteada por Témez (Pizarro *et al.*, (2005)). A estas intensidades se les ajusta una distribución de probabilidad, como Gumbel, que en Chile ha resultado ser muy eficiente.



Figura N° 21: equipo pluviográfico y su banda milimétrica
Fuente: Pizarro *et al.* (2007)

3.4.1. Ajuste de Gumbel

Una variable aleatoria E , sigue una distribución de probabilidad de Gumbel, si:

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

Con,

$$-\infty \leq x \leq \infty$$

X = valor a asumir por la variable aleatoria.

σ y μ = parámetros a ajustar en función de la muestra en estudio.

e = base de los logaritmos neperianos.

Además,

$$\mu = \bar{X} - 0,450047 * S$$

$$\sigma = \frac{1}{0,779696 * S}$$

Donde,

S = desviación estándar.

\bar{X} = media de la muestra.

3.4.2. Pruebas de bondad del ajuste

Luego de ajustada la función de Gumbel, se hacen las pruebas de bondad del ajuste, en donde las más usadas son Kolmogorov-Smirnov (k-s) y el coeficiente de determinación (R^2).

K-S: Esta prueba es aplicable a muestras pequeñas y consiste en comparar la desviación de la frecuencia observada $F_n(x)_i$ con relación a la frecuencia teórica acumulada $F(X)_i$. Posteriormente se extrae el supremo de las diferencias D_c , entre ambas frecuencias (Pavez, 2004).

$$D_c = \text{Sup} [F_n(x)_i - F(X)_i]$$

Con un 95% de confiabilidad, se compara el Dc con un valor Dt (obtenido de la tabla de valores críticos). El ajuste se aprobará cuando se cumpla lo siguiente:

$$H_0: D_c < D_t$$

R²: Este coeficiente determina qué proporción de la variación total de los datos observados (variable independiente), es explicada por el modelo (variable dependiente). La fórmula para definirlo es la siguiente (Pavez, 2004):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\gamma_i - \hat{\gamma}_i)^2}{\sum(\bar{\gamma}_i - \bar{\gamma}_i)^2}$$

Donde,

γ_i = Frecuencia observada.

$\bar{\gamma}_i$ = Promedio de las frecuencias observadas.

$\hat{\gamma}_i$ = Frecuencia teórica.

3.4.3. Probabilidad de excedencia y período de retorno

La probabilidad de excedencia, que se asocia al periodo de retorno, indicando la probabilidad que una variable aleatoria exceda un determinado valor, se define según la siguiente expresión (Pavez, 2004):

$$P(x) = P(x > X) = \frac{1}{T}$$

Donde,

F(X) = función de distribución de probabilidad.

El periodo de retorno T , está definido como el tiempo que transcurre entre dos fenómenos de las mismas características,

Mediante la función de Gumbel, se asocian las intensidades y su duración, a una serie períodos de retorno, dando origen a la siguiente tabla (a modo de ejemplo, se muestra la tabla N°1 de la estación Curicó):

Tabla N° 1: Intensidades a diferentes horarios y períodos de retorno de estación Curicó

| (T) | F(x) | Duración | | | | |
|-----|-------|----------|-------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 6 | 12 | 24 |
| 5 | 0.800 | 16.36 | 11.58 | 6.54 | 4.56 | 3.05 |
| 10 | 0.900 | 19.29 | 13.51 | 7.37 | 5.21 | 3.55 |
| 20 | 0.950 | 22.11 | 15.36 | 8.17 | 5.84 | 4.04 |
| 30 | 0.967 | 23.72 | 16.42 | 8.62 | 6.2 | 4.32 |
| 40 | 0.975 | 24.86 | 17.17 | 8.95 | 6.46 | 4.51 |
| 50 | 0.980 | 25.74 | 17.75 | 9.2 | 6.65 | 4.66 |
| 60 | 0.983 | 26.46 | 18.22 | 9.4 | 6.81 | 4.79 |
| 75 | 0.987 | 27.34 | 18.8 | 9.65 | 7.01 | 4.94 |
| 100 | 0.990 | 28.47 | 19.54 | 9.97 | 7.26 | 5.13 |

La tabla muestra una intensidad para cada duración y período de retorno, con lo que, es posible tener un horizonte probabilístico de planificación. Asimismo, cada duración ha sido ajustada con una serie distinta de datos y por tanto responde a una expresión paramétrica distinta. Teóricamente, no debería presentarse un evento con precipitaciones superiores a la calculada (Pizarro *et al.*, 2009).

3.4.4. Determinación gráfica

La figura N°22 muestra la representación gráfica de las curvas IDF. Según Pavez (2004), Témez explica que la probabilidad de encontrar intensidades mayores, aumenta al disminuir las duraciones. Este gráfico se creó asociando una probabilidad de excedencia a cada dato de intensidad. De esta manera, se unen las intensidades de distintos intervalos a un mismo período de retorno, generando una forma exponencial negativa.

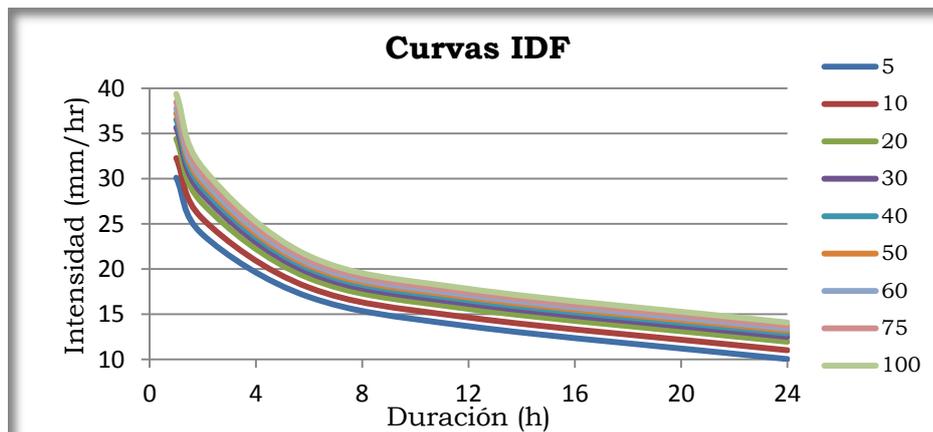


Figura N° 22: Representación gráfica Curvas IDF
Fuente: elaboración propia

3.4.5. Determinación matemática de las curvas IDF

También, es posible expresar estas gráficas como ecuaciones (Pavez, 2004 citando a Chow *et al.*, 1994). Esto permite flexibilizar el cálculo de intensidades a los tiempos y duraciones deseados. La función utilizada en el presente trabajo fue modificada por Abarza (2001) y Román (2003), a partir de una función propuesta por Bernard (1932), citado por Pizarro *et al.*, 2007, obteniendo excelentes resultados en ajustes para la Región del Maule y Metropolitana respectivamente (Pavez, 2004).

$$I = \frac{k * T^m}{D^n}$$

Donde,

I = Intensidad en mm/h

T = Período de retorno

D = Duración en h o minutos (dependiendo de cómo se ajustaron los datos)

Para obtener los coeficientes K, m y n, es necesario realizar una regresión lineal con los mismos datos de origen del gráfico de IDF (figura n°22). Para ello se debe linealizar la ecuación del siguiente modo:

$$\text{Log } I = \text{log } k + m \text{ log } T - n \text{ log } D$$

3.4.5.1. Medidas de bondad del ajuste

La función ajustada debe ser validada estimando nuevamente las intensidades para los mismos intervalos y duraciones de tiempo, para luego aplicarles el coeficiente de determinación R^2 , además de realizar una comparación entre grupos de datos como la prueba U de Mann-Whitney, que ha dado buenos resultados en Chile (Cornejo, 2010)

3.5. Índice de Tormenta

Según Cereceda (2009), el Índice de Tormenta permite construir curvas IDF a partir de estaciones pluviométricas. Este método fue planteado por Pizarro *et al.* (2001) y relaciona cada duración con los distintos períodos de retorno, para obtener las intensidades máximas de precipitación en mm/h.

Para aplicar este método es necesario contar con una estación pluviométrica y una estación pluviográfica, cuyas intensidades máximas en 24 horas sean similares. La primera estación contará sólo con datos de 24 horas (tabla N°2), mientras que la segunda contará con intensidades a distintos intervalos (tabla N°3) (Cereceda, 2009).

Tabla N° 2: Estac. Pluviométrica

| T | Duración | | | | |
|-----|----------|---|---|----|----------|
| | 1 | 2 | 6 | 12 | 24 |
| 5 | | | | | I_{24} |
| 10 | | | | | I_{24} |
| 20 | | | | | I_{24} |
| 30 | | | | | I_{24} |
| 40 | | | | | I_{24} |
| 50 | | | | | I_{24} |
| 60 | | | | | I_{24} |
| 75 | | | | | I_{24} |
| 100 | | | | | I_{24} |

Tabla N° 3: Estac. pluviográfica

| T | Duración | | | | |
|-----|----------|-------|-------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 6 | 12 | 24 |
| 5 | I_1 | I_2 | I_6 | I_{12} | I_{24} |
| 10 | I_1 | I_2 | I_6 | I_{12} | I_{24} |
| 20 | I_1 | I_2 | I_6 | I_{12} | I_{24} |
| 30 | I_1 | I_2 | I_6 | I_{12} | I_{24} |
| 40 | I_1 | I_2 | I_6 | I_{12} | I_{24} |
| 50 | I_1 | I_2 | I_6 | I_{12} | I_{24} |
| 60 | I_1 | I_2 | I_6 | I_{12} | I_{24} |
| 75 | I_1 | I_2 | I_6 | I_{12} | I_{24} |
| 100 | I_1 | I_2 | I_6 | I_{12} | I_{24} |

La expresión del Índice de Tormenta (k) y tabla (tabla N°4) asociada se muestra a continuación:

$$K_{ij} = I_i / I_{24}$$

Donde,

I_i = Intensidad horaria en mm/h (Estac. pluviográfica)

I_{24} = Intensidad para una duración de 24 h (Estac. pluviográfica)

Con i = Duración (D), j = Período de retorno (T)

Así, para cada estación pluviográfica se tendrá una serie de valores índices de tormenta o también llamados valores k, que responderán a la expresión I_i/I_{24} .

Tabla N° 4: Índice de Tormenta

| T | Duración | | | | |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | 1 | 2 | 6 | 12 | 24 |
| 5 | K _{1,5} | K _{2,5} | K _{6,5} | K _{12,5} | K _{24,5} |
| 10 | K _{1,10} | K _{2,10} | K _{6,10} | K _{12,10} | K _{24,10} |
| 20 | K _{1,20} | k _{2,20} | k _{6,20} | k _{12,20} | k _{24,20} |
| 30 | K _{1,30} | K _{2,30} | K _{6,30} | K _{12,30} | k _{24,30} |
| 40 | K _{1,40} | K _{2,40} | K _{6,40} | K _{12,40} | k _{24,40} |
| 50 | K _{1,50} | K _{2,50} | K _{6,50} | K _{12,50} | k _{24,50} |
| 60 | K _{1,60} | K _{2,60} | K _{6,60} | K _{12,60} | k _{24,60} |
| 75 | K _{1,75} | K _{2,75} | K _{6,75} | K _{12, 75} | k _{24,75} |
| 100 | K _{1,100} | K _{2,100} | K _{6,100} | K _{12,100} | k _{24,100} |

Para extrapolar a una estación con datos pluviométricos es necesario establecer si dicha estación pluviométrica posee similitudes con la pluviográfica. Así y según Cereceda (2009), este método se puede plantear si las diferencias entre las intensidades de 24 horas de la estación pluviográfica y la pluviométrica, no son mayores a 2 mm/h. Este autor aclara que diferencias mínimas entre intensidades de 24 horas, reflejan buenos resultados en la estimación de las curvas IDF para las regiones de Chile central, exceptuando la región de Valparaíso que por su alta variabilidad podrían aceptarse hasta 3 mm/h.

Si se cumple este primer tamiz de selección, entonces se deben ajustar los valores de intensidad de precipitación en 24 horas de la estación pluviométrica a una función de distribución de probabilidad, que puede ser Gumbel y, utilizando los valores índice de tormenta o valores k, de la estación pluviográfica que se considera válida, es posible construir la IDF en la estación pluviométrica. Así, sólo se deberá multiplicar la intensidad de 24 horas, por el Índice de tormenta correspondiente a una misma duración (i) y período de retorno (j), esta expresión y su tabla queda de la siguiente forma:

$$I_d = I_{24} * K_{ij}$$

Donde:

I_d = Intensidad horaria estimada en mm/h (Estac. pluviométrica)

I_{24} = Intensidad para una duración de 24 h (Estac. Pluviométrica) y período de retorno j

K_{ij} = Índice de Tormenta para la duración i del periodo de retorno j (se extrae de tabla n°4)

Tabla N° 5: Intensidades obtenidas con el Índice de Tormenta

| T | Duración | | | | |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 1 | 2 | 6 | 12 | 24 |
| 5 | $K_{1,5} \cdot I_{24}$ | $K_{2,5} \cdot I_{24}$ | $K_{6,5} \cdot I_{24}$ | $K_{12,5} \cdot I_{24}$ | $K_{24,5} \cdot I_{24}$ |
| 10 | $K_{1,10} \cdot I_{24}$ | $K_{2,10} \cdot I_{24}$ | $K_{6,10} \cdot I_{24}$ | $K_{12,10} \cdot I_{24}$ | $K_{24,10} \cdot I_{24}$ |
| 20 | $K_{1,20} \cdot I_{24}$ | $K_{2,20} \cdot I_{24}$ | $K_{6,20} \cdot I_{24}$ | $K_{12,20} \cdot I_{24}$ | $K_{24,20} \cdot I_{24}$ |
| 30 | $K_{1,30} \cdot I_{24}$ | $K_{2,30} \cdot I_{24}$ | $K_{6,30} \cdot I_{24}$ | $K_{12,30} \cdot I_{24}$ | $K_{24,30} \cdot I_{24}$ |
| 40 | $K_{1,40} \cdot I_{24}$ | $K_{2,40} \cdot I_{24}$ | $K_{6,40} \cdot I_{24}$ | $K_{12,40} \cdot I_{24}$ | $K_{24,40} \cdot I_{24}$ |
| 50 | $K_{1,50} \cdot I_{24}$ | $K_{2,50} \cdot I_{24}$ | $K_{6,50} \cdot I_{24}$ | $K_{12,50} \cdot I_{24}$ | $K_{24,50} \cdot I_{24}$ |
| 60 | $K_{1,60} \cdot I_{24}$ | $K_{2,60} \cdot I_{24}$ | $K_{6,60} \cdot I_{24}$ | $K_{12,60} \cdot I_{24}$ | $K_{24,60} \cdot I_{24}$ |
| 75 | $K_{1,75} \cdot I_{24}$ | $K_{2,75} \cdot I_{24}$ | $K_{6,75} \cdot I_{24}$ | $K_{12,75} \cdot I_{24}$ | $K_{24,75} \cdot I_{24}$ |
| 100 | $K_{1,100} \cdot I_{24}$ | $K_{2,100} \cdot I_{24}$ | $K_{6,100} \cdot I_{24}$ | $K_{12,100} \cdot I_{24}$ | $K_{24,100} \cdot I_{24}$ |

A partir de esta tabla, es posible graficar y obtener las curvas IDF, pudiendo hacer la determinación matemática y llegar a una función que relacione la duración y el período de retorno tal y como se hace con una estación pluviográfica.

3.6. Investigaciones Relacionadas

La ingeniería de recursos hídricos, demanda una información confiable sobre variables hidrológicas, para su uso en ecosistemas urbanos o naturales. Cualquier trabajo u obra que implique restauraciones de ríos, cuencas e incluso predicciones de eventos catastróficos para la población, como inundaciones o aluviones, requiere de un modelo hidrológico eficiente para su prevención o detención.

Tal es el caso en México (Martínez *et al.*, 2010), donde se generó un modelo de balance hídrico urbano en la ciudad de San Luis de Potosí, para disponer de información acerca de aguas lluvias, escorrentía superficial y aguas subterráneas. De esta forma la simulación, a través de algunos parámetros locales y una demanda de agua determinada, proporciona información relevante en la toma de decisiones e identifica las áreas más propensas a sufrir daño.

La simulación hidrológica es una herramienta muy potente para la gestión del agua. Así por ejemplo, en Florida (EE.UU) los investigadores Assefa y Shih (2002) generaron un modelo precipitación-escorrentía en la sub-cuenca del río Kissimmee, utilizando como principal herramienta computacional, un sistema de información geográfica (SIG). A través de un modelo de elevación digital, calcularon las mediciones cuantitativas sobre la morfología de la cuenca. Junto a lo anterior, se ingresaron las condiciones hidrológicas y el uso y tipo de suelo, proporcionados por el Departamento de Agricultura de los EE.UU. De esta manera se obtuvo la escorrentía, visualizando su distribución espacial mediante una imagen satelital. Algo similar ocurre en Pakistán (Ghumman *et al.*, 2011), con el cálculo de la escorrentía, donde la información hidrológica local se obtuvo tomando mediciones directamente en seis cuencas, a través de cincuenta y siete

eventos de lluvia, lo que luego se validó con cincuenta y cinco más. Con esta información se generó un mapa de distribución, basándose en una imagen satelital, quedando disponible para toda la población.

En otra área, la simulación adquiere una importancia relevante al poder determinar la viabilidad de un gran proyecto antes de construirlo. Este es el caso de los proyectos hidroeléctricos, donde la información topográfica junto a los datos hidrológicos como caudal medio anual y escorrentía, pueden evaluar rápidamente el potencial de energía generado por un cauce, recreándolo a escala en un modelo de elevación digital y a través de un sistema de información geográfica. (Punys *et al.*, 2011).

Respecto a las obras de conservación, en el área de Kairouan, en la zona semiárida de Túnez, se construyó una serie de obras en la década del 90', con el fin de reducir la erosión de los suelos. Quince años después, un modelo precipitación-escorrentía muestra que la escorrentía en la zona baja de la cuenca (que tiene casi la totalidad de las obras), se redujo en un 70%, para lluvias menores a 40 mm y del orden de un 40% para cualquier profundidad de lluvia. Se estima que la causa más probable es la restauración que se hizo con la construcción de obras de conservación de aguas y suelos. Esto ha tenido múltiples implicancias en la administración del recurso, en una zona donde los conflictos por el agua van en aumento (Lacombe *et al.*, 2008).

El diseño de obras para detener o mitigar la erosión de una ladera, atiende el mismo principio ocupado en una cuenca. Esto es, el volumen de agua caída, debe ser capturada e infiltrada, evitando su escurrimiento. En este marco, se encuentran los *software* de diseño de obras de conservación. Estas aplicaciones entregan las dimensiones físicas necesarias para capturar e infiltrar las precipitaciones asociadas al área de trabajo, utilizando la misma clase de datos como topografía, tipo y uso de suelo, precipitación, caudal etc. Así por ejemplo, en el año 1992 el Ingeniero de Montes Martínez de Azagra elaboró un programa informático de nombre MODIPE, con el fin de facilitar el diagnóstico de algunos procesos hidrológicos y de desertificación, específicamente en la restauración de laderas, deteniendo la erosión. Así, el usuario debe definir las características de la ladera como el área de impluvio, el área de recepción, el número de curva, las precipitaciones, etc. Por pantalla

se observa el resultado de la disponibilidad hídrica en l/m² en un punto de la ladera y originada a partir de una lluvia o una serie de lluvias. Además, entrega la capacidad mínima de una obra para retener la infiltración. El programa se ejecutaba desde disquete y está diseñado para ambiente DOS. Sin embargo, años después se actualizó a ambiente Windows (Martínez de Azagra, 1996).

Adicionalmente, el mismo autor desarrolló una línea de software asociados a variables hidrológicas, todas disponibles en <http://www.oasification.com/descargas.htm>. Se presentan a continuación algunos de ellos:

- **HYDNUM** : Es un software, cuyo objetivo es simular un modelo de recolección de agua, utilizando las fórmulas propuestas en la ecuación de infiltración de Horton:

$$f = f_o + (f_o - f_b) e^{-K * t}$$

Donde,

f_o: Capacidad de infiltración inicial ó máxima.

f_b: Capacidad de infiltración básica ó mínima.

K: Constante de decaimiento.

t: Tiempo desde el inicio del ensayo.

Los valores de f_o, f_b y K están asociados a los suelos y a su cubierta vegetal. Los valores de f_o y f_b se determinan en terreno, en suelo completamente seco y en suelo totalmente saturado, respectivamente.

De este mismo autor es posible encontrar otros programas que simplifican algunos cálculos hidrológicos:

- **TERRA1**: Caracterización geométrica de las terrazas volcadas o en contrapendiente.
- **F17**: Aplicación que permite calcular la evapotranspiración.

- **NUMCUR:** Aplicación que permite seleccionar fácilmente un número de curva o definir una serie progresiva de números de curva.

En Chile, Lemus (2003) realizó una aplicación de Microsoft Excel, al que llamó MAUCO; en este programa se necesita la intensidad de precipitación para el cálculo de zanjas de infiltración, que es la finalidad del producto. Incluye además, un diagnóstico de la ladera a través de la características que ingresa el usuario (Pizarro *et al.*, 2005).

Una experiencia similar es el simulador “EIAS”, enmarcado en el proyecto del mismo nombre, desarrollado por la Universidad de Talca y financiado por INNOVA-CORFO. Tuvo por objetivo promover y fomentar el uso y construcción de obras de conservación de aguas y suelos, basado en un diseño hidrológico óptimo, a partir de un *software* computacional de apoyo, accesible a través de internet (Pizarro *et al.*, 2005). En él se calculaban las dimensiones físicas de zanjas de infiltración (rectangulares) y canales de desviación. Actualmente, el simulador está en desuso.

4. ANTECEDENTES GENERALES

4.1. Región de Coquimbo

La Región de Coquimbo se sitúa en el norte del país entre los 29°20' y 32°16' de latitud Sur, abarcando una superficie de 4,05 millones de hectáreas. El total de la población al censo 2002 es de 603.210 personas, de las cuales sólo un 22% vive en las zonas rurales. La región cuenta con quince comunas agrupadas en tres provincias: Elqui, Limarí y Choapa. Su capital regional es la segunda ciudad más antigua del país, La Serena, fundada en 1544 (BCN, 2010).

4.1.1. Clima

Según la Dirección Meteorológica de Chile (2010), esta región posee varios climas, ya que hay una variación anual de las precipitaciones en las distintas zonas de la Región. En el litoral, de norte a sur, el clima cambia de desértico con nublados abundantes a estepa con nublados abundantes. Este clima se presenta con temperaturas moderadas, precipitación promedio de 130 mm y con un período seco de 8 a 9 meses.

En la zona intermedia se observa una transición entre el clima desértico marginal bajo y estepa con gran sequedad atmosférica, por lo que existen en esa zona mayores temperaturas y menores precipitaciones que en la costa. En la cordillera de los Andes, sobre los 3000 metros de altura, el clima varía a templado frío con altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieve permanente.

4.1.2. Relieve

La Cordillera de Los Andes en esta Región, se desplaza mucho hacia el poniente, generando la zona más angosta del país a la altura de la ciudad de Illapel. Sus alturas son bastante elevadas, sobrepasando los 6.000 msnm y

decreciendo hacia el sur con alturas promedio de 3.000 a 4.000 msnm con accidentados y montañosos relieves. De esta cordillera se desprenden numerosos cordones transversales, de 600 a 1000 msnm, separados por los valles de los ríos Elqui, Limarí y Choapa. Estos cordones entran en contacto con las planicies litorales, cuya principal característica hacia el sur, es la presencia de dunas (BCN, 2010).

4.1.3. Vegetación

La biodiversidad que presenta esta Región es una de las más altas del país y del mundo, considerándose uno de los 25 “hot spot” (áreas de alta concentración) de biodiversidad a nivel mundial para prioridades de conservación. Posee 3.429 especies, de las cuales casi la mitad son endémicas; esto, debido a la alta variabilidad climática y topográfica (U. La Serena, 2001).

Los tipos de vegetación que presenta esta región son la estepa arbustiva abierta y matorral arbustivo costero, con espino y cactáceas como especies dominantes. Hacia el sur aparecen formaciones mesófilas de boldo, peumo, chañar, molle y algarrobo. En los cordones montañosos se encuentra el matorral abierto andino, y arbustos como el guayacán y baccharis. Por sobre los 2000 metros habitan festucas y stipas, especies xerófitas adaptadas a la altura (BCN, 2010).

4.2. Región del Maule

La Región del Maule se ubica en la zona central del país, entre los 34°41' y el 36°33' de latitud sur, abarcando una superficie de 30,300 Km². Los habitantes según el Censo 2002 alcanzan un total de 908.097 personas, de los cuales un 35% vive en las áreas rurales. La región se divide en cuatro provincias: Curicó, Linares, Talca y Cauquenes. La capital regional es la ciudad de Talca, concentrando un 22% de la población regional (BCN, 2010).

4.2.1. Clima

Según la Dirección Meteorológica de Chile (2010), debido a la baja elevación de ambas cordilleras, es que se define sólo el tipo climático templado cálido con una estación seca de 4 a 5 meses. En cuanto a las temperaturas, la media para el verano es de 19° C con extremas de 30° C, mientras que en invierno las mínimas medias son de 7° C. En la costa se mantienen temperaturas moderadas todo el año. En cuanto a la cordillera de los Andes, las temperaturas descienden y las precipitaciones aumentan sobre los 2000 metros (BCN, 2010).

4.2.2. Relieve

La Cordillera de los Andes cuenta con alturas de hasta 4.000 msnm, mientras que la Cordillera de la Costa presenta alturas mucho menores, que van desde los 300 a los 700 msnm. La zona intermedia es un relieve plano, pero se ve interrumpido por numerosos ríos que lo atraviesan y la aparición hacia el sur de una zona montañosa que va desde los 400 a los 1.000 msnm. También existen planicies litorales extensas, pero con presencia de dunas sobre todo en las playas de Putú, Chanco y Curanipe (BCN, 2010).

4.2.3. Vegetación

La vegetación dominante está configurada por los bosques nativos en distinto grado de desarrollo y las plantaciones forestales. Por la costa domina el espino y el matorral esclerófilo como quillay, litre, boldo y peumo. En los sectores pre cordilleranos se encuentra el bosque esclerófilo (maitén, quila, quillay, peumo y boldo). Sobre los 600 metros de altura habitan los bosques de nothofagus llamados “bosque maulino” con las especies roble maulino, canelo, lingue olivillo y coigüe. La composición del paisaje varía mientras aumenta la altura y es así que, sobre los 1200 metros se pueden encontrar robles y hacia los 2000 m se localizan cedros o cipreses de la cordillera; más arriba aparece la estepa andina de arbustos bajos y gramíneas (BCN, 2010).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Revisión bibliográfica

Esta etapa consistió en recopilar información referente al diseño de obras de conservación de aguas y suelos, tutoriales del lenguaje de programación *visual basic*, experiencias sobre *software* similares y otros antecedentes útiles para llevar a la práctica este trabajo.

La investigación se realizó principalmente a través de libros y tesis relacionadas con el tema. Para complementar lo anterior, se utilizaron revistas del ámbito forestal, revistas científicas *on-line* y sitios de internet de instituciones afines.

5.2. Captura de Información Base

La información pluviométrica es la principal característica para los nuevos diseños de obras. A partir de ella fue posible construir mapas que incorporan las intensidades de casi la totalidad de estaciones de las Regiones de Coquimbo y el Maule.

Los datos de precipitaciones fueron proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA) de la Región del Maule, organismo estatal dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP), que cuenta con una amplia red de estaciones pluviométricas y pluviográficas a lo largo del país.

La solicitud se hizo por medio de una carta, adjuntando un formulario que indica los datos necesitados, en este caso, las precipitaciones máximas

mensuales en 24 horas de todos los años con registro hasta el 2010, para todas las estaciones pluviométricas de las Regiones de Coquimbo y el Maule.

5.3. Curvas IDF

5.3.1. Curvas IDF existentes

Las funciones para las estaciones pluviográficas fueron extraídas del libro “Curvas Intensidad Duración Frecuencia para la zona centro sur de Chile” (Pizarro *et al.*, 2007). Estas curvas fueron generadas con toda la información existente y para todas las estaciones pluviográficas hasta el año 2002. El detalle de las funciones para cada estación de las regiones de Coquimbo y el Maule se muestra a continuación:

Tabla N° 6: Estaciones Pluviográficas Región de Coquimbo

| Estación | Coordenadas | | Serie | Función |
|-----------------------|-------------|--------|-----------|---------------------------------------|
| | UTM N | UTM E | años | |
| Cogotí Embalse | 6567617 | 300887 | 1966-2002 | $I = (53,28 * T^{0,2287})/D^{0,4542}$ |
| Illapel Dga | 6496775 | 292238 | 1976-2002 | $I = (62,93 * T^{0,2163})/D^{0,5043}$ |
| La Tranquilla | 6469378 | 342019 | 1966-2002 | $I = (48,05 * T^{0,2126})/D^{0,4842}$ |
| Los Cóndores | 6445130 | 281794 | 1978-2002 | $I = (35,66 * T^{0,2426})/D^{0,4108}$ |
| Paloma Embalse | 6602287 | 304978 | 1962-2002 | $I = (73,16 * T^{0,2288})/D^{0,5125}$ |
| Quelón | 6441450 | 296004 | 1973-2002 | $I = (73,15 * T^{0,1916})/D^{0,5430}$ |
| Rivadavia | 6682664 | 349330 | 1976-2001 | $I = (40,57 * T^{0,2275})/D^{0,4577}$ |

I = intensidad de precipitación (mm/h); T = período de retorno (años); D = duración (min), R² (Fuente: Pizarro et al. 2007).

Tabla N° 7: Estaciones Pluviográficas Región del Maule

| Estación | Coordenadas | | Serie | Función |
|-------------------------------------|-------------|--------|-----------|---------------------------------------|
| | UTM N | UTM E | años | |
| Ancoa Embalse | 6023791 | 293266 | 1988-2002 | $I = (61,73 * T^{0,1465})/D^{0,3647}$ |
| Bullileo Embalse | 5981671 | 283173 | 1982-1998 | $I = (57,89 * T^{0,1118})/D^{0,3258}$ |
| Colorado | 6053778 | 295308 | 1982-1998 | $I = (71,21 * T^{0,1391})/D^{0,4005}$ |
| Digua Embalse | 5984598 | 271060 | 1988-2002 | $I = (78,09 * T^{0,1831})/D^{0,4182}$ |
| Los Queñes | 6125576 | 334434 | 1988-2002 | $I = (68,35 * T^{0,1694})/D^{0,4020}$ |
| Melozal | 6037743 | 248556 | 1982-1998 | $I = (59,92 * T^{0,2160})/D^{0,4318}$ |
| Parral | 5991450 | 245651 | 1982-1998 | $I = (62,46 * T^{0,1766})/D^{0,4270}$ |
| Pencahue | 6081931 | 242659 | 1982-1998 | $I = (63,96 * T^{0,1641})/D^{0,4698}$ |
| Potrero Grande | 6104860 | 309175 | 1988-2002 | $I = (83,31 * T^{0,1822})/D^{0,4269}$ |
| San Javier | 6057656 | 259253 | 1988-2002 | $I = (25,31 * T^{0,1724})/D^{0,3629}$ |
| Sn. Manuel en Perquillauquén | 5973011 | 262260 | 1996-2002 | $I = (52,47 * T^{0,1817})/D^{0,3575}$ |
| Talca U.C. | 6075406 | 262157 | 1982-1998 | $I = (35,21 * T^{0,1953})/D^{0,3812}$ |

I = intensidad de precipitación (mm/h); T = período de retorno (años); D = duración (min), (Fuente: Pizarro et al. 2007).

Adicionalmente, la función para la estación de Curicó se obtuvo a través de datos de precipitación actualizados al año 2010, proporcionados por la DGA. Éstas son funciones inéditas, calculadas por los investigadores del grupo EIAS y prontas a ser publicadas.

Tabla N° 8: Estaciones Pluviográficas Región del Maule

| Estación | Coordenadas | | Serie | Función |
|---------------|-------------|--------|-----------|-------------------------------------|
| | UTM N | UTM E | años | |
| Curicó | 6126706 | 295877 | 1966-2009 | $I = (120,48 * T^{0,16})/D^{0,538}$ |

I = intensidad de precipitación (mm/h); T = período de retorno (años); D = duración (min), (Fuente: Centro tecnológico de Hidrología Ambiental EIAS).

5.3.2. Construcción de Curvas IDF

Como el trabajo de Pizarro *et al.* sólo entrega información sobre algunas estaciones que poseen curvas IDF, fue necesario recurrir a distintas estaciones meteorológicas para la obtención de un mayor número de funciones que entreguen la intensidad de precipitaciones en los territorios de las regiones de Coquimbo y el Maule. En este caso, se utilizó el método del Índice de tormenta o método K, que permite extrapolar información desde estaciones pluviográficas a pluviométricas y construir curvas IDF en base a información de 24 horas de duración de lluvia. Así, se utilizaron las estaciones pluviométricas que contaban con una serie mínima de 19 años de registro, extrayéndose de ellas los valores máximos anuales de precipitación en 24 h, según la serie. En los siguientes cuadros se muestran las estaciones pluviométricas utilizadas para las regiones de Coquimbo y el Maule.

Tabla N° 9: Estaciones Pluviométricas Región de Coquimbo

| Estación | Altitud (msnm) | UTM N | UTM E | Año Inicio | Año final |
|--------------------------|-----------------------|--------------|--------------|-------------------|------------------|
| Almendral | 370 | 6681587 | 314896 | 1958 | 2010 |
| Caimanes | 450 | 6465032 | 298055 | 1989 | 2010 |
| Carén | 740 | 6585105 | 330669 | 1943 | 2010 |
| Cochiguaz | 1560 | 6664665 | 364697 | 1989 | 2010 |
| Cogotí 18 | 840 | 6559446 | 313978 | 1943 | 2010 |
| Coirón | 840 | 6469012 | 332538 | 1974 | 2010 |
| Combarbalá | 870 | 6549382 | 309308 | 1977 | 2010 |
| Culimo Embalse | 380 | 6449867 | 290194 | 1972 | 2010 |
| Cuncumen | 1100 | 6465733 | 347486 | 1958 | 2010 |
| El Tome | 420 | 6588881 | 311496 | 1966 | 2010 |
| El Trapiche | 300 | 6748770 | 294413 | 1979 | 2010 |
| Huanta | 1240 | 6697229 | 366231 | 1989 | 2010 |
| Huintil | 650 | 6505808 | 311921 | 1941 | 2010 |
| Hurtado | 1100 | 6648182 | 336867 | 1943 | 2010 |
| Juntas | 2150 | 6683217 | 394411 | 1990 | 2010 |
| La Canela Dmc | 290 | 6523558 | 266383 | 1973 | 2010 |
| La Laguna Embalse | 3160 | 6658175 | 399678 | 1964 | 2010 |

Continuación Tabla n°9: Estaciones Pluviométricas Coquimbo

| Estación | Altitud (msnm) | UTM N | UTM E | Año Inicio | Año final |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|-------------------|------------------|
| La Ortiga | 1560 | 6658753 | 357334 | 1979 | 2010 |
| La Placilla | 600 | 6580441 | 279417 | 1989 | 2010 |
| La Serena (Escuela Agrícola) | 15 | 6689432 | 282214 | 1971 | 2010 |
| La Torre | 120 | 6610458 | 272404 | 1941 | 2010 |
| Las Breas | 1600 | 6639123 | 344987 | 1943 | 1977 |
| Las Burras | 1150 | 6509830 | 327099 | 1989 | 2010 |
| Las Ramadas | 1380 | 6567266 | 348619 | 1943 | 2010 |
| Limahuida | 300 | 6485742 | 295198 | 1964 | 2010 |
| Los Nichos | 1330 | 6663904 | 355688 | 1977 | 2010 |
| Los Vilos Dmc | 10 | 6466709 | 262773 | 1982 | 2010 |
| Mal Paso | 375 | 6484933 | 301085 | 1960 | 1989 |
| Mincha Norte | 50 | 6502638 | 267960 | 1974 | 2010 |
| Monte Grande | 1120 | 6670313 | 356032 | 1958 | 2010 |
| Ovalle Dga | 220 | 6612553 | 289070 | 1971 | 2010 |
| Pedregal | 880 | 6585291 | 336698 | 1967 | 1989 |
| Peña Blanca | 360 | 6578642 | 256232 | 1989 | 2010 |
| Pichasca | 725 | 6636222 | 320546 | 1946 | 2010 |
| Pisco Elqui Dmc | 1250 | 6666743 | 356133 | 1977 | 2010 |
| Punitaqui | 280 | 6587267 | 284780 | 1961 | 2010 |
| Quilimari | 25 | 6443749 | 264120 | 1979 | 2010 |
| Ramadilla | 1250 | 6581001 | 342182 | 1941 | 1964 |
| Rapel | 870 | 6599909 | 330009 | 1969 | 2010 |
| Recoleta Embalse | 350 | 6623114 | 298493 | 1943 | 2010 |
| Salamanca | 510 | 6482674 | 313736 | 1971 | 2010 |
| Samo Alto | 600 | 6634199 | 313772 | 1968 | 1989 |
| San Agustín | 1050 | 6488102 | 326461 | 1941 | 2010 |
| Santa Virginia | 980 | 6507898 | 325786 | 1941 | 1989 |
| Sotaquí | 280 | 6609375 | 296857 | 1954 | 2010 |
| Tascadero | 1230 | 6567461 | 340924 | 1961 | 2010 |
| Tulahuén | 1020 | 6572676 | 331530 | 1949 | 2010 |
| Vicuña (Inia) | 730 | 6673645 | 334506 | 1971 | 2010 |
| Pabellón | 1920 | 6634584 | 350683 | 1968 | 2010 |

Tabla N° 10: Estaciones Pluviométricas Región del Maule

| Estación | Altitud (msnm) | UTM N | UTM E | Año inicio | Año final |
|----------------------------|-----------------------|--------------|--------------|-------------------|------------------|
| Armerillo | 530 | 6047150 | 312059 | 1916 | 2010 |
| Colbún (Maule Sur) | 280 | 6055015 | 282440 | 1959 | 2010 |
| Constitución | 10 | 6087864 | 735544 | 1992 | 2010 |
| El Durazno | 275 | 6069804 | 289695 | 1992 | 2010 |
| El Guindo | 250 | 6095770 | 288581 | 1964 | 2010 |
| El Manzano | 574 | 6129625 | 325098 | 1959 | 2010 |
| Gualleco | 100 | 6095744 | 228801 | 1961 | 2010 |
| Hornillo | 810 | 6028644 | 308838 | 1961 | 2010 |
| Huerta Del Maule | 218 | 6049544 | 233293 | 1992 | 2010 |
| Juan Amigo | 460 | 6004930 | 284697 | 1992 | 2010 |
| La Estrella | 200 | 6036460 | 754247 | 1992 | 2010 |
| La Sexta de Longaví | 220 | 6000623 | 264758 | 1992 | 2010 |
| Liguay | 145 | 6018449 | 257884 | 1975 | 2010 |
| Lontué | 215 | 6119814 | 291062 | 1969 | 2010 |
| Nirivilo | 200 | 6063238 | 763712 | 1951 | 2011 |
| Putú | 36 | 6099299 | 747282 | 1992 | 2010 |
| Quella | 130 | 6005718 | 762203 | 1961 | 2010 |
| San Rafael | 136 | 6089995 | 270568 | 1992 | 2010 |
| Santa Susana | 410 | 6134832 | 314055 | 1981 | 2010 |
| Tutuvén Embalse | 165 | 6024261 | 737055 | 1975 | 2010 |
| Vilches | 1039 | 6059118 | 310925 | 1992 | 2010 |
| Villa Prat | 90 | 6113018 | 261721 | 1992 | 2010 |

5.3.2.1. Aplicación del Índice de Tormenta (IT)

La serie de datos de precipitación para cada estación pluviométrica de ambas regiones, se procesó en una planilla Excel. A continuación se explica en detalle la aplicación del Índice de Tormenta, aplicación que se llevó a cabo con las 71 estaciones que se utilizaron para Coquimbo y el Maule.

5.3.2.2. Ajuste de la función de distribución de probabilidad

Una vez obtenidas las intensidades máximas de precipitación para cada estación pluviométrica (dividiendo la información de precipitación en milímetros que entregan las estaciones pluviométricas, por 24 horas), se ajustó a una función de distribución de probabilidad de valores extremos. La función utilizada es Gumbel, debido a que es la más recomendada para representar las lluvias extremas.

Luego se aplicaron las medidas de bondad del ajuste, a saber el coeficiente de determinación y el test de Kolmogorov-Smirnov (para un nivel de confianza de 95%).

5.3.2.3. Obtención del Índice de Tormenta

El método del Índice de tormenta indica que cada estación pluviométrica debe contar con una estación pluviográfica confiable y similar en cuanto a intensidades de 24 horas para complementar sus datos. A esta estación se le llama Estación Patrón y se escogió para cada estación la que presentó una intensidad máxima en 24 h lo más cercana posible a la estación pluviométrica y que denotara una importante cercanía geográfica.

Como se recordará, el Índice de Tormenta se calcula de la siguiente forma:

$$K_{ij} = I_i / I_{24}$$

Donde,

I_i = Intensidad horaria en mm/hr (Estac. pluviográfica)

I_{24} = Intensidad para una duración de 24 hr (Estac. pluviográfica)

Con i = Duración (D), j = Período de retorno (T)

Luego de completadas las intensidades faltantes, se construye la nueva curva IDF en forma gráfica y por medio de un ajuste estadístico se construye la expresión matemática, tal como se indica en el capítulo 3.5 de la Revisión bibliográfica.

5.4. Cartografía Base

Para poder situar las estaciones en el contexto de cada región, fue necesario utilizar herramientas cartográficas. Por tanto, para generar los mapas de ubicación de las estaciones, se utilizó el Sistema de Información Geográfica ArcView Gis 3.2. Todos los datos se trabajaron bajo el modelo vectorial, esto es, puntos, líneas y polígonos. Las coberturas se encontraban en huso 19 y Datum wgs84.

La cobertura de estaciones se creó a partir de coordenadas UTM proporcionadas por la DGA, complementando esta información con datos utilizados en la versión anterior del simulador y algunas referencias extraídas de la *web*. Así, las coberturas para cada mapa quedaron compuestas por ciudades, poblados, ríos, rutas principales, ferrocarril, reservas nacionales y por supuesto, todas las estaciones pluviométricas.

5.5. Análisis del Simulador EIAS y Nuevos Requerimientos

El análisis del simulador EIAS, creado en la Universidad de Talca el año 2005, se llevó a cabo ingresando a la página <http://eias.otalca.cl>. Haciendo uso del simulador, se observó la forma de efectuar los cálculos para zanjas y canales y la veracidad de sus resultados. También se analizaron las dificultades o confusiones que mantienen suspendido su uso actual y el cumplimiento de los objetivos para el cual fue creado por el grupo que lleva su mismo nombre.

Una vez analizados las deficiencias del Simulador EIAS, se hizo una versión preliminar que permitió la captura cíclica de los requerimientos. De esta manera se fue obteniendo una retroalimentación de parte de Los investigadores del grupo EIAS, actualmente Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, acerca de las versiones desarrolladas, lo que al mismo tiempo permitió capturar nuevos requerimientos hasta llegar a la versión final.

Entre los requerimientos principales estuvo darle al usuario una oferta más amplia de estaciones con intensidades máximas en una hora. Estos datos sólo se obtienen de estaciones pluviográficas, las que son muy escasas para ambas regiones. Sin embargo, a través de la aplicación del Índice de Tormenta se pudieron obtener más curvas IDF.

En cuanto al diseño de las obras, se pasó de la construcción de zanjas con sección rectangular a trapezoidal. Además, se incorporaron las terrazas de infiltración de aguas como nuevo diseño disponible para los usuarios.

Adicionalmente, se concluyó con los investigadores del Centro Tecnológico que la obtención de las dimensiones de cada obra debe llevarse a cabo en un programa fluido y amigable, evitando confusiones y con opciones de borrar, recibir sugerencias, guardar requerimientos, etc. También debe contar con la ayuda necesaria que instruya al usuario sobre las necesidades de este tipo de diseños. Asimismo, los resultados deben ser exactos y mostrarse con claridad, existiendo la posibilidad de hacer reportes útiles e imprimirlos, con el fin de llevarlos a terreno.

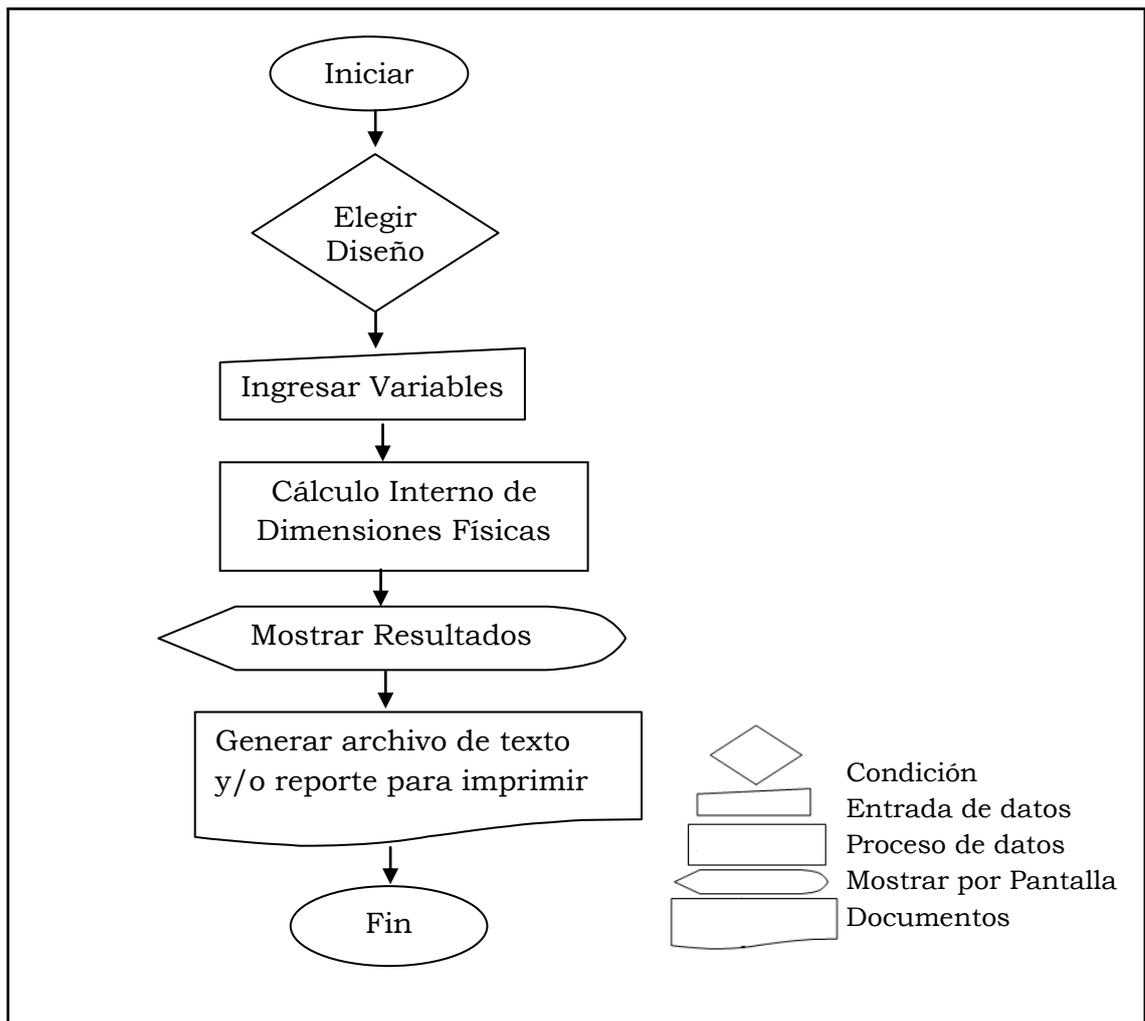
5.6. Programación definitiva

La primera versión del simulador EIAS, estuvo sujeto a la necesidad de conectarse a internet para usarlo. La nueva versión es un programa de

escritorio, fácil de instalar y manejar. La programación se hizo en lenguaje *visual basic*, utilizando Visual Studio.Net 2003 (licenciado por la Universidad de Talca) bajo ambiente Windows XP. El *software* final se podrá ejecutar en cualquier otra versión de Windows.

El diseño del programa se hizo obedeciendo a la secuencia óptima de acciones que debía realizar el usuario desde que inicia el simulador, hasta que se obtiene el resultado deseado. Esta secuencia se presenta en un diagrama de flujo de datos (figura N°23), en donde se observa el esquema básico de trabajo para un solo diseño, con una sola incógnita. En el Apéndice N°1 se muestra la secuencia con todos los diseños y todas las incógnitas que se encuentran en el *Menú Diseños* del Simulador EIAS, haciendo un recorrido del ingreso y salida de datos.

Figura N° 23: Diagrama de flujo de datos para un diseño de obras



5.7. Calibración de variables y Validación técnica

Con el objetivo de verificar la ausencia de errores y el cumplimiento de todos los requerimientos funcionales, se definieron casos de prueba. Las pruebas fueron tanto cualitativas (visualización de mapas, despliegue de formularios, verificación de reportes, archivos de texto y percepción de la interfaz), como también cuantitativas (valores límites, validación de entradas, cálculo de intensidades y dimensiones).

Aunque las pruebas se hicieron desde la primera versión preliminar en adelante, la revisión final siguió como pauta el esquema que analiza el diagrama de flujo. Siguiendo esta secuencia se validaron las entradas y se probaron todas las acciones por parte del usuario y las opciones por parte del programa.

5.8. Presentación de resultados

En la presentación de resultados se presentan todas las funciones del simulador EIAS en detalle, a través de imágenes tomadas durante la ejecución de las pruebas. Además, se muestra un resumen de los cálculos del Índice de tormenta y los casos de prueba.

5.9. Análisis y discusión

En esta etapa, se analizó el cumplimiento del Simulador EIAS en comparación con la versión anterior. También se discutió la importancia de la intensidad en el cálculo de cada una de las dimensiones físicas de las obras.

5.10. Conclusiones y recomendaciones

Finalmente, después de llevar a cabo todos los pasos anteriores, fue posible extraer las principales conclusiones que el estudio generó, además de las recomendaciones pertinentes.

5.11. Materiales

Los materiales que hicieron posible este trabajo son:

- Microsoft Office 2007
- Visual Studio 2003
- Statgraphics Centurion
- Arc View 2.3
- Internet
- Notebook

6. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1. Información Base

6.1.1. Curvas IDF obtenidas para las estaciones pluviométricas

Las intensidades que muestra el simulador EIAS, se adquieren por medio de coeficientes internos obtenidos a través del Índice de tormenta. Este índice se aplicó a cada una de las estaciones pluviométricas de ambas regiones, ajustándolas a una función y probando su calidad de ajuste.

Las estaciones patrón, los coeficientes y los ajustes, se muestran a continuación para las regiones de Coquimbo y el Maule en las tablas N°11 y 12 respectivamente.

Tabla N° 11: Estación patrón y funciones Región de Coquimbo

| Estación pluviométrica | Estación Patrón | Función |
|-------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Almendral | La Paloma | $I = (52.60 * T^{0.1610})/D^{0.4761}$ |
| Caimanes | Los Cóndores | $I = (58.75 * T^{0.1231})/D^{0.3949}$ |
| Caren | La Paloma | $I = (85.91 * T^{0.1333})/D^{0.4761}$ |
| Cochiguaz | Rivadavia | $I = (33.37 * T^{0.1624})/D^{0.4046}$ |
| Cogoti 18 | Los Cóndores | $I = (46.31 * T^{0.135})/D^{0.3949}$ |
| Coiron | Los Cóndores | $I = (61.45 * T^{0.1441})/D^{0.3949}$ |
| Combarbala | Los Cóndores | $I = (46.00 * T^{0.0846})/D^{0.3949}$ |
| Culimo Embalse | Los Cóndores | $I = (52.47 * T^{0.1271})/D^{0.3949}$ |
| Cuncumen | Los Cóndores | $I = (51.17 * T^{0.1315})/D^{0.3949}$ |
| El Tome | Cogotí | $I = (48.38 * T^{0.1644})/D^{0.4179}$ |
| El Trapiche | Rivadavia | $I = (23.17 * T^{0.1782})/D^{0.4046}$ |
| Huanta | Rivadavia | $I = (22.66 * T^{0.1882})/D^{0.4046}$ |
| Huintil | Los Cóndores | $I = (44.60 * T^{0.1379})/D^{0.3949}$ |
| Hurtado | Los Cóndores | $I = (36.16 * T^{0.1479})/D^{0.3949}$ |
| Juntas | Los Cóndores | $I = (26.57 * T^{0.1487})/D^{0.3949}$ |
| La Canela Dmc | La Tranquila | $I = (58.09 * T^{0.1269})/D^{0.4699}$ |

Continuación tabla N°11: Estación patrón y funciones Región de Coquimbo

| | | |
|-----------------------|--------------|--|
| La Laguna Embalse | Cogotí | $I = (40.93 * T^{0.1676})/D^{0.4179}$ |
| La Ortiga | Los Cóndores | $I = (46.75 * T^{0.1788})/D^{0.3949}$ |
| La Placilla | Los Cóndores | $I = (60.10 * T^{0.1329})/D^{0.3949}$ |
| La Serena (Esc. Agr.) | La Paloma | $I = (54.58 * T^{0.1975})/D^{0.4761}$ |
| La Torre | Cogotí | $I = (44.62 * T^{0.1469})/D^{0.4179}$ |
| Las Breas | Illapel | $I = (54.26 * T^{0.161})/D^{0.4451}$ |
| Las Burras | Los Cóndores | $I = (54.41 * T^{0.2024})/D^{0.3949}$ |
| Las Ramadas | Los Cóndores | $I = (60.66 * T^{0.1354})/D^{0.3949}$ |
| Limahuida | Quelón | $I = (95.62 * T^{0.1259})/D^{0.5385}$ |
| Los Nichos | Los Cóndores | $I = (45.39 * T^{0.1661})/D^{0.3949}$ |
| Los Vilos Dmc | Los Cóndores | $I = (54.76 * T^{0.1324})/D^{0.3949}$ |
| Mal Paso | La Tranquila | $I = (71.40 * T^{0.0913})/D^{0.4699}$ |
| Mincha Norte | La Paloma | $I = (67.89 * T^{0.1378})/D^{0.4761}$ |
| Monte Grande | Illapel | $I = (39.01 * T^{0.2063})/D^{0.4451}$ |
| Ovalle Dga | La Tranquila | $I = (52.53 * T^{0.1462})/D^{0.4699}$ |
| Pabellon | La Paloma | $I = (71.85 * T^{0.168})/D^{0.4761}$ |
| Pedregal | Los Cóndores | $I = (53.61 * T^{0.1857})/D^{0.3949}$ |
| Peña Blanca | Quelón | $I = (127.79 * T^{0.0772})/D^{0.4834}$ |
| Pichasca | La Paloma | $I = (61.85 * T^{0.1721})/D^{0.4761}$ |
| Pisco Elqui Dmc | La Tranquila | $I = (61.52 * T^{0.1665})/D^{0.4699}$ |
| Punitaqui | Los Cóndores | $I = (68.01 * T^{0.1262})/D^{0.3777}$ |
| Quilimari | Los Cóndores | $I = (55.75 * T^{0.1148})/D^{0.3949}$ |
| Ramadilla | Los Cóndores | $I = (60.66 * T^{0.1354})/D^{0.3949}$ |
| Rapel | La Paloma | $I = (71.35 * T^{0.1493})/D^{0.4761}$ |
| Recoleta Embalse | Cogotí | $I = (38.31 * T^{0.1661})/D^{0.4179}$ |
| Salamanca | Los Cóndores | $I = (48.55 * T^{0.139})/D^{0.3949}$ |
| Samo Alto | La Paloma | $I = (55.33 * T^{0.1889})/D^{0.4761}$ |
| San Agustín | Los Cóndores | $I = (47.97 * T^{0.1263})/D^{0.3949}$ |
| Santa Virginia | La Paloma | $I = (75.43 * T^{0.1485})/D^{0.4761}$ |
| Sotaqui | La Paloma | $I = (65.07 * T^{0.1535})/D^{0.4761}$ |
| Tascadero | Los Cóndores | $I = (58.22 * T^{0.1176})/D^{0.3949}$ |
| Tulahuen | Los Cóndores | $I = (57.35 * T^{0.1353})/D^{0.3949}$ |
| Vicuña (Inia) | Illapel | $I = (44.22 * T^{0.1753})/D^{0.4451}$ |

Tabla N° 12: Estación patrón y funciones Región del Maule

| Estación pluviométrica | Estación Patrón | Función |
|-------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Armerillo | Bullileo | $I=(98.65*T^{0.0917})/D^{0.3263}$ |
| Colbun (Maule Sur) | Colorado | $I=(68.01*T^{0.1262})/D^{0.3777}$ |
| Constitucion | Pencahue | $I=(87.19*T^{0.0665})/D^{0.4573}$ |
| El Durazno | Pencahue | $I=(97.57*T^{0.0461})/D^{0.4573}$ |
| El Guindo | San Javier | $I=(103.76*T^{0.1047})/D^{0.4834}$ |
| El Manzano | El Colorado | $I=(86.87*T^{0.103})/D^{0.3777}$ |
| Gualleco | El Colorado | $I=(64.27*T^{0.127})/D^{0.3777}$ |
| Hornillo | Bullileo | $I=(94.95*T^{0.1246})/D^{0.3263}$ |
| Huerta Del Maule | Pencahue | $I=(72.91*T^{0.0142})/D^{0.4573}$ |
| Juan Amigo | San Javier | $I=(179.63*T^{0.0865})/D^{0.4834}$ |
| La Estrella | Pencahue | $I=(82.25*T^{0.0514})/D^{0.4573}$ |
| La Sexta De Longavi | Embalse Ancoa | $I=(55.03*T^{0.119})/D^{0.3432}$ |
| Liguay | Parral | $I=(83.17*T^{0.121})/D^{0.4622}$ |
| Lontue | Potrero Grande | $I=(73.52*T^{0.1199})/D^{0.4292}$ |
| Nirivilo | Embalse Ancoa | $I=(48.37*T^{0.1307})/D^{0.3432}$ |
| Putú | Parral | $I=(98.11*T^{0.1034})/D^{0.4622}$ |
| Quella | San Manuel | $I=(38.83*T^{0.1398})/D^{0.3588}$ |
| San Rafael | Pencahue | $I=(72.91*T^{0.0142})/D^{0.4573}$ |
| Santa Susana | San Javier | $I=(127.79*T^{0.0772})/D^{0.4834}$ |
| Tutuven Embalse | Parral | $I=(108.90*T^{0.0902})/D^{0.4622}$ |
| Vilches | Bullileo | $I=(73.12*T^{0.1142})/D^{0.3263}$ |
| Villa Prat | San javier | $I=(97.32*T^{0.1153})/D^{0.4834}$ |

La distribución espacial de todas las estaciones para ambas regiones, se muestra en las figuras N°24 y N°25, quedando en evidencia la superioridad en número de las estaciones pluviométricas por sobre las pluviográficas.

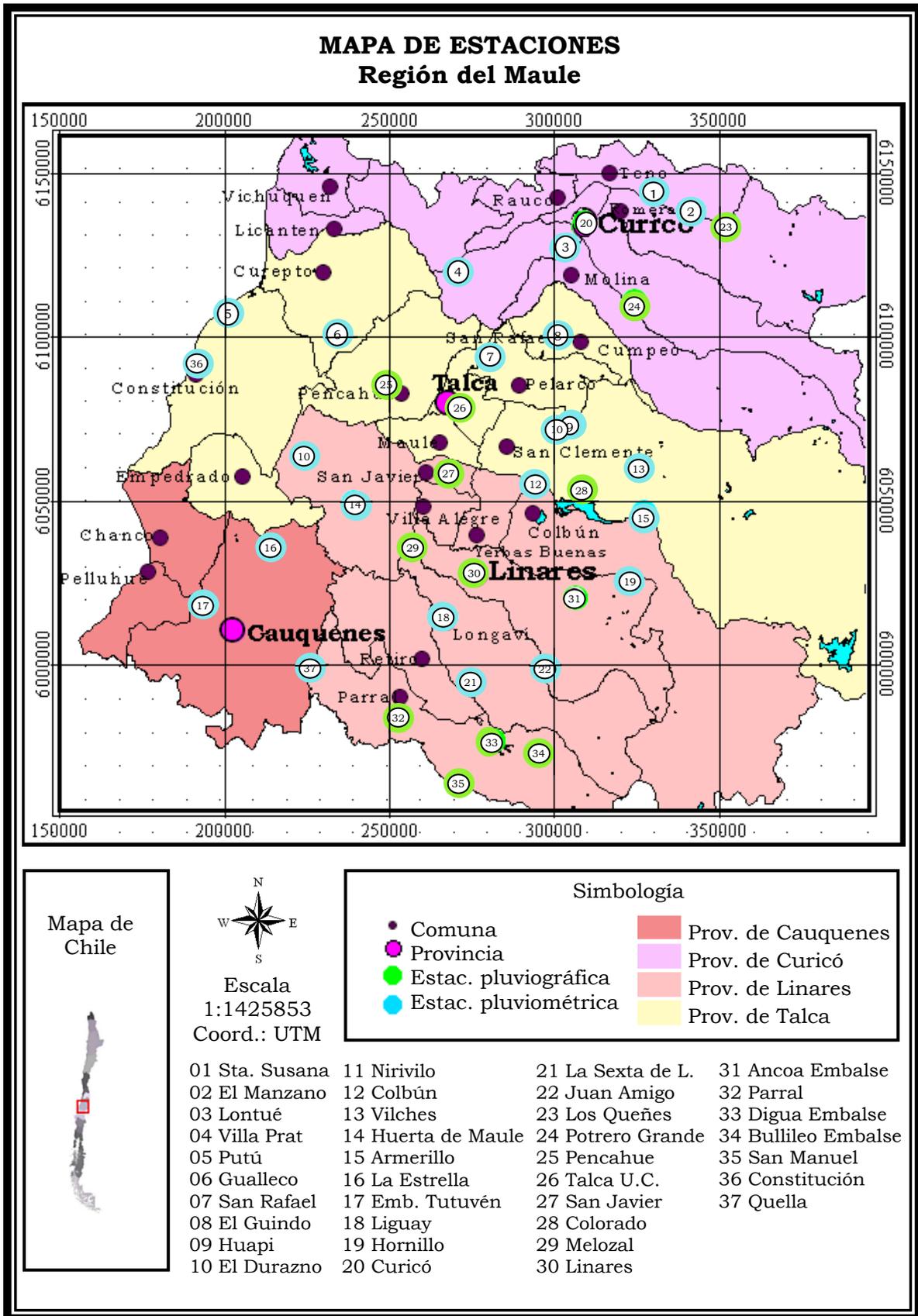


Figura N° 25: Distribución de estaciones Región del Maule
Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Parámetros

El diseño de obras de conservación de aguas y suelos demanda adicionalmente el contar con parámetros físicos definidos. En este marco se presentan los parámetros necesarios para el cálculo de las dimensiones físicas de cada obra utilizados por el simulador EIAS, como alternativa cuando el usuario no cuenta con ellos.

Coefficiente de escorrentía: Los valores entregados por el simulador suponen que el suelo está bajo la condición 3 del Método del Número de Curva elaborado por la U.S. Soil Conservation Service, esto es, saturado por lluvias anteriores con significativo aumento de la escorrentía superficial.

Tabla N° 13: Coeficiente de escorrentía

| Textura del suelo | Tasa de infiltración (mm/h) |
|--------------------------|------------------------------------|
| Arenosa | 0.7 |
| Limosa | 0.8 |
| Arcillosa | 0.9 |

Coefficiente de rugosidad: Es una sugerencia a los valores de n dados por Horton para ser empleados en la fórmula de Manning.

Tabla N° 14: Coeficiente de rugosidad

| Superficies | Condiciones | | | |
|---|--------------------|---------------|----------------|--------------|
| | Perfectas | Buenas | Regular | Malas |
| Canales y zanjas | | | | |
| Canales revestidos con concreto | 0.0120 | 0.0140 | 0.0160 | 0.0180 |
| En tierra, alineados y uniformes | 0.0170 | 0.0200 | 0.0220 | 0.0250 |
| En roca, lisos y uniformes | 0.0250 | 0.0300 | 0.0330 | 0.0350 |
| En roca, con salientes y sinuosos | 0.0350 | 0.0400 | 0.0450 | ----- |
| Sinuosos y de escurrimiento lento | 0.0225 | 0.0250 | 0.0275 | 0.0300 |
| Degradados en tierra | 0.0250 | 0.0275 | 0.0300 | 0.0330 |
| Con lecho pedregoso y bordos de tierra, enhierbados | 0.0250 | 0.0300 | 0.0350 | 0.0400 |

Velocidad de infiltración mínima: Se entregan los valores para la capacidad mínima de infiltración de los suelos, dado por el Soil Conservation Service y utilizados por el Método de Evaluación de Infiltración de Horton.

Tabla N° 15: Velocidad de infiltración mínima

| Clase de suelo | Tasa de infiltración (mm/h) |
|-----------------------|------------------------------------|
| A | 7.62 - 11.5 |
| B | 3.81 - 7.62 |
| C | 1.27 - 3.81 |
| D | 0 - 1.27 |

Donde,

Clase A: Suelos con bajo potencial de escurrimiento y elevada capacidad de infiltración, aún cuando están húmedos (arenosa, areno-limosa).

Clase B: Suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados, de mediana a alta profundidad y buen drenaje (arenosa, franco-arenosa, arcillosa).

Clase C: Suelos con escasa capacidad de infiltración cuando están saturados (franco-arcillosa, arcillosa).

Clase D: Suelos muy arcillosos con elevado potencial de escurrimiento, y por lo tanto, baja capacidad de infiltración, la que en algunos casos puede ser 0.

Velocidad de infiltración promedio: Los siguientes valores fueron extraídos del libro Obras para la Conservación de Aguas y Suelos (Pizarro *et al.*, 2005), en el que se encuentra la siguiente tabla que relaciona la textura del suelo con la tasa de infiltración.

Tabla N° 16: Velocidad de infiltración promedio

| Textura del suelo | Tasa de infiltración (mm/h) |
|--------------------------|------------------------------------|
| Arenosa | 50 |
| Franco-Arenosa | 25 |
| Franca | 12 |
| Franco-Arcillosa | 7 |

Velocidad de diseño: En el siguiente cuadro se muestran las Velocidades máximas permitidas en canales (Agres y Scoates, 1939, aumentada con valores de Foster, 1967).

Tabla N° 17: Velocidad de diseño

| Material | Velocidad de inf. (m/s) |
|--|--------------------------------|
| Suelo arenoso muy suelto | 0.30 - 0.45 |
| Arena gruesa o suelo arenoso suelto | 0.46 - 0.60 |
| Suelo arenoso promedio | 0.61 - 0.75 |
| Suelo franco-arenoso | 0.76 - 0.83 |
| Suelo franco de aluvión | 0.84 - 0.90 |
| Césped de crecimiento ralo o débil | 0.9 |
| Suelo franco pesado o franco-arcilloso | 0.90 - 1.20 |
| Suelo con vegetación regular | 1.22 |
| Suelo arcilloso o cascajoso | 1.20 - 1.50 |
| Césped vigoroso | 1.52 - 1.83 |
| Conglomerados, cascajo cementado, pizarra blanda | 1.80 - 2.40 |
| Roca dura | 3.00 - 4.5 |
| Hormigón | 4.51 - 6.00 |

6.2. Simulador EIAS

A continuación se señalan los cambios que se realizaron al simulador EIAS en comparación con el simulador EIAS on-line y las innovaciones incorporadas.

6.2.1. Interfaz

El diseño de la interfaz gráfica se compone de elementos típicos del ambiente relacionado al sistema operativo MS Windows. La aplicación consta de distintos formularios desplegados a través de menús y botones durante su ejecución.

La distribución espacial de los elementos en cada formulario de diseño de obras se compone de lo siguiente (figura N°26): Menú principal, barra de herramientas, ingreso de datos (input) y resultado (output).

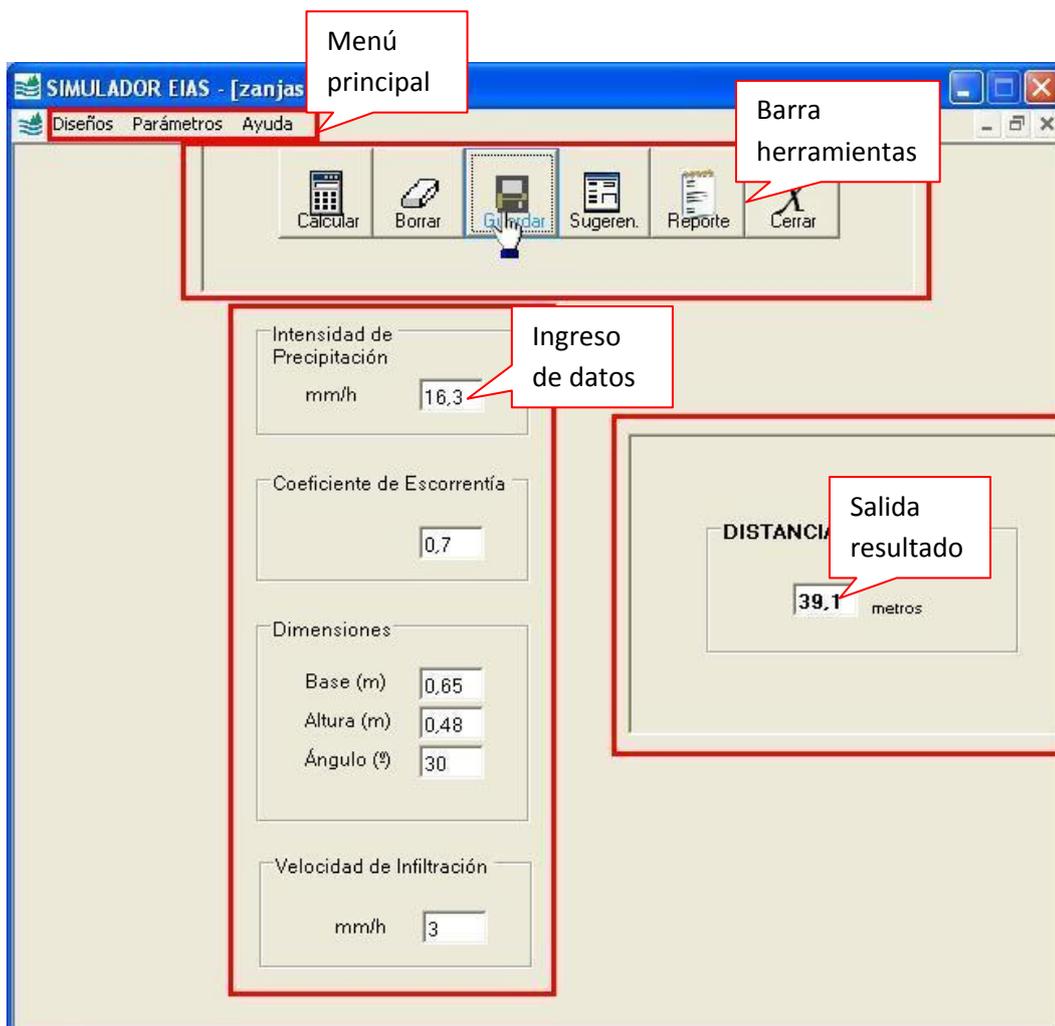


Figura N° 26: Interfaz usuario
Fuente: Captura del simulador EIAS

6.2.2. Menú principal

El menú principal se mantiene visible permanentemente y consta de tres submenús; Diseños, parámetros y ayuda. La información de cada submenú se desplegará automáticamente al hacer *click* con el ratón o *mouse* y su contenido se explica en los siguientes esquemas:

Diseños: El Simulador EIAS entrega la opción de calcular dimensiones físicas para zanjas de infiltración, canales de desviación o terrazas de infiltración. Para las zanjas y terrazas, existe una ventana para cada variable. El orden de despliegue se muestra en el siguiente esquema:

Diseños

- Zanjas de infiltración
 - Distanciamiento
 - Base
 - Altura
- Canales de desviación
- Terrazas de infiltración
 - Distanciamiento
 - Base
 - Altura

Parámetros: En este submenú se encuentra disponible la ayuda para obtener las variables necesarias en el cálculo de los distintos diseños. El esquema del despliegue de las opciones se muestra a continuación:

Parámetros

- Intensidad
 - Estación más Cercana
 - Serie propia
- Coeficientes
 - Escorrentía
 - Rugosidad
- Velocidad de infiltración

- Clase de suelo
- Textura
- Velocidad de diseño

Ayuda: Consiste en mostrar información e imágenes correspondientes a cada obra de conservación que diseña el Simulador EIAS; adicionalmente se despliega también una ventana con información general y un *link* a la página *web* del grupo EIAS. A continuación se muestra el esquema para este submenú:

Ayuda

- Zanjas de infiltración
- Canales de desviación
- Terrazas de infiltración
- Conceptos
- Acerca de EIAS

6.2.3. Barra de herramientas

En este sector de la pantalla se encuentran los botones que el usuario debe presionar para calcular el resultado de su diseño, usar valores sugeridos, guardar los datos como texto, borrar información no deseada y/o generar reporte y cerrar.

6.2.4. Ingreso de datos

El Ingreso de datos se refiere a todas las casillas que el usuario tendrá que llenar obligatoriamente para conseguir el resultado. Estos datos están condicionados al cumplimiento de algunos requisitos básicos según la variable. El requisito general, es que todas las entradas sean numéricas y positivas. Las casillas no permiten ingresar letras, símbolos (salvo la coma) o espacios.

La unidad en la que se deben ingresar los datos se especifica claramente al costado de la casilla. Para algunas variables está considerado sólo un rango de números como entrada válida.

6.2.5. Resultados de dimensiones

Los resultados aparecen al momento de presionar el botón calcular, habiendo completado todos los datos correctamente. Sin embargo, el software permite borrar las variables y su resultado tantas veces como se desee para obtener la medida de diseño más óptimo posible.

La unidad en la que se encuentra el resultado se indica al lado de la casilla. Generalmente este resultado es en metros, salvo los resultados asociados a los canales de desviación que entrega caudal (m^3/s) y pendiente (m/m).

6.2.6. Salidas

Durante la ejecución del diseño, el *software* almacena temporalmente toda la información ingresada, la selección de estaciones, las descripciones de tipo o superficie de suelo al escoger el coeficiente y los resultados obtenidos. El usuario tiene dos opciones que le permiten conservar el diseño una vez cerrada la pantalla o el programa. Estas alternativas son guardarlo como documento de texto (figura N°27) o generar un reporte para luego imprimirlo (figura N°28).

El diseño se guarda en un archivo de texto plano, es decir, en el block de notas que viene con el sistema operativo Windows. La dirección en la que se

guarda la escoge el usuario, pudiendo visualizar este archivo cada vez que lo desee, con la posibilidad adicional de imprimirlo.

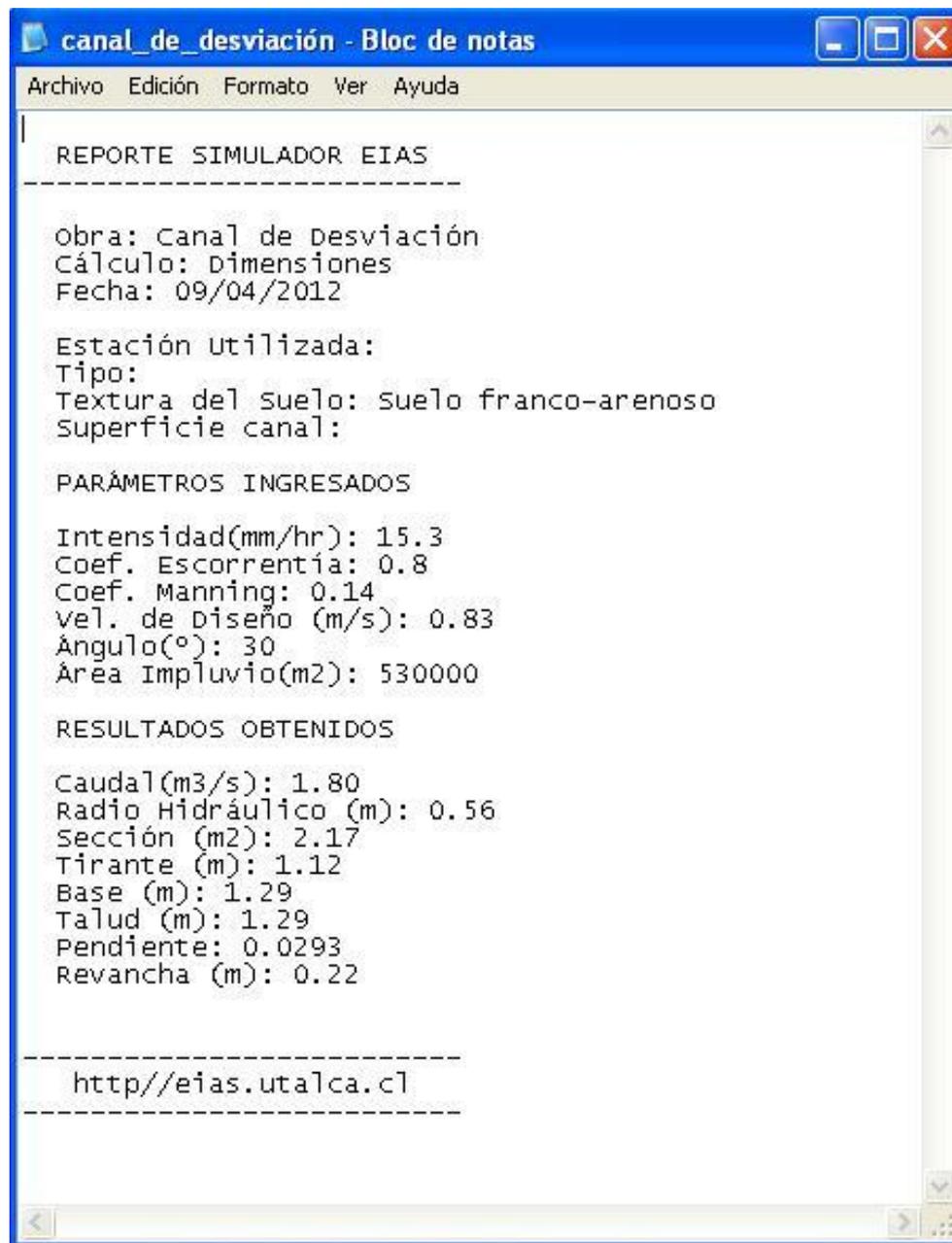


Figura N° 27: Documento de texto generado por el simulador
Fuente: Captura del simulador EIAS

El reporte que genera el simulador EIAS, cuenta con la misma información que el archivo de texto. Sin embargo, se incluye un dibujo explicativo con todas las dimensiones ubicadas en los lugares que corresponde. El reporte se imprime directamente, presionando el botón indicado.

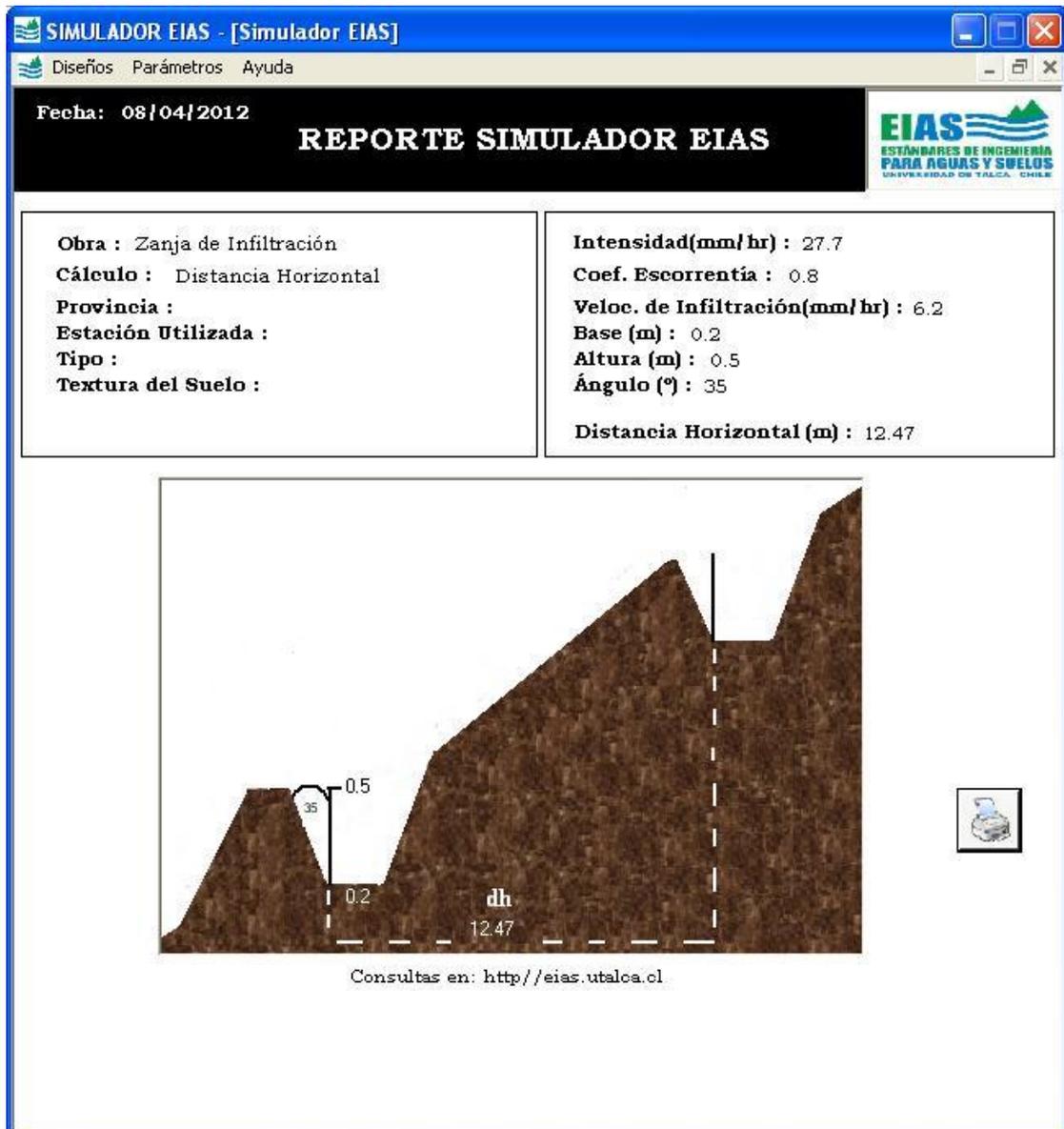


Figura N° 28: Reporte para ser enviado a la impresora
Fuente: Captura del simulador EIAS

6.2.7. Ayudas

La ayuda se despliega en el menú principal, en donde existe una opción para cada obra. Esta ayuda consiste en información acerca del diseño de las obras, sus dimensiones y los pasos a seguir para su construcción en terreno. En este último punto, se detalla la preparación del área de trabajo, qué hacer con la tierra removida, qué diseño es más conveniente, las dimensiones más recomendadas, etc.

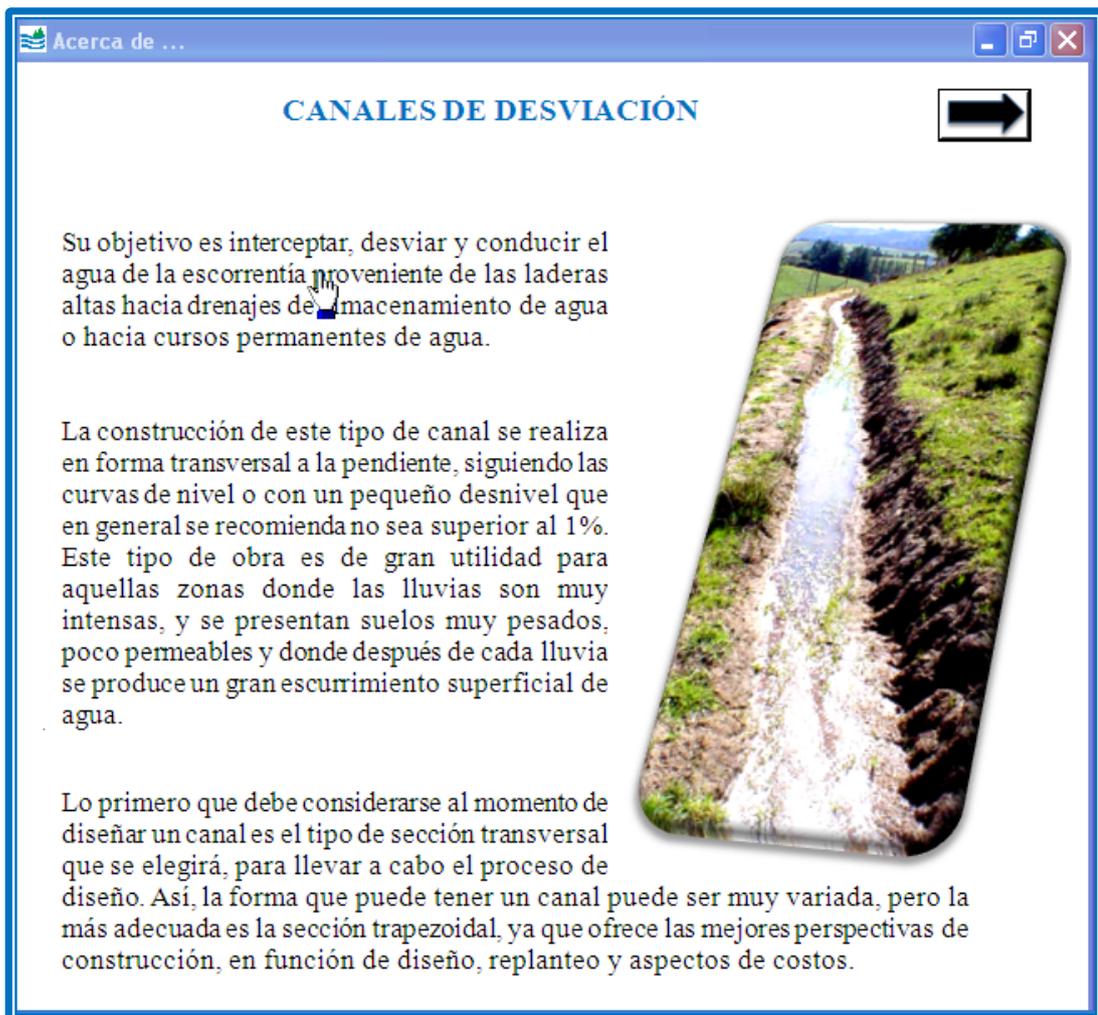


Figura N°29: Vista de la ventana de ayuda
Fuente: Captura del simulador EIAS

6.2.8. Diseños

6.2.8.1. Zanjas de infiltración

Las variables a buscar en el diseño de zanjas son la distancia horizontal, la base y la altura. Cada una de estas variables se busca en un formulario distinto, pero con la misma interfaz, en donde sólo cambian algunas etiquetas (ver figura N°30).

Internamente, todos los cálculos se han hecho considerando un diseño trapezoidal de la zanja, a diferencia del simulador anterior. Las dimensiones se entregarán en metros, mientras que en ingreso se especifica claramente la unidad que se requiere.

The screenshot shows the 'SIMULADOR EIAS - [zanjas de Infiltración]' window. The menu bar contains 'Diseños', 'Parámetros', and 'Ayuda'. The toolbar includes 'Calcular', 'Borrar', 'Guardar', 'Sugeren.', 'Reporte', and 'Cerrar'. The main area contains several input fields: 'Intensidad de Precipitación' (mm/h) with value 27.7; 'Coeficiente de Escorrentía' with value 0.8; 'Dimensiones' section with 'Base (m)' (0.2), 'Altura (m)' (0.5), and 'Ángulo (°)' (35); and 'Velocidad de Infiltración' (mm/h) with value 6.2. A large box on the right displays the calculated 'DISTANCIA HORIZONTAL' as 12.4 metros.

Figura N°30: Ventana para el cálculo de zanjas
Fuente: Captura del simulador EIAS

6.2.8.2. Canales de desviación de aguas

Para los canales de desviación de aguas, al igual que con las zanjas, se ha considerado un diseño trapezoidal. Su resultado comprende un conjunto de soluciones, entre las que se incluyen el caudal a conducir, la pendiente, la base, etc. (figura N°31). Todas estas variables se calculan de una vez y serán siempre las mismas, lo que hace que los canales tengan sólo una opción en el menú principal.

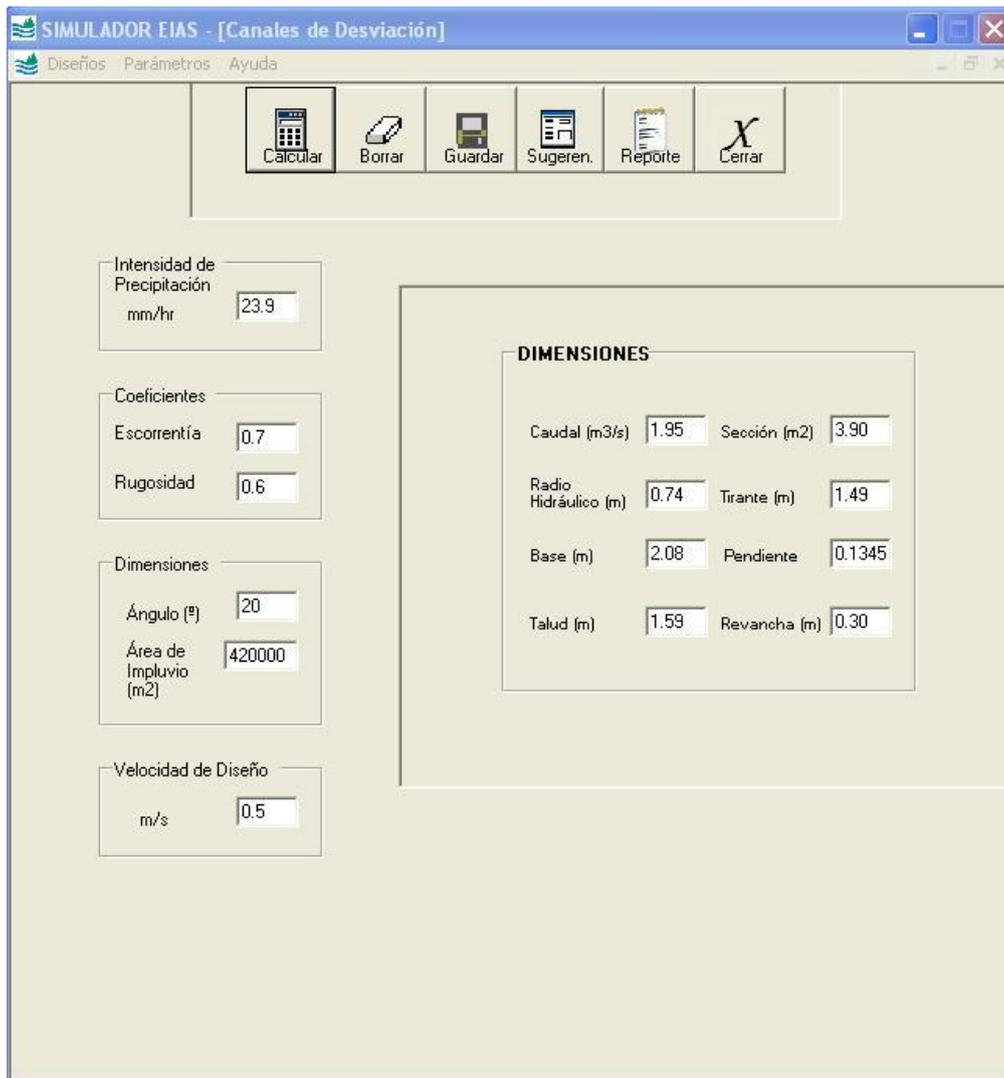


Figura N°31: Ventana para el cálculo de canales
Fuente: Captura del simulador EIAS

6.2.8.3. Terrazas de infiltración

Este diseño no aparecía en el simulador anterior y su cálculo exige parámetros similares a los de la zanja de infiltración, siendo su resultado también similar en cuanto a las dimensiones que se buscan. Estas dimensiones corresponden a distancia horizontal, base y altura, todas en formularios distintos accesibles desde el menú principal (figura N°32).

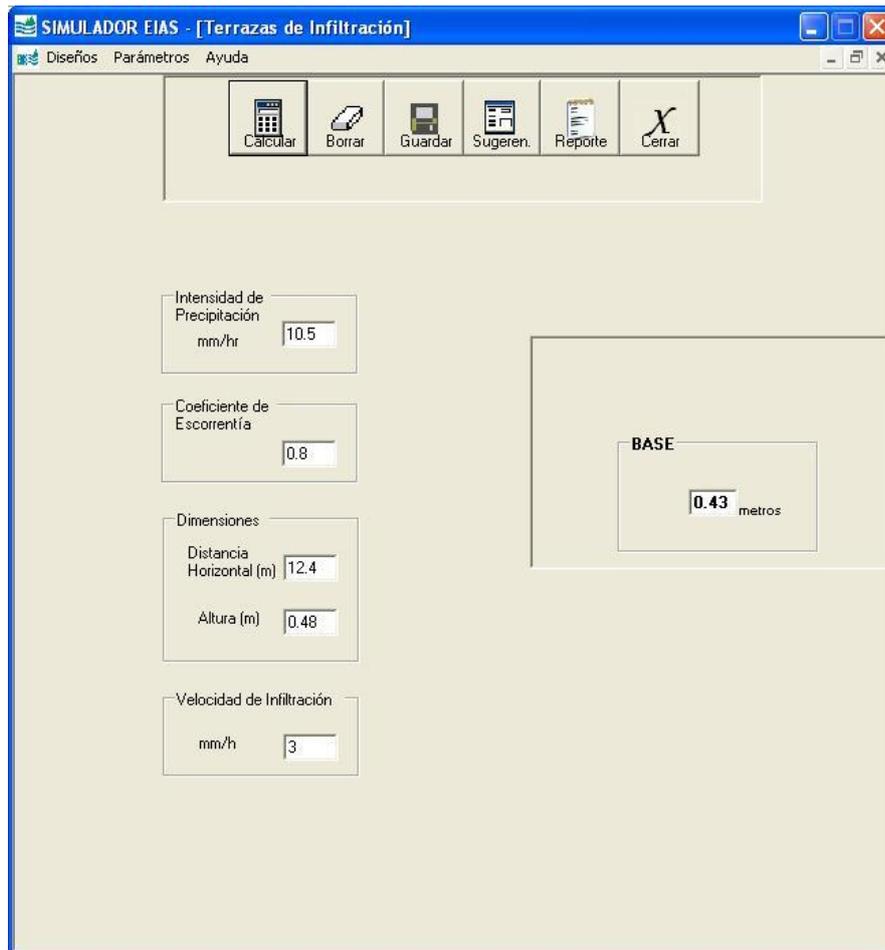


Figura N° 32: Ventana para el cálculo de terrazas
Fuente: Captura del simulador EIAS

6.2.9. Parámetros

En la figura N°33 se muestra el formato utilizado para ofrecer al usuario los distintos valores paramétricos. Éstos constan de una serie de descripciones, generalmente sobre tipo o textura de suelo, donde el usuario

deberá seleccionar el más cercano al área de trabajo. En algunos casos existe una barra graduada que se activa al seleccionar la característica y se ajusta manualmente según la intensidad.

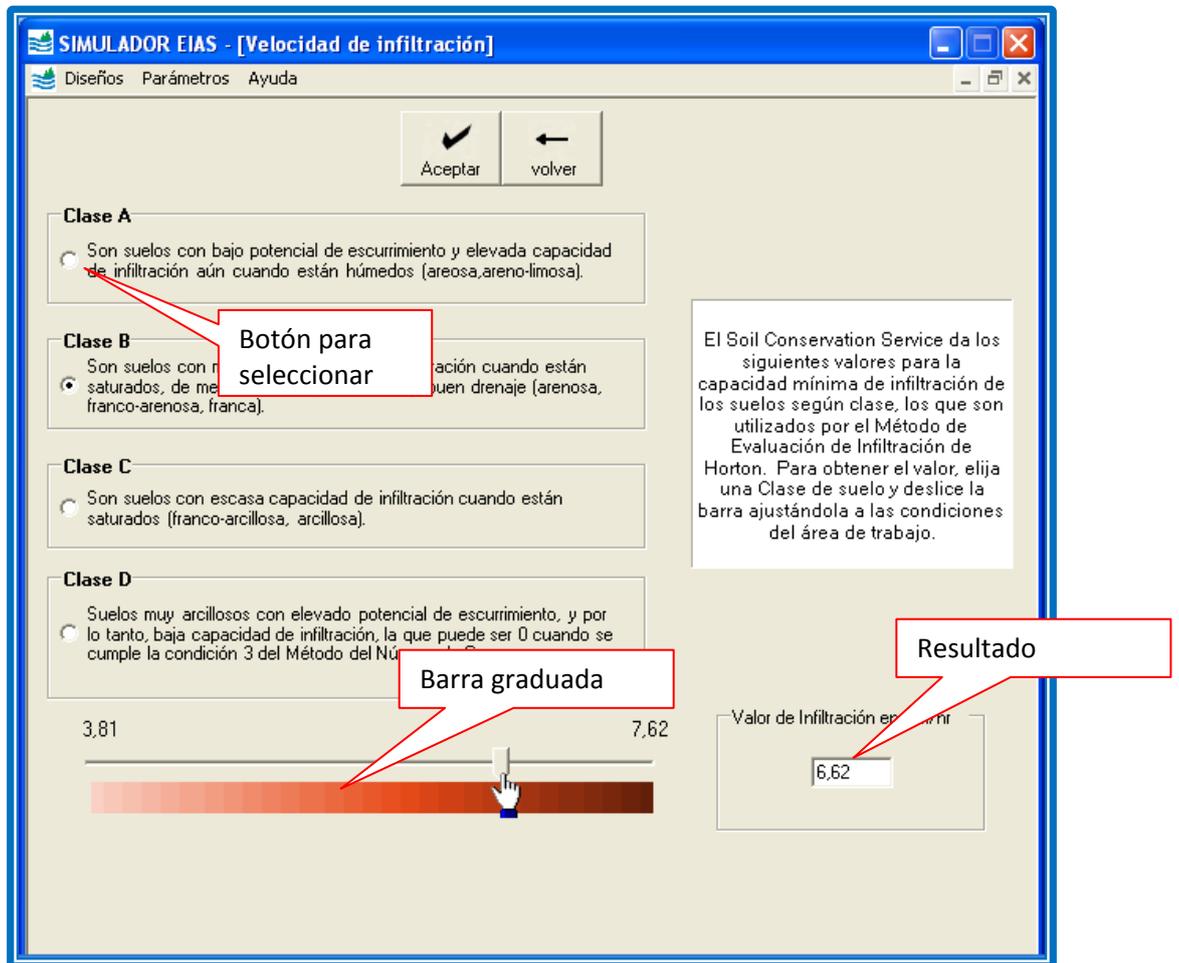


Figura N° 33: Ventana para la obtención de parámetros
Fuente: Captura del simulador EIAS

6.3. Intensidad

6.3.1. Estación más cercana

Este formulario muestra un mapa por cada provincia donde se observan las principales rutas, línea férrea, embalses, etc. Las casillas para ingresar los datos deben llenarse antes de calcular la intensidad (ver figura N°34). El usuario ingresa las coordenadas UTM para ubicar el área de trabajo y a su vez el programa escoge la estación más cercana a ese lugar. De no contar con las coordenadas se puede elegir la estación manualmente.

Las estaciones se muestran con un círculo blanco y se seleccionan haciendo un *click*, visualizando inmediatamente su nombre y tipo en la esquina superior izquierda de la pantalla. Todas cuentan internamente con una serie de coeficientes que permiten calcular la intensidad, después de ingresado el período de retorno y la duración. Este resultado queda visible y listo para ser incorporado al formulario de diseño, o borrarlo si no es del gusto del usuario.

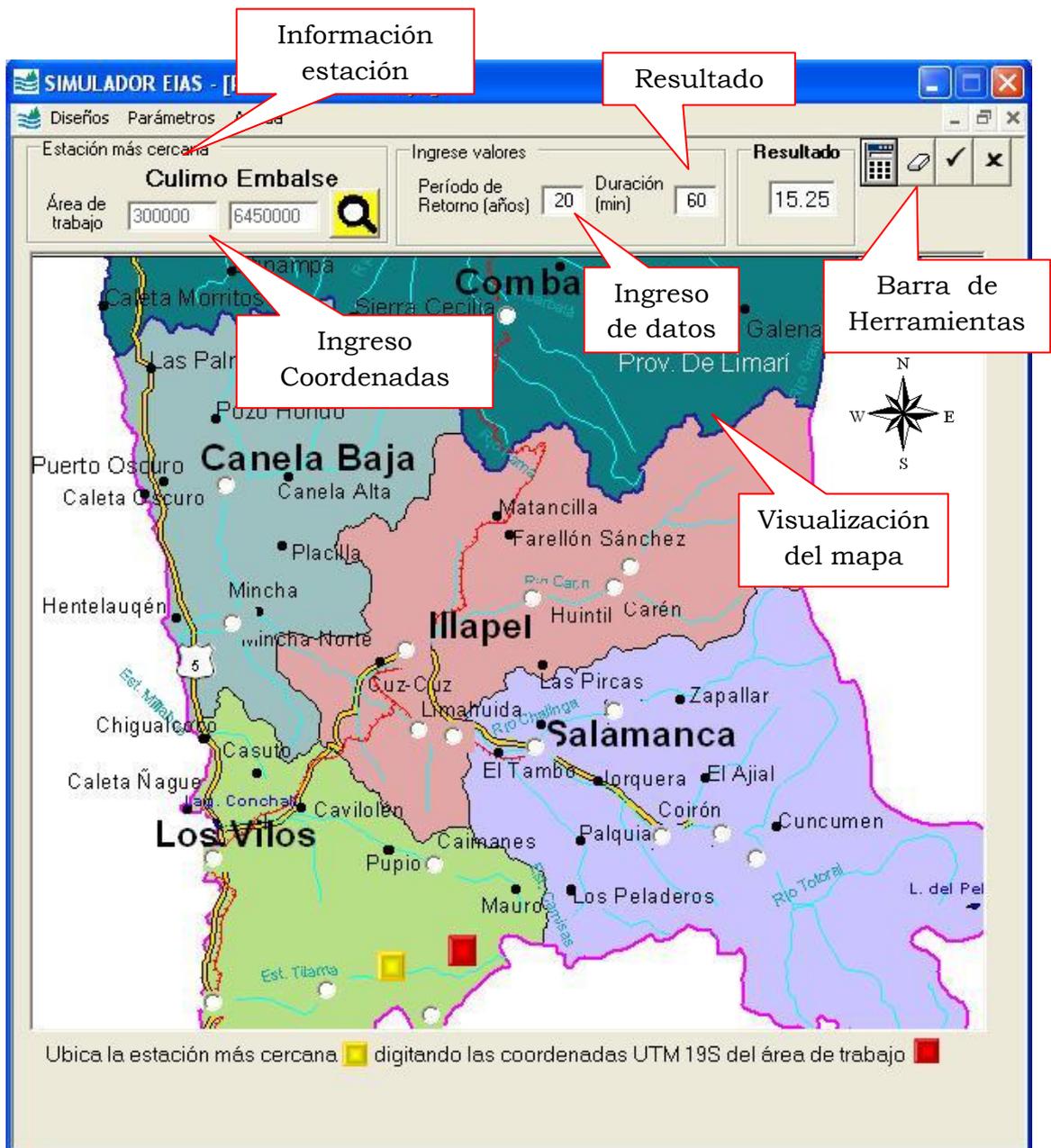


Figura N° 34: Ventana de cálculo de la intensidad con estación más cercana
Fuente: Captura del simulador EIAS

6.3.2. Serie propia

En este formulario (figura N°35), el usuario ingresa el período de retorno (T) en años, junto con una serie de precipitaciones a intervalos de una hora. Las precipitaciones deben ser en milímetros, restringiendo el ingreso de datos sólo a números positivos. El programa invalida cualquier caracter que no sea número, enviando un mensaje para corregir los datos. Además, la serie debe ser mayor o igual a 15 años.

| 6.7 | 21.6 | |
|------|------|--|
| 10 | 18 | |
| 20.4 | 19 | |
| 21.6 | 18.1 | |
| 16.4 | 17.2 | |
| 19.2 | 13.5 | |
| 19 | 13.4 | |
| 20.3 | 14 | |
| 21.2 | 21.3 | |
| 21 | 19.6 | |
| 12.5 | 23.4 | |
| 10.5 | 16.7 | |
| 13.2 | 11 | |
| 19.6 | 19.5 | |
| 20.4 | 19.4 | |
| 15.6 | 12.1 | |
| 18.3 | 13.4 | |
| 16.1 | 19.5 | |
| 17.2 | | |
| 18.6 | | |

Figura N° 24: Ventana de cálculo intensidad utilizando serie propia de datos
Fuente: Captura del simulador EIAS

Al momento de abrir esta ventana, se especifica que los datos requeridos deben ser precipitaciones máximas en una hora, ya que los diseños así fueron creados.

Al presionar el botón calcular se desplegará un recuadro blanco que contiene el valor final de intensidad asociada al periodo de retorno escogido (figura N°36). Además, los datos son sometidos al ajuste de la función Gumbel y se les aplican las pruebas de bondad del ajuste K-S y R^2 , presentados en la parte superior del recuadro.

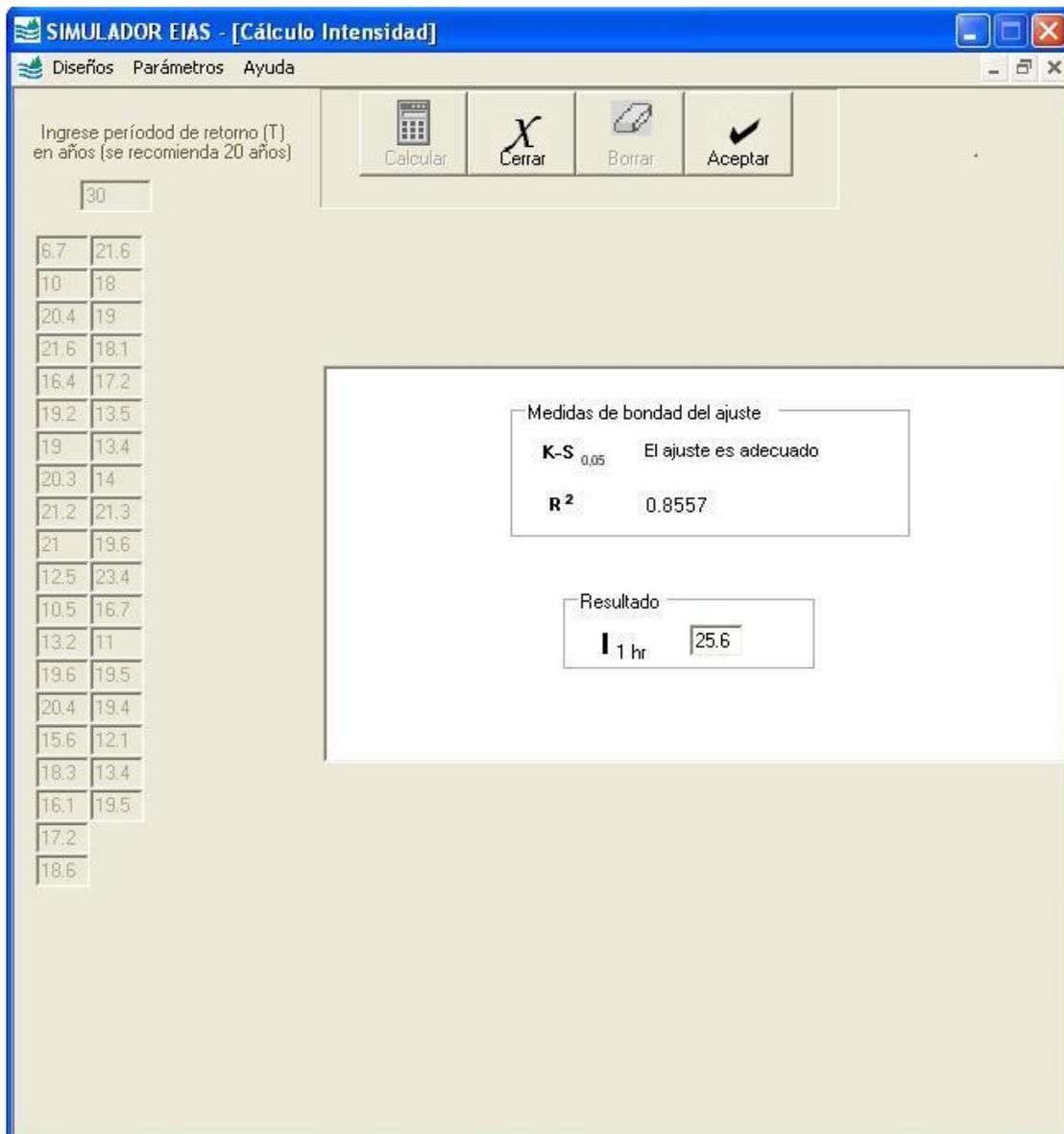


Figura N° 36: Ventana de cálculo de la intensidad utilizando serie propia de datos
Fuente: Captura del simulador EIAS

6.3.3. Pruebas de validación del Simulador

Con el objetivo de probar las capacidades del simulador y ello en base a información confiable de terreno, se probaron los ingresos de datos con los valores límites, continuando con los no válidos, como letras y números negativos para los cuales el simulador debía arrojar un mensaje de error. En total se realizaron alrededor de 50 ejemplos por cada obra. Además, se probó la fluidez del programa y la correcta aparición de ventanas y mensajes, la generación de archivos y de impresiones, entre otros aspectos. En el apéndice N°II se encuentran algunos ejemplos de pruebas con respecto a los diseños que realiza el programa.

7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El análisis será hecho en base al cumplimiento de los objetivos propuestos al principio de esta memoria, y los propuestos por la sociedad EIAS. Además, se analizarán las intensidades, como factor clave en el diseño de obras de conservación.

7.1. *Software*

Respecto a la interfaz, el ambiente Windows asegura una rápida adaptación e interacción intuitiva por parte del usuario. Así por ejemplo, si se analiza la interfaz de MODIPE, en ambiente DOS, éste se encuentra obsoleto, mientras que MAUCO necesita de una planilla Excel para funcionar, pues no es un programa independiente.

Por otra parte, el simulador EIAS *on-line*, brindaba una interfaz poco amigable y escasamente estética, con sólo dos diseños (canales y zanjas). Sin embargo, fue el fruto de una larga investigación y una versión bastante mejorada de sus antecesores MODIPE y MAUCO. Su dirección apuntaba a un sistema en línea, inserto en la página *web* del grupo EIAS. Para acceder a él, se solicitaba una clave al administrador del simulador, quién además, administraba el foro y modificaba las estaciones y su información.

Esta aplicación se retiró de la página *web* el año 2009, porque sus resultados erróneos provocaron que el administrador se abstuviera de otorgar más claves, lo que finalmente hizo prescindir de sus servicios. No obstante, el simulador llegó a tener 170 usuarios, con más de 600 sesiones iniciadas. Esto indica el interés de investigadores, profesionales y estudiantes por contar con este tipo de herramientas disponibles de forma expedita y gratis, lo que ha impulsado al Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental EIAS a iniciar una nueva etapa.

El nuevo Simulador EIAS, usará la página *web* como un medio que permite descargar una versión demo. Esta versión es una aplicación ejecutable y fácil de instalar. Los pasos a seguir en el cálculo de un determinado diseño

son claros y los tiempos de respuesta rápidos. El usuario podrá contactarse para obtener la versión final a través del mismo medio.

Entre el simulador EIAS *on-line* y el ejecutable, existe sólo el cálculo de las dimensiones físicas de zanjas y canales como procedimientos en común. El simulador EIAS *on-line* sirvió como un bosquejo al que se le agregó y quitaron funciones de acuerdo a los requerimientos y posibilidades actuales.

En la versión final, se elimina la exigencia de clave para ingresar al simulador, ya que al ser una aplicación ejecutable se instala directamente en el computador del usuario. La idea de exigir clave fue para mantener un control del número de interesados, lo que en este caso se hará mediante el número de descargas del *software* y luego, por los solicitantes de la versión completa.

Por otra parte y como algo que diferencia la actual versión de la antigua, tampoco existirá un administrador que modifique, agregue o elimine una estación. Esta opción surgió por la constante actualización de la información de estaciones y precipitaciones. La nueva versión se hizo con los datos más actualizados y la totalidad de estaciones disponibles en cada región, con un método que permite tener información sólida y confiable sobre las intensidades a distintos períodos de retorno. No obstante, queda la posibilidad de lanzar nuevas versiones actualizadas como sucede con cualquier otro *software*.

La nueva versión del Simulador EIAS, cuenta con tres diseños de obras y el único que no varió en sus cálculos fue el de canales de desviación, mientras que las zanjas cambiaron de sección rectangular a sección trapezoidal. Esto se acerca más a la realidad observada en terreno, planteándose un cálculo más fidedigno y seguro.

Las terrazas de infiltración de agua se incorporaron como nuevo diseño a disposición de los usuarios. El ingreso de datos y su resultado, así como el de todas las obras, obedecen a las fórmulas entregadas en el manual creado por el grupo EIAS. Su cálculo es de pocas variables y su resultado es en metros.

7.2. Información Base

Cada opción de diseño es fácil de llenar y sin muchas variables. Aunque, el no tener la información necesaria podría resultar en un proceso demoroso y tedioso. Para ello, el Simulador cuenta con una alternativa a cada parámetro exigido, que permite buscar según su situación, valores que se acerquen a la realidad.

Sabiendo a qué tipo de suelo pertenece el área en donde se efectuará la obra, se podrá obtener el coeficiente de escorrentía, las velocidades de infiltración y la velocidad de diseño ofrecidas en el menú *parámetros*. Para el coeficiente de rugosidad, basta con saber la superficie que tendrá el canal. La única excepción es la obtención de la intensidad, detallada más adelante.

Los rangos de valores dados para cada una de las variables antes mencionadas se presentan a continuación:

- Coeficiente de escorrentía: este coeficiente es una proporción, por lo que su valor fluctúa entre 0 y 1. Sin embargo, los valores ofrecidos parten desde el 0.7 para garantizar un diseño seguro.
- Coeficiente de rugosidad: este valor se inicia en 0.012 para canales revestidos con concreto en condiciones perfectas, hasta 0.040 para un lecho pedregoso y de borde con tierra en malas condiciones.
- Velocidades de infiltración: se presentan valores cercanos a 0 en suelos clase D (arcillosos con elevado potencial de escurrimiento), llegando a 11,5 mm/h para suelos clase A (arenosos y alta capacidad de infiltración). Cabe mencionar que éstos son los valores mínimos recomendados por el Soil Conservation Service.

También se muestran valores promedio que van desde 7 mm/h para suelos de textura arcillosa, hasta 50 mm/h para suelos arenosos. Estos

valores se extraen del libro Diseño de Obras para la Conservación de Aguas y Suelos, creado por el grupo EIAS.

- Velocidad de diseño: las velocidades máximas recomendadas en canales van desde 0.3 m/s para suelos arenosos, hasta 6 m/s para hormigón.

En el ingreso de datos por parte del usuario, se establecen rangos específicos para las variables que corresponden a proporciones y ángulos. En el resto de los datos de entrada, se restringen sólo los datos negativos, ceros y letras, dejando al criterio del usuario los límites superiores de estas variables.

7.2.1. Índice de Tormenta

La intensidad es el factor más delicado a considerar, ya que varía dependiendo de la zona geográfica en donde se encuentre el área de trabajo. Además, por la naturaleza de los cálculos, tiene una alta influencia en los resultados.

Para el cálculo óptimo de los diseños, se recomienda utilizar las intensidades máximas en una hora con un período de retorno de 20 años. En la figura N°37, se muestra una comparación de estos datos para todas las estaciones pluviográficas que emplea el simulador EIAS.

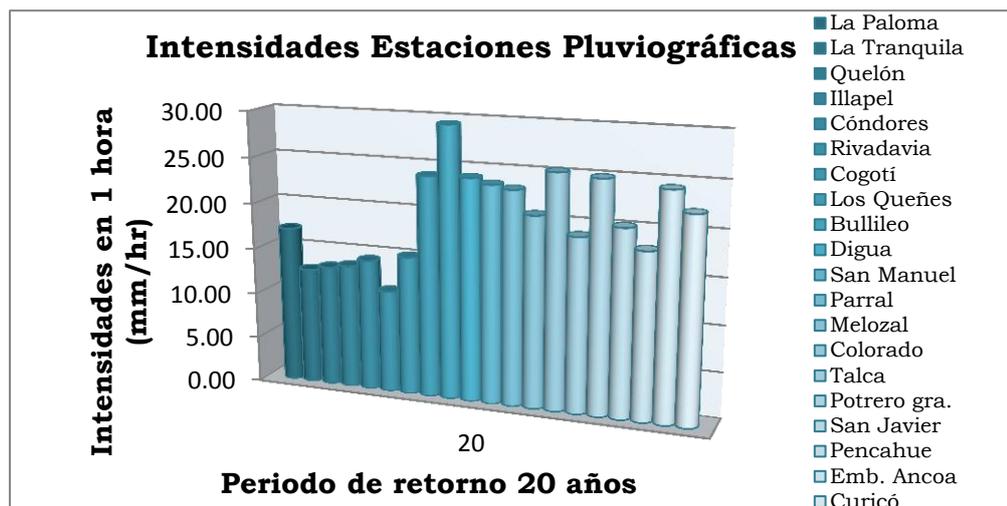


Figura N° 37: Gráfico de todas las estaciones pluviográficas
Fuente: Elaboración propia

Se observa en el gráfico claramente la variabilidad de los datos según la zona geográfica. Las siete primeras barras corresponden a las estaciones de la

región de Coquimbo y son visiblemente más bajas, mientras que las intensidades de la región del Maule casi doblan a las de Coquimbo, en algunas situaciones

El cálculo de las obras con intensidades de precipitación en una hora minimiza el riesgo de éstas a sufrir colapsos ante una lluvia abundante o tormenta. Sin embargo, el mayor número de estaciones meteorológicas en Chile cuenta sólo con estaciones pluviométricas, las que entregan datos a intervalos de 24 horas.

El siguiente gráfico agrupa todas las estaciones pluviográficas utilizadas para el simulador EIAS, haciendo una comparación de sus respectivos valores de intensidades para intervalos de 1 y 24 horas, a un período de retorno de 20 años.

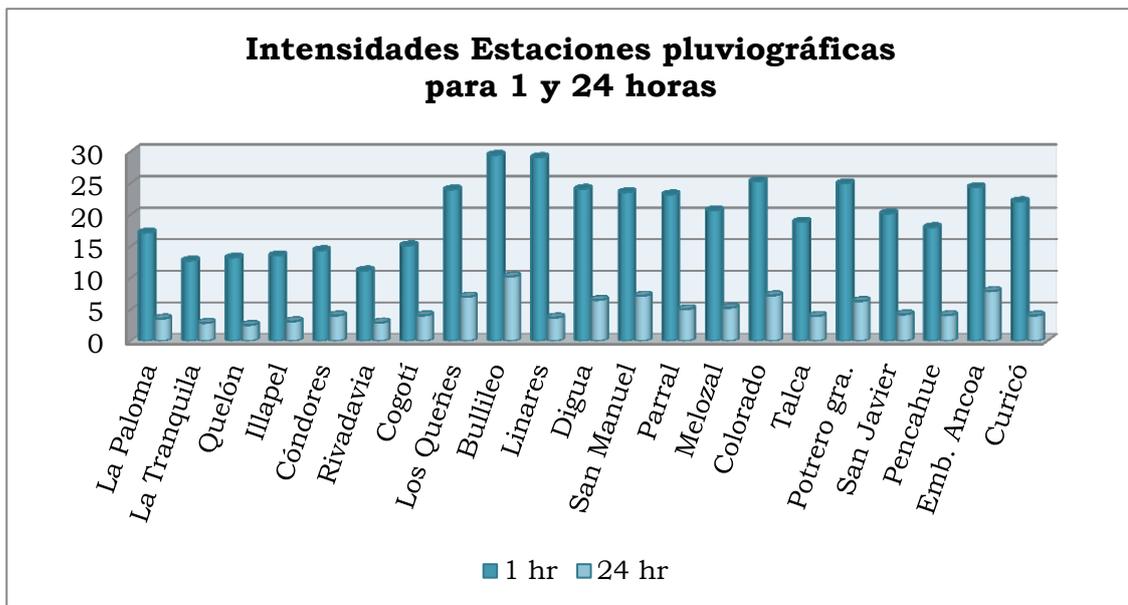


Figura N° 38: Gráfico de todas las estaciones pluviográficas
Fuente: Elaboración propia

Cada estación consta de dos barras, para los intervalos de 1 y 24 horas respectivamente. Se observa la disminución de los valores de intensidad de lluvia en los intervalos de 24 horas para la totalidad de las estaciones. Esto significa que al contar sólo con valores de 24 horas, se está subestimando la intensidad de lluvia considerada para el área de trabajo y el cálculo de los

diseños. En la figura N°39 se muestra la tendencia de las intensidades al aumentar el intervalo de tiempo para los períodos de retorno A, B y C.

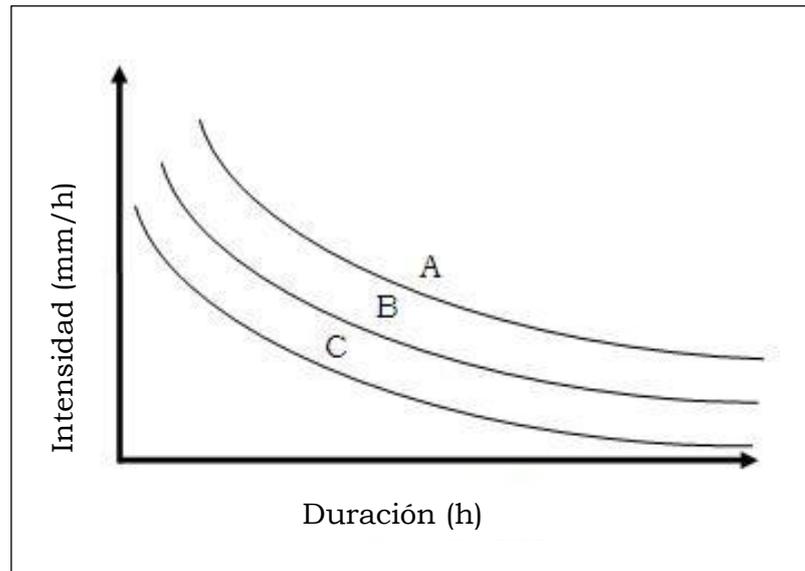


Figura N° 39: Gráfico de aparición de las Curvas IDF
Fuente: Elaboración propia

En la actualidad, la DGA cuenta con 7 pluviógrafos en la región de Coquimbo y 15 en el Maule. En cambio, los pluviómetros son alrededor de 49 y 22 para ambas regiones respectivamente. Esto se debe a la complejidad de los instrumentos y a su valor económico.

Para mejorar esta realidad, se trabajó utilizando el método del Índice de Tormenta. Esto significó estimarle a una estación pluviométrica que sólo cuenta con valores de intensidad en intervalos de 24 horas, la intensidad a un intervalo de 1 hora. La figura N°40 muestra una visión general del aumento significativo en los valores de intensidades de las estaciones pluviométricas de ambas regiones para un periodo de 20 años.

Intensidades Estaciones pluviométricas

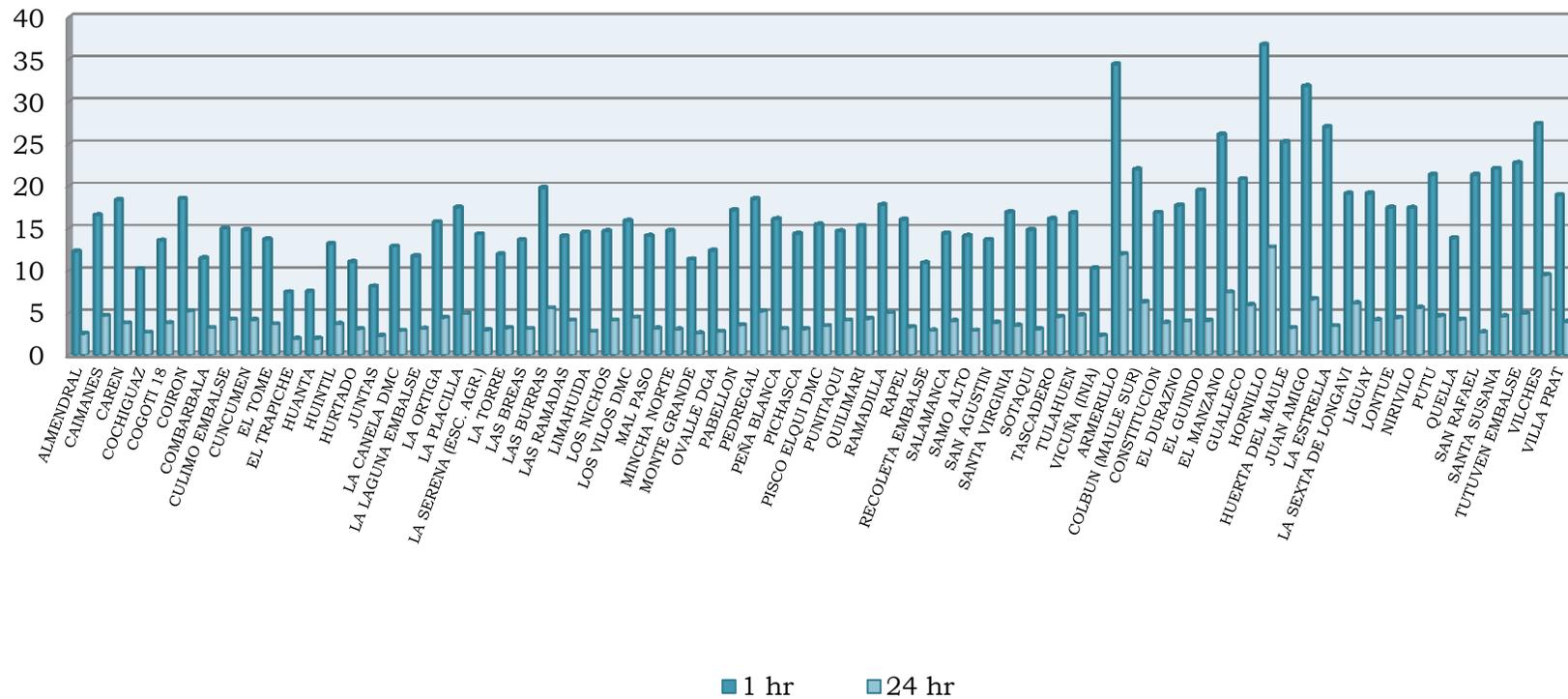


Figura N° 40: Gráfico de todas las estaciones pluviométricas
Fuente: Elaboración propia

A modo de ejemplo, se calcularon cada una de las dimensiones físicas de las zanjas de infiltración con distintos valores de intensidad, con el objetivo de visualizar la participación que tiene esta variable en el resultado final. Así, para una zanja diseñada con los parámetros de la tabla N°18, el distanciamiento horizontal sería de 15,91 metros considerando una intensidad de 10 mm/h. Esta distancia disminuye a medida que aumenta la intensidad de lluvia como lo muestra la imagen de referencia en la figura N°41. A lo largo de una ladera, la cantidad de zanjas a construir será mayor si la distancia horizontal es pequeña.

Tabla N° 18: Cálculo de distanciamiento

| Variable | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Intensidad (mm/h) | 10 | 15 | 20 |
| Coefficiente de escorrentía | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Velocidad de infiltración(mm/h) | 4 | 4 | 4 |
| Ángulo (°) | 30 | 30 | 30 |
| Base (m) | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Altura (m) | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Distanciamiento horizontal (m) | 15.91 | 10.60 | 7.95 |

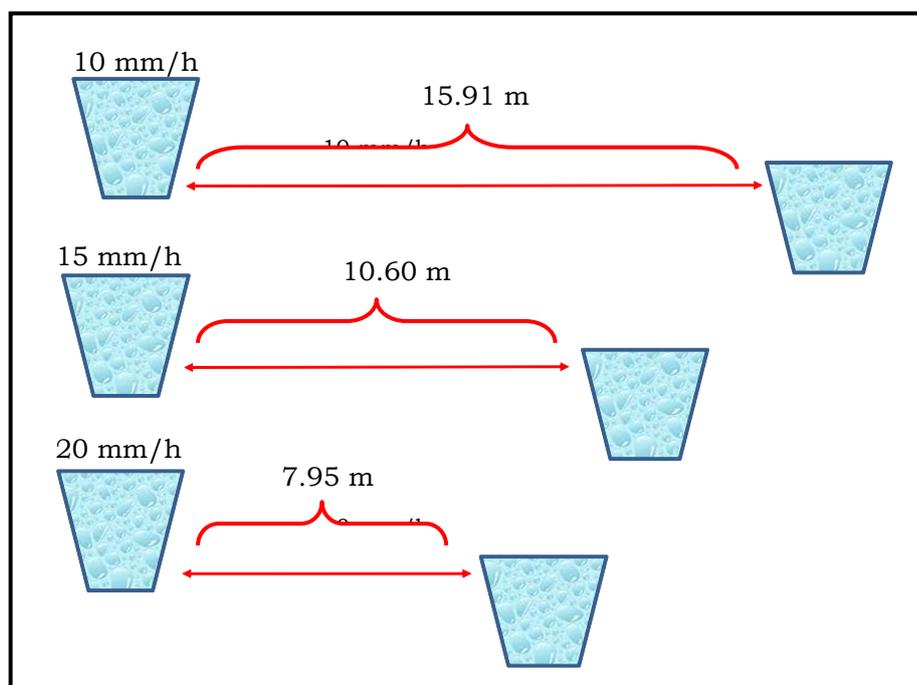


Figura N° 41: Distanciamiento de zanjas con distintos valores de intensidad de lluvia

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo con el mismo ejemplo, cuando las condiciones de terreno obligan a dejar un distanciamiento horizontal fijo, las dimensiones propias de la zanja se deben acomodar para recibir un incremento en las precipitaciones. Es por esto que al hacer los cálculos con distintos valores de intensidad, dependiendo de la variable a buscar, se agrandará la base o la altura como se observa en las figuras N° 42 y 43. Esto permite recibir una mayor cantidad de agua por parte de la ladera sin, aumentar el número de obras a construir.

Tabla N° 19: Cálculo de base

| Variable | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Intensidad (mm/h) | 10 | 15 | 20 |
| Coeficiente de escorrentía | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Velocidad de infiltración(mm/h) | 4 | 4 | 4 |
| Ángulo (°) | 25 | 25 | 25 |
| Altura (m) | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Distanciamiento horizontal (m) | 12.0 | 12.0 | 12.0 |
| Base (m) | 0.22 | 0.39 | 0.57 |

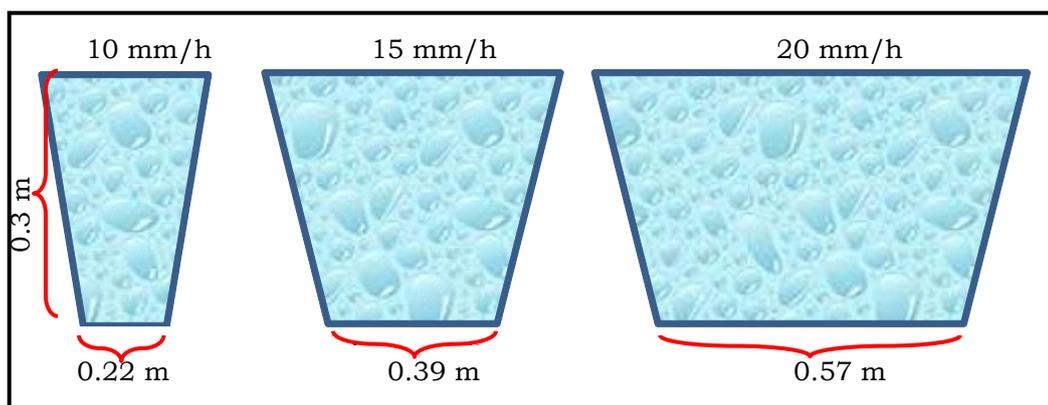


Figura N° 42: Base de zanjas con distintos valores de intensidad de lluvia

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 20: Cálculo de la altura

| Variable | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Intensidad (mm/h) | 10.0 | 15.0 | 20.0 |
| Coeficiente de escorrentía | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Velocidad de infiltración(mm/h) | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| Ángulo (°) | 25.0 | 25.0 | 25.0 |
| Base (m) | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Distanciamiento horizontal (m) | 12.0 | 12.0 | 12.0 |
| Altura (m) | 0.25 | 0.35 | 0.43 |

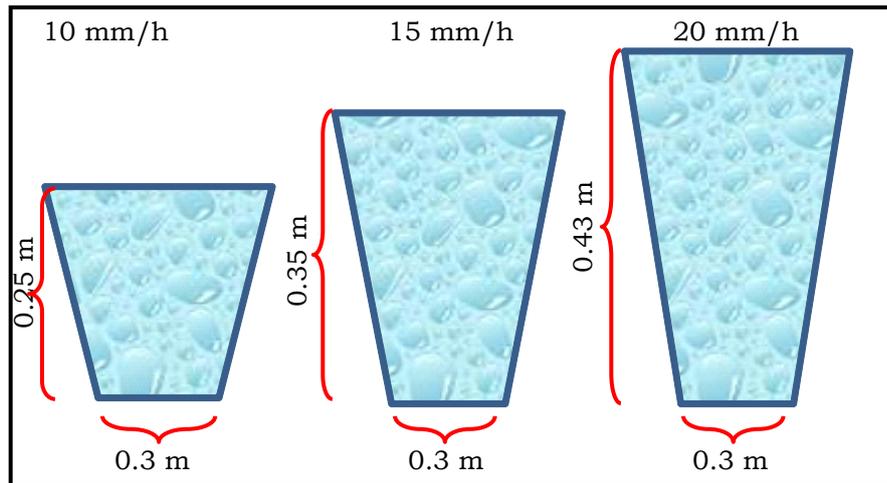


Figura N° 43: Altura de zanjas con distintos valores de intensidad de lluvia

Fuente: Elaboración propia

Todas las obras a diseñar por el simulador EIAS siguen el mismo principio; ser capaces de captar e infiltrar o movilizar el agua caída, por lo que se espera un comportamiento similar al mostrado por las zanjas ante un aumento de las intensidades en su cálculo. Esto evidencia las diferencias que se obtienen en los resultados al no contar con las intensidades de lluvia correctas y actualizadas para cada lugar.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En función de los resultados alcanzados, se pueden plantear las conclusiones siguientes:

- El diseño de obras de conservación debe ser calculado desde una perspectiva global en términos matemáticos, y local en términos paramétricos. El simulador EIAS basa sus diseños en la ingeniería hidrológica y aporta los datos necesarios para que el usuario personalice su cálculo, acercándolo a la realidad del lugar de trabajo.

- El cálculo de las obras incluidas en el simulador permite el diseño de éstas, sin la necesidad de incurrir en engorrosos cálculos matemáticos y estadísticos, convirtiéndose en una herramienta práctica y a disposición de todos los usuarios. Además, el software permite el diseño de otros cálculos asociados al área de la hidrología como el ajuste de datos a la función de Gumbel, el cálculo de intensidades de precipitación y el de caudales.

- El método del Índice de Tormenta propuesto por Pizarro *et. al* (2001) y desarrollado por Cereceda (2008), se presenta como un buen estimador de curvas IDF para estaciones pluviométricas. De esta manera, en términos de datos, se aumentaron las estaciones pluviográficas de 7 a 56 en la región de Coquimbo, y de 15 a 37 en la región del Maule.

- En cuanto a la elección de la estación patrón, se establece una buena correlación entre estaciones pluviográficas y pluviométricas cuya intensidad máxima en 24 horas es similar. Este método se escogió siguiendo las recomendaciones de Cereceda (2009) como una primera aproximación; sin embargo, todas las estaciones resultaron tener un buen ajuste estadístico.

- Finalmente, el software resultante fue aprobado por el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, ya que cumple con los requerimientos y expectativas propuestas inicialmente.

Adicionalmente, se recomiendan las siguientes indicaciones:

- Los valores de intensidad de precipitación obtenidos, deben ser lo más cercanos posibles al punto de trabajo elegido, ya que esta variable varía de una región a otra influenciada por factores como la topografía, la altura, la cercanía al mar o a la cordillera de los Andes, entre otros factores.
- Se recomienda utilizar intensidades de 1 hora como medida de seguridad que prevenga el colapso de las obras, ya que las intensidades a intervalos mayores no son representativas de la realidad en terreno.
- El Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental debería ampliar la cobertura de estaciones al resto de las regiones del país, con el objetivo de ampliar el uso del simulador y del servicio a los usuarios de esta herramienta.
- Se recomienda también profundizar en el desarrollo de otros cálculos ligados al diseño de obras, como las velocidades de diseño, el tipo de suelo, los costos, etc., para obtener una versión más completa del simulador.
- Para consolidar la efectividad del simulador EIAS como herramienta de cálculo para el diseño de obras de conservación de aguas y suelos, se debería implementar algún programa piloto en alianza con alguna institución afin.
- Se recomienda al Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental seguir trabajando con las curvas IDF, permitiendo que éstas se mantengan actualizadas permanentemente, aunque actualmente la diferencia sería marginal, ya que se utilizó toda la información disponible; no obstante la tendencia en el futuro podría variar en algunos milímetros, lo cual podría ser significativo al momento de realizar los cálculos.
- Finalmente, se recomienda ampliar la cobertura de las obras que diseña el simulador, a otras de similar envergadura como son por ejemplo los diques de gravedad, cuyos costos son muy altos y su cálculo bastante complejo.

9. BIBLIOGRAFÍA

Assefa, M.; Shih, S.F. 2002. Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS. (en línea). Computers and Electronics in Agriculture 37:173-183. Consultado 27 Jun. 2011. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169902001114>.

BCN.2010. Biblioteca del Congreso Nacional: Sistema Integrado de Información Territorial (SIIT); Región de Coquimbo. Consultado el 10.10.2011. Disponible en: <http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region4/>; <http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region7>.

Cereceda, C. 2009. Propuesta de un método para la construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en estaciones pluviométricas de Chile Central. Tesis Ing. Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales.98 p.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales, Chile). 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile: informe final. Santiago, Chile. 285 p. (Publicación CIREN N° 139).

Cornejo, C. 2011. Análisis de la distribución temporal de las precipitaciones en la región del Maule. Tesis Ing. Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales.77 p.

Critchley, W.; Siebert, K.; Chapman, C. 1991. Water harvesting: A manual for the design and construction of water harvesting schemes, FAO, Roma. 215 p.

Dirección Meteorológica de Chile. Descripción climatológica. (En línea). Consultado el 15.10.2010. Disponible en: http://www.meteochile.cl/climas/climas_septima_region.html.

Donoso, C. 1994. Ecología Forestal. Editorial Universitaria S.A. Santiago. Chile. 369 p.

Foster, A. 1967. Métodos Aprobados en Conservación de Suelos. México D.F, México. Editorial F. Trillas, S.A. 411 p.

Ghumman, A.; Ahmad, M.; Hashmi, H.; Kamal, M. 2011. Regionalization of hydrologic parameters of nash mode. (en línea). *Water Resources*, Vol. 38, 6:735–744. Consultado 28 Oct. 2011. Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/4218x77144548437>.

Lacombe, G.; Cappelaere, B.; Leduc, Christian. 2008. Hydrological impact of water and soil conservation works in the Merguellil catchment of central Tunisia. (en línea). *Journal of Hydrology* (2008) 359, 210– 224. Consultado 12 Nov. 2011. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169408003284>.

Martínez de Azagra, A. 1996. *Diseño de Sistemas de Recolección de Aguas para la Repoblación Forestal*. Mundi-Prensa. Madrid, España. 230 p.

Martínez, S.; Escolero, O; Wolf, L. 2010. Total urban water cycle models in semiarid environments—quantitative scenario analysis at the area of san luis potosi, mexico. (en línea). *Water Resour Manage* 25:239–263. Consultado 4 Nov. 2011. Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/w8uw4x1085052446>.

Mauro, A. 2002. *El sistema climático: fundamentos físicos del clima*. Valparaíso, Chile. Universidad de Valparaíso Editorial. 384 p.

Pavez, M. 2004. *Determinación gráfica y matemática de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), en seis estaciones pluviográficas de la Región del Maule*. Tesis Ing. Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales. 101 p.

Pizarro, R; Abarza, A; Flores, J. 2001. Análisis comparativo de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), en 6 estaciones pluviográficas (VII Región del Maule, Chile). (en línea). Biblioteca virtual UNESCO. Consultado 14 Jun. 2011. Disponible en <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/analisismaule.pdf>.

Pizarro, R.; Aravena D.; Macaya, K.; Abarza, A.; Cornejo, M.; Labra, M; Pavez, M.; Román, L. 2007. *Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la zona centro sur de Chile*. Chile. 126 p. Documento Técnico N°7.

Pizarro, C. 1996. *Riegos localizados de alta frecuencia: goteo, microaspersión, exudación*. Madrid, España. Mundi-prensa. 513 p.

Pizarro, R.; Morales, C; Vega, L; Balocchi, F. 2009. Manual de Diseño para Obras de Recuperación y Conservación de Aguas y Suelos. Talca, Chile. Proyecto INNOVA – CORFO. Editorial Universidad de Talca. 37 p.

Pizarro, R.; Sangüesa, C.; Flores, J.; Martínez, E. 2005. Elementos de Ingeniería Hidrológica para el Mejoramiento de la Productividad Silvícola. Proyecto FDI – CORFO. Editorial Universidad de Talca. Talca, Chile 178 p.

Pizarro, R.; Sangüesa, C.; Flores, J.; Martínez, E.; García, J.; Ponce, M. 2003. Revisión y Análisis de Prácticas Tradicionales de Conservación de Aguas y Suelos en Zonas Áridas y Semiáridas de Chile Central. Proyecto FDI – CORFO. Editorial Universidad de Talca. Talca, Chile 111 p.

Punys, P.; Dumbrasuskas, A.; Kvaraciejus, A. Vyciene, G. 2011. Tools for small hydropower plant resource planning and development: a review of technology and applications. (en línea). *Energies* 4, 1258-1277. Consultado 27 Oct. 2011. Disponible en: <http://www.mdpi.com/1996-1073/4/9/1258>.

Porta, J.; López-acevedo, M; Roquero, C. 2003. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 960 p.

Suárez de Castro, F. (eds) 1980. Conservación de Suelos. Editorial IICA. Costa Rica. 315 p. (Serie de libros y materiales educativos N° 37).

Thompson, L. 1965. El suelo y su fertilidad. Barcelona, España. Editorial Reverté, S.A. 407 p.

UNESCO. 2010 F. Procesos de Erosión-Sedimentación en Cauces y Cuencas. Documento técnico N°22 (En línea). Consultado el 15.12.2011. disponible en : http://eias.entalca.cl/isi/publicaciones/erosion_y_sedimentacion_vol1.pdf.

Universidad de la Serena. 2001. Biodiversidad de la IV Región de Coquimbo *In Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo.* (en línea). La Serena, Chile. Ediciones Universidad la Serena. Consultado 15 Oct. 2010. Disponible en <http://www.biouls.cl/lrojo>.

Critchley, W., Siebert, K., Chapman, C., 1991. Water harvesting. A manual for the design and construction of water harvesting schemes, FAO, Roma. 215 p.

APÉNDICES

APÉNDICE I. Diagramas de flujo

A continuación, se detalla el diagrama de flujo para todos los cálculos de obras e intensidades del simulador EIAS. Se muestran de manera secuencial los ingresos de datos, procesos internos y resultados. El proceso interno se basó en las fórmulas descritas en la Revisión bibliográfica, capítulo 3.3.

Figura N°1: Esquema general de los diagrama de flujo para el cálculos de variables del simulador EIAS.

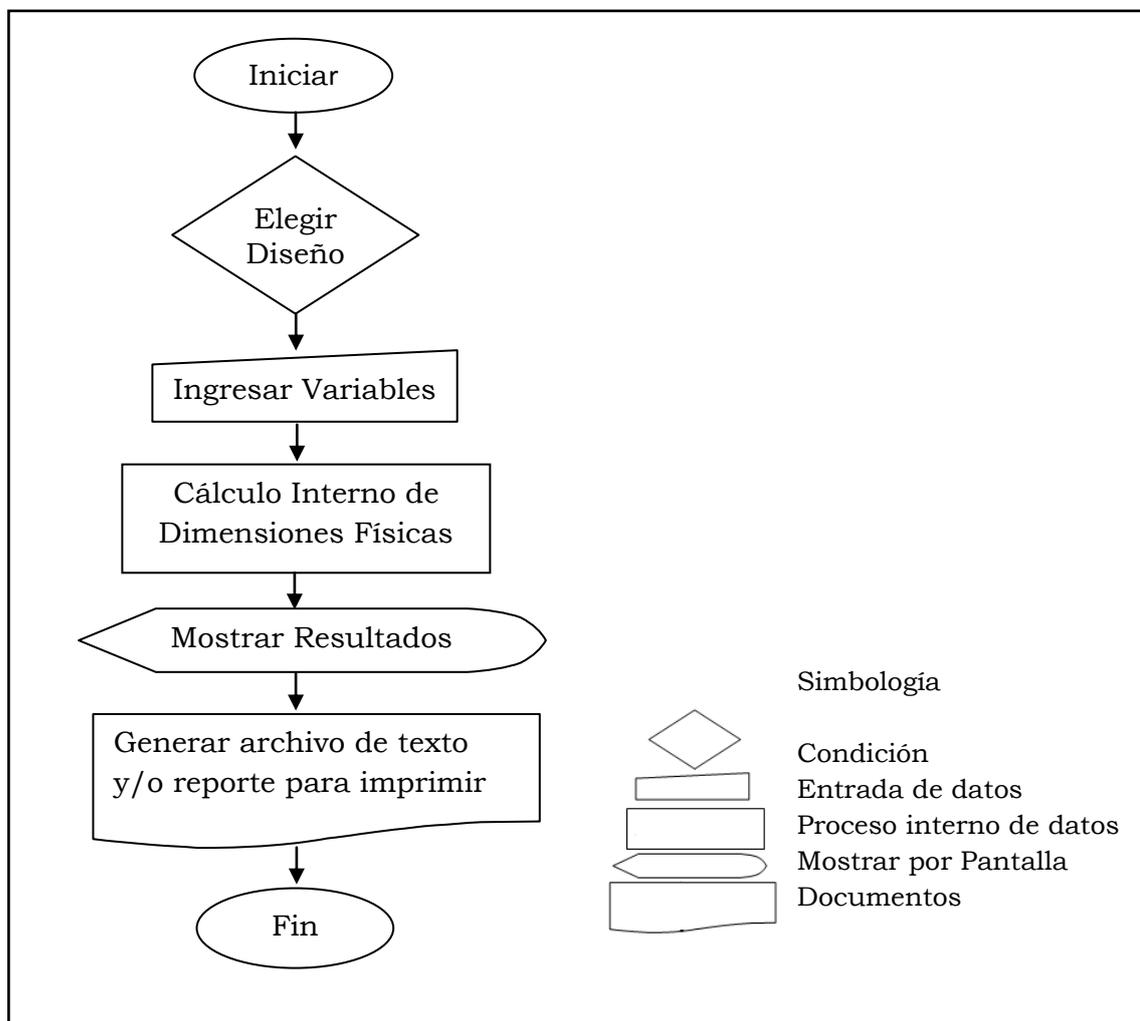


Figura N°2: Diagrama de flujo correspondiente al cálculo del distanciamiento horizontal entre zanjas de infiltración.

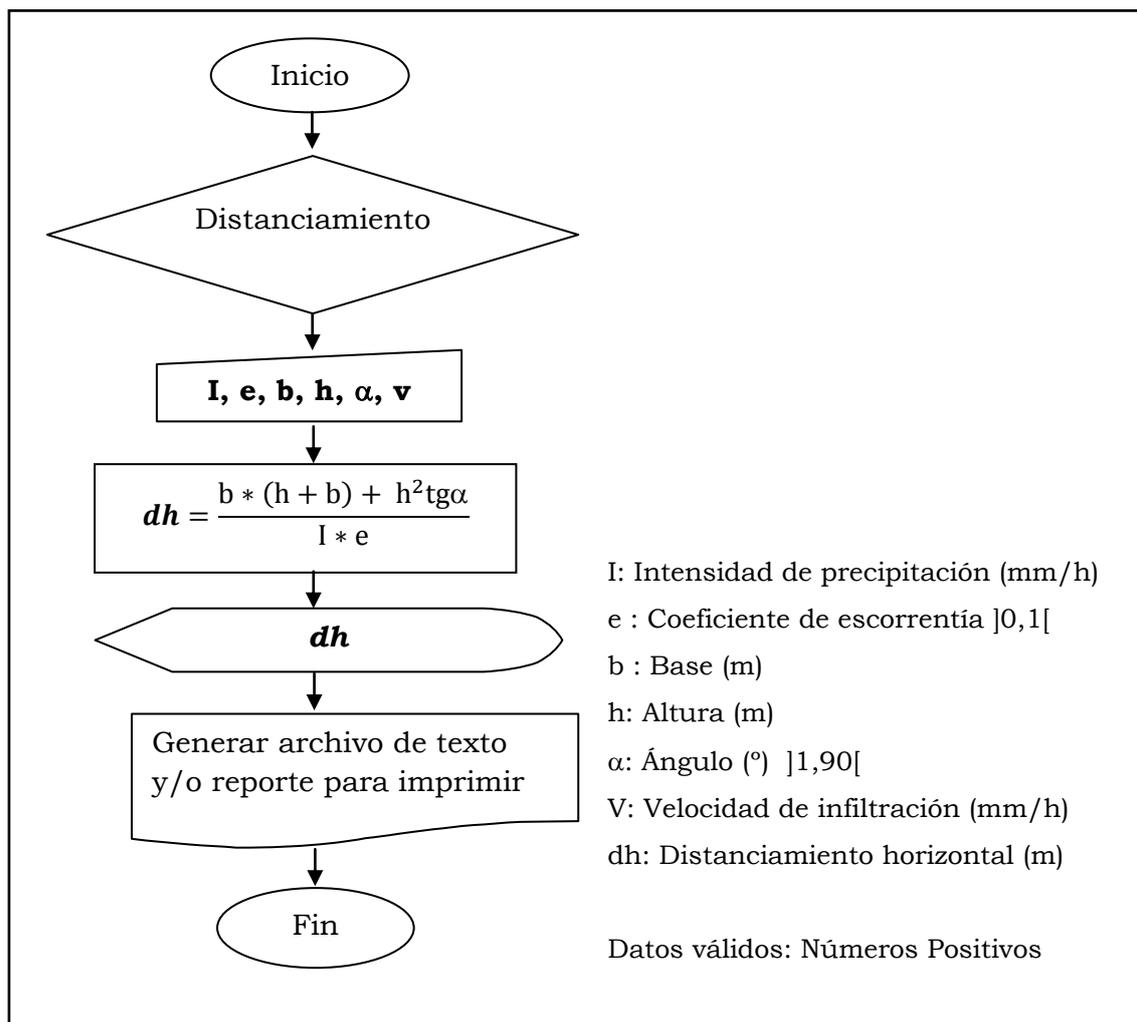


Figura N°3: Diagrama de flujo correspondiente al cálculo de la base de una zanja de infiltración.

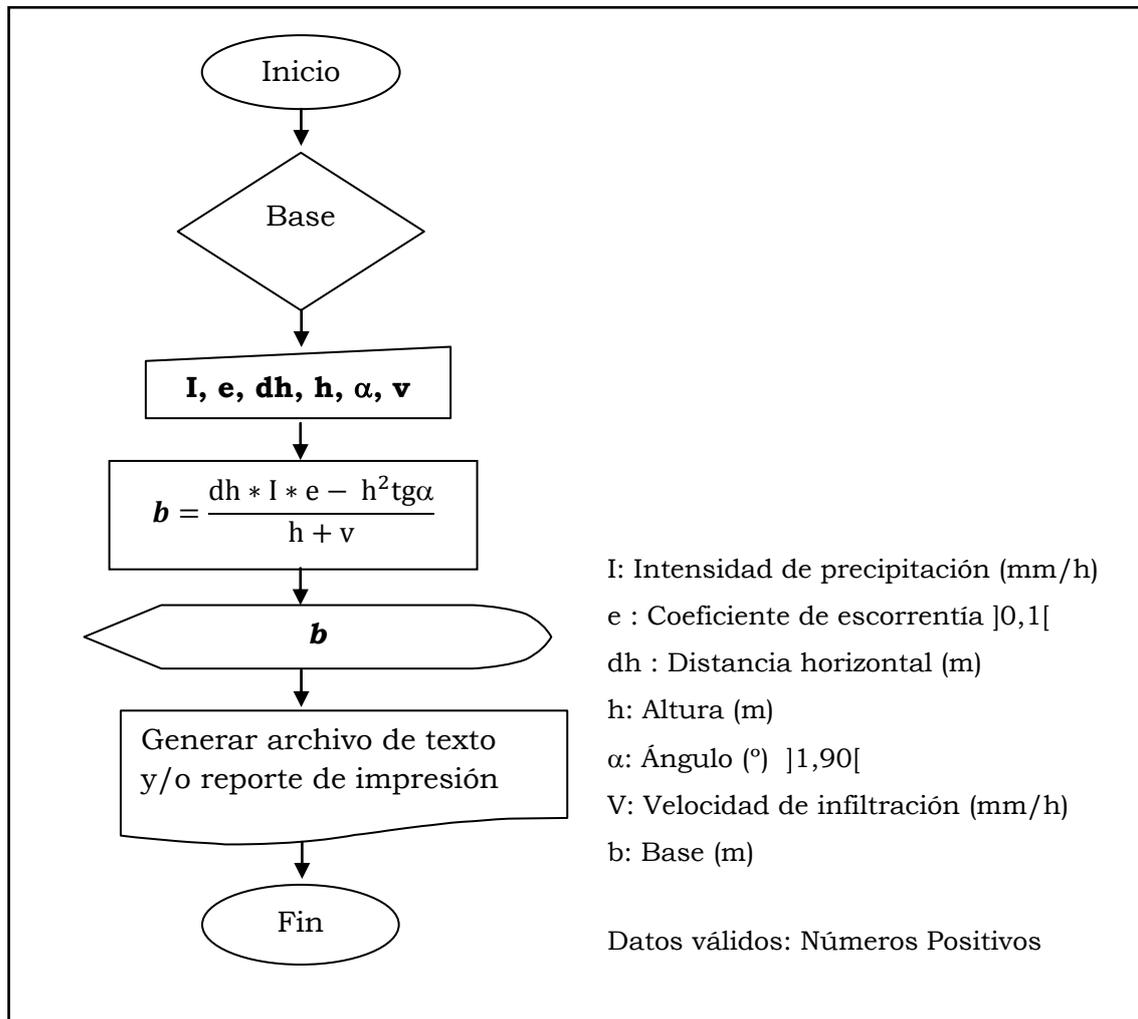


Figura N°4: Diagrama de flujo correspondiente al cálculo de la altura de una zanja de infiltración.

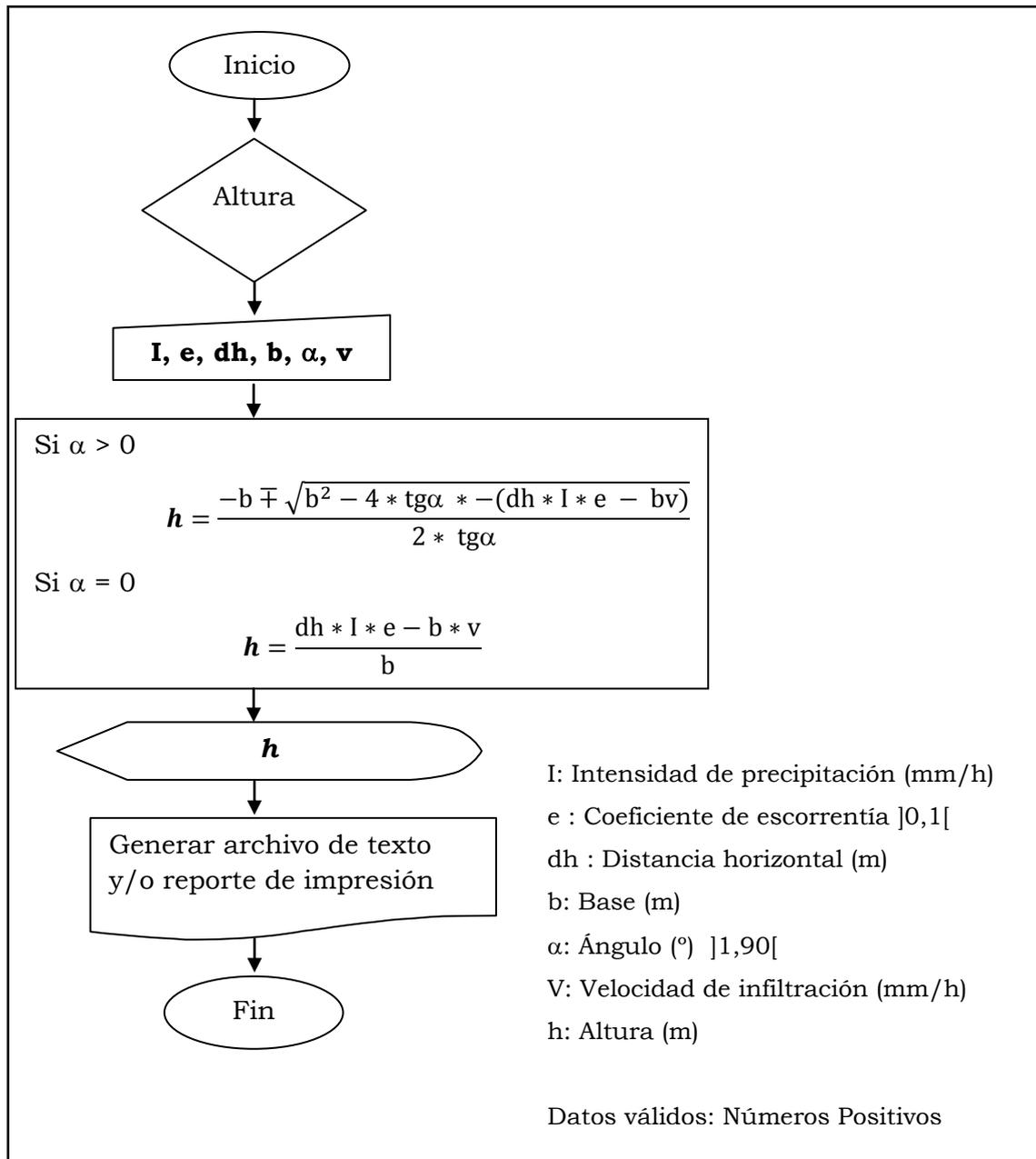


Figura N°5: Diagrama de flujo correspondiente al cálculo de parámetros para canales de desviación.

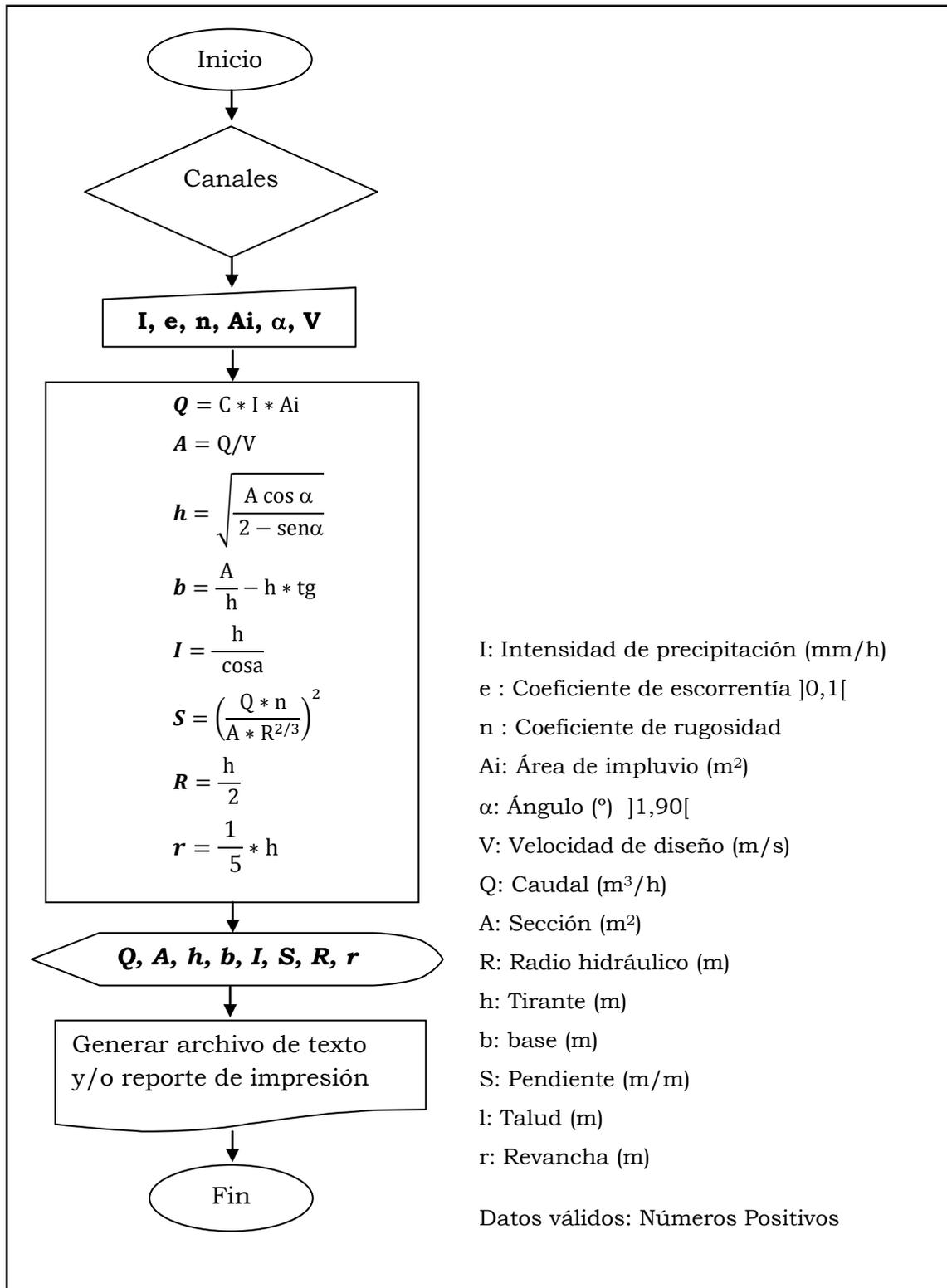


Figura N°6: Diagrama de flujo correspondiente al cálculo del distanciamiento horizontal entre terrazas de infiltración.

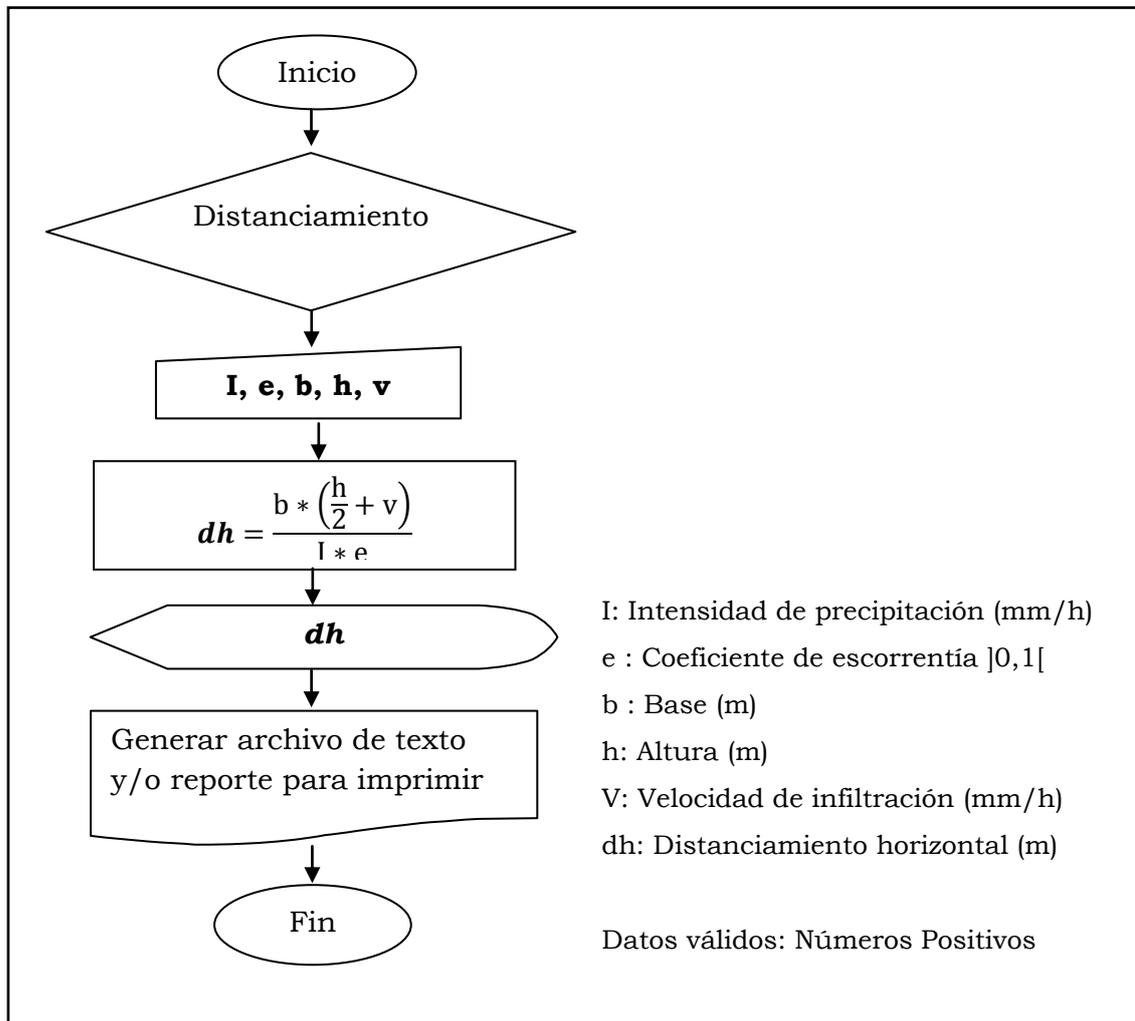


Figura N°7: Diagrama de flujo correspondiente al cálculo de la base de una terraza de infiltración.

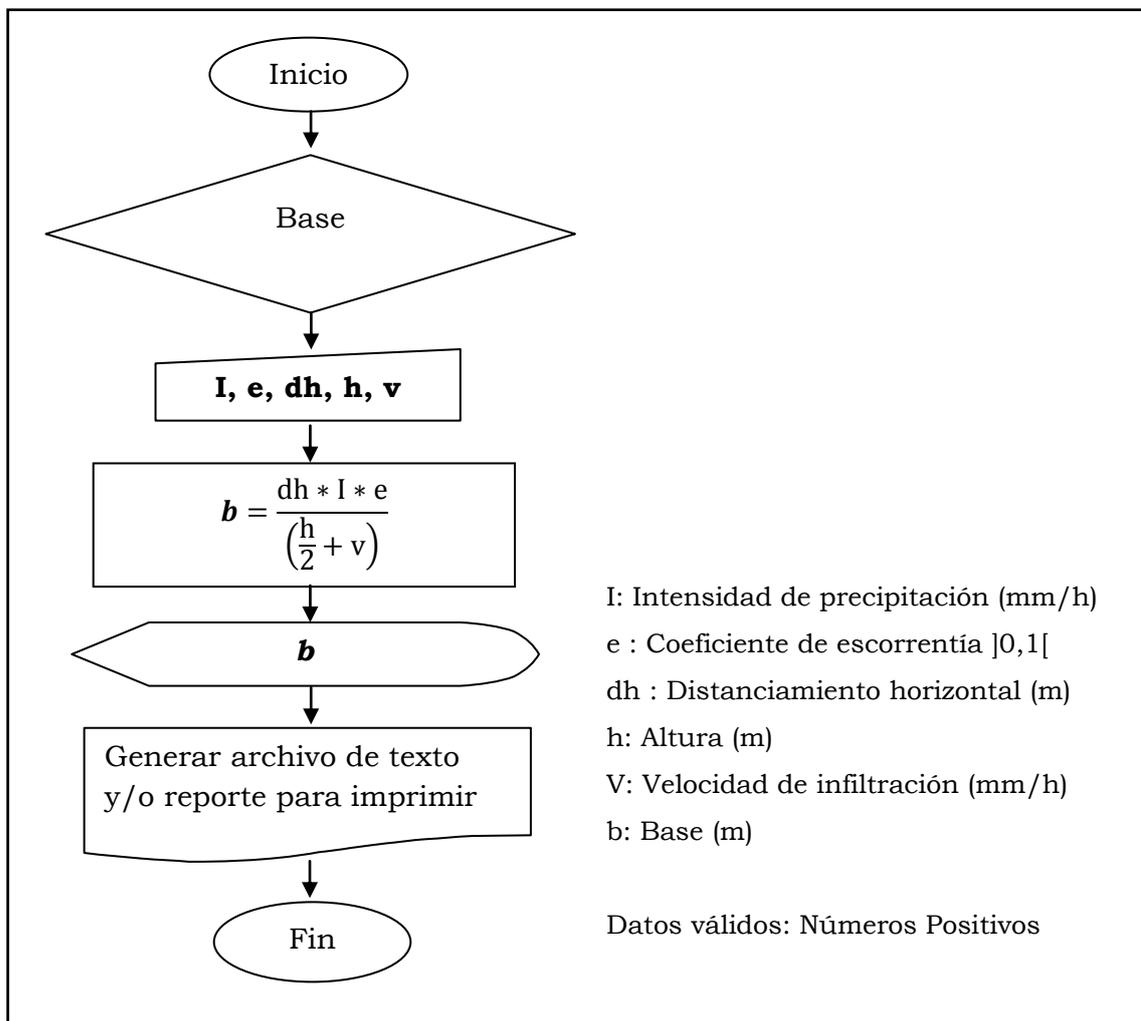


Figura N°8: Diagrama de flujo correspondiente al cálculo de la altura de una terraza de infiltración.

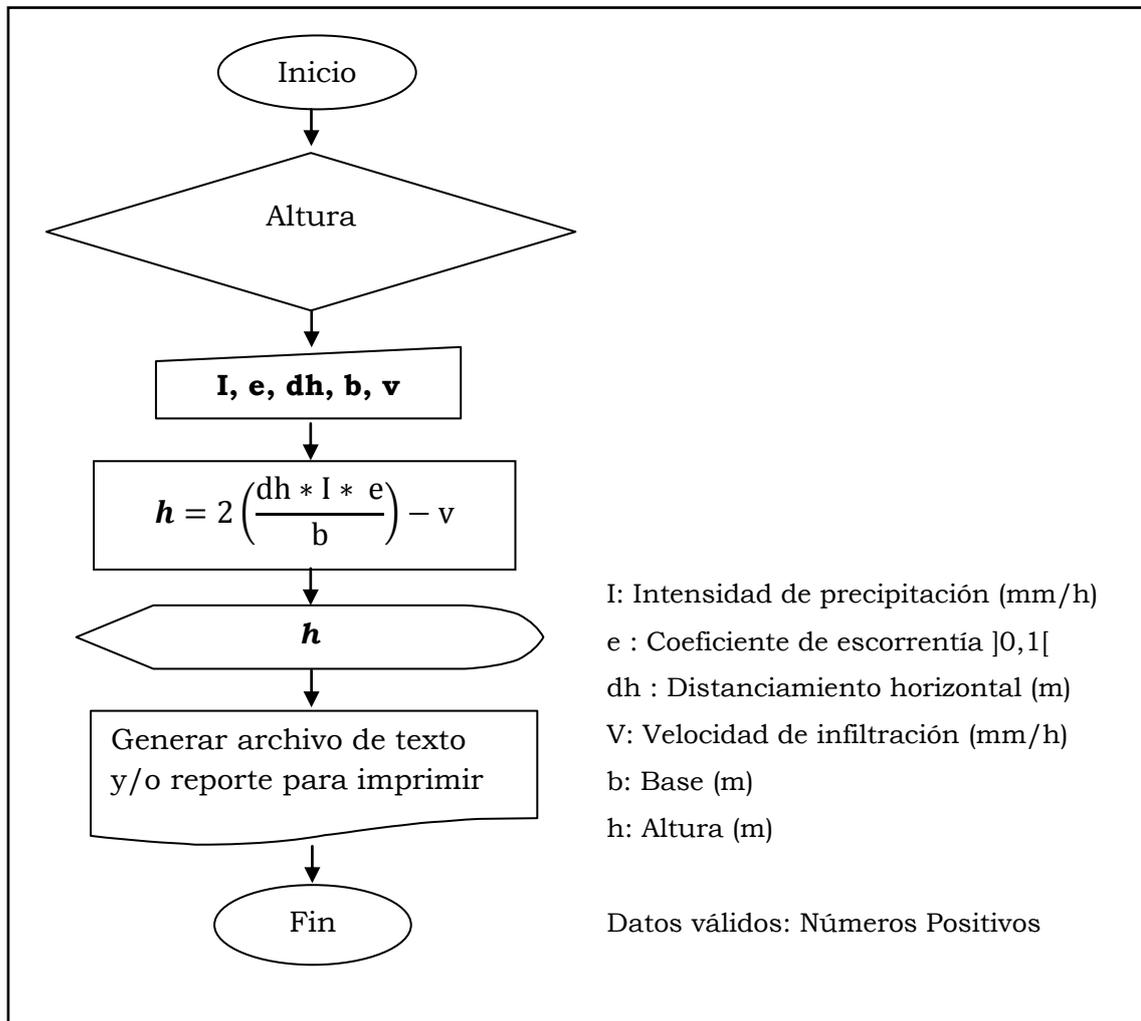


Figura N°9: Diagrama de flujo correspondiente al cálculo de la intensidad de precipitación utilizando la opción *Estación más cercana*.

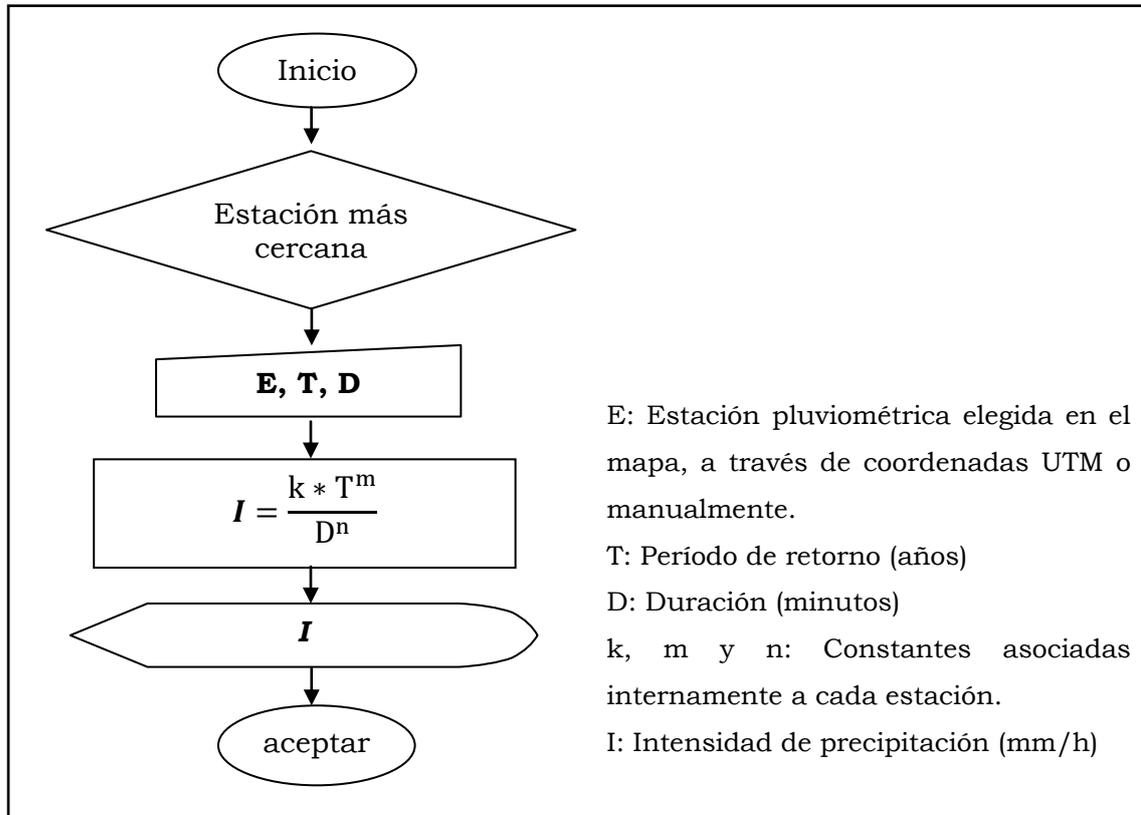
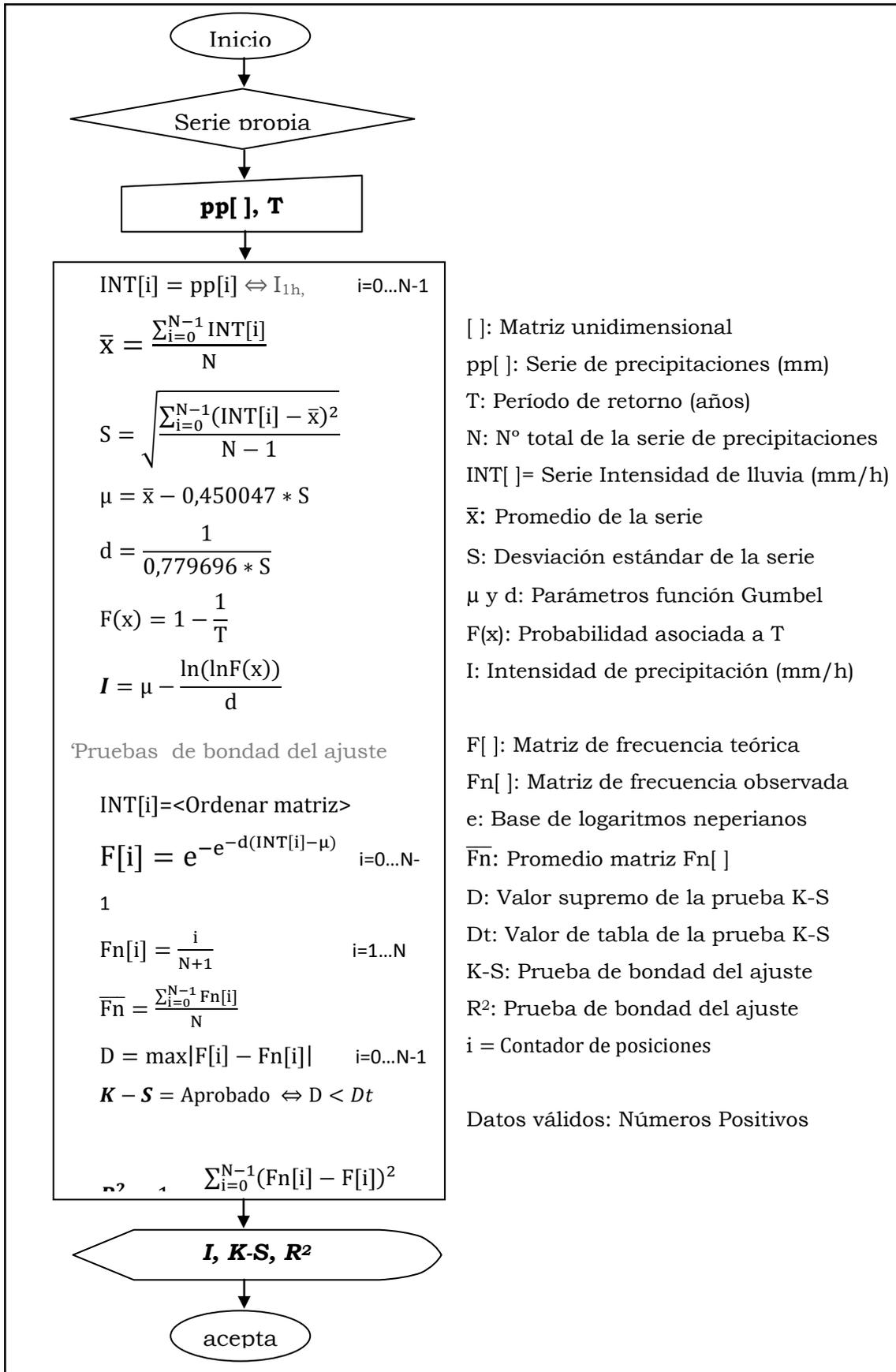


Figura N°10: Diagrama de flujo correspondiente al cálculo de la intensidad de precipitación utilizando la opción *serie propia*.



APÉNDICE II. Capturas del simulador EIAS

Figura N°11: Imagen capturada correspondiente al cálculo del distanciamiento horizontal entre zanjas de infiltración.

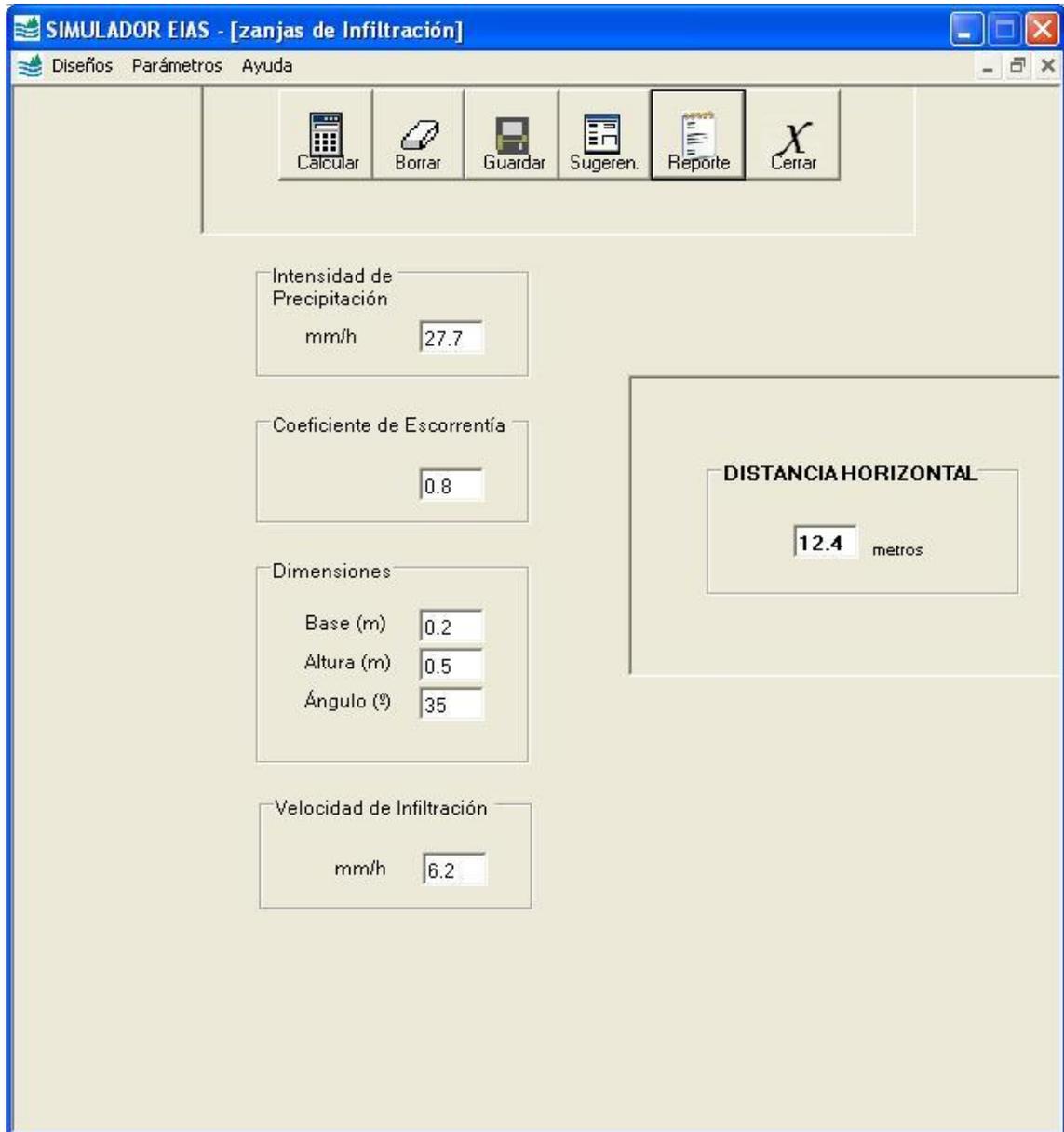


Figura N°12: Imagen capturada del reporte generado para cálculo del distanciamiento horizontal entre zanjas de infiltración.

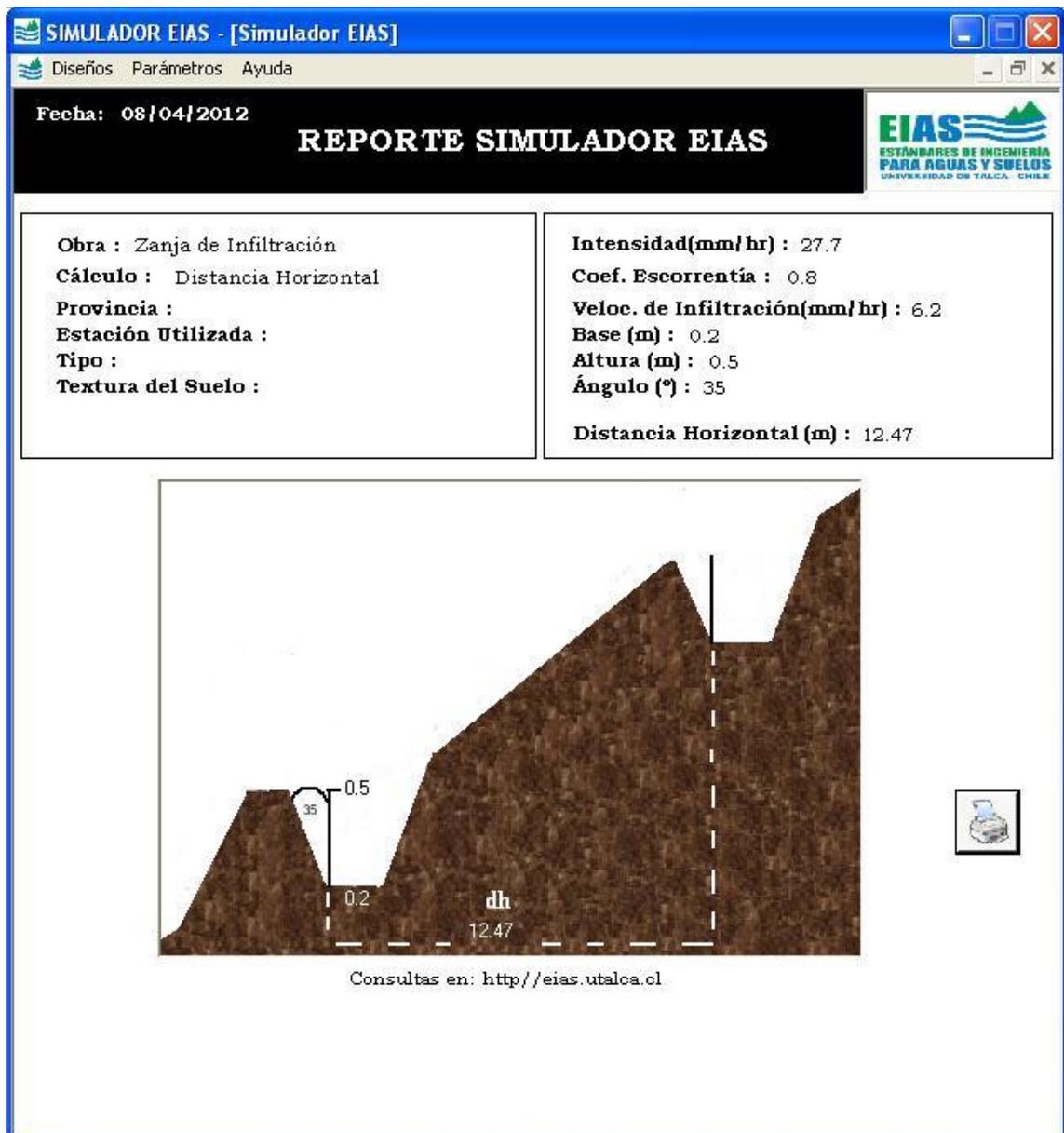


Figura N°13: Imagen capturada correspondiente al cálculo de la base de zanjas de infiltración.

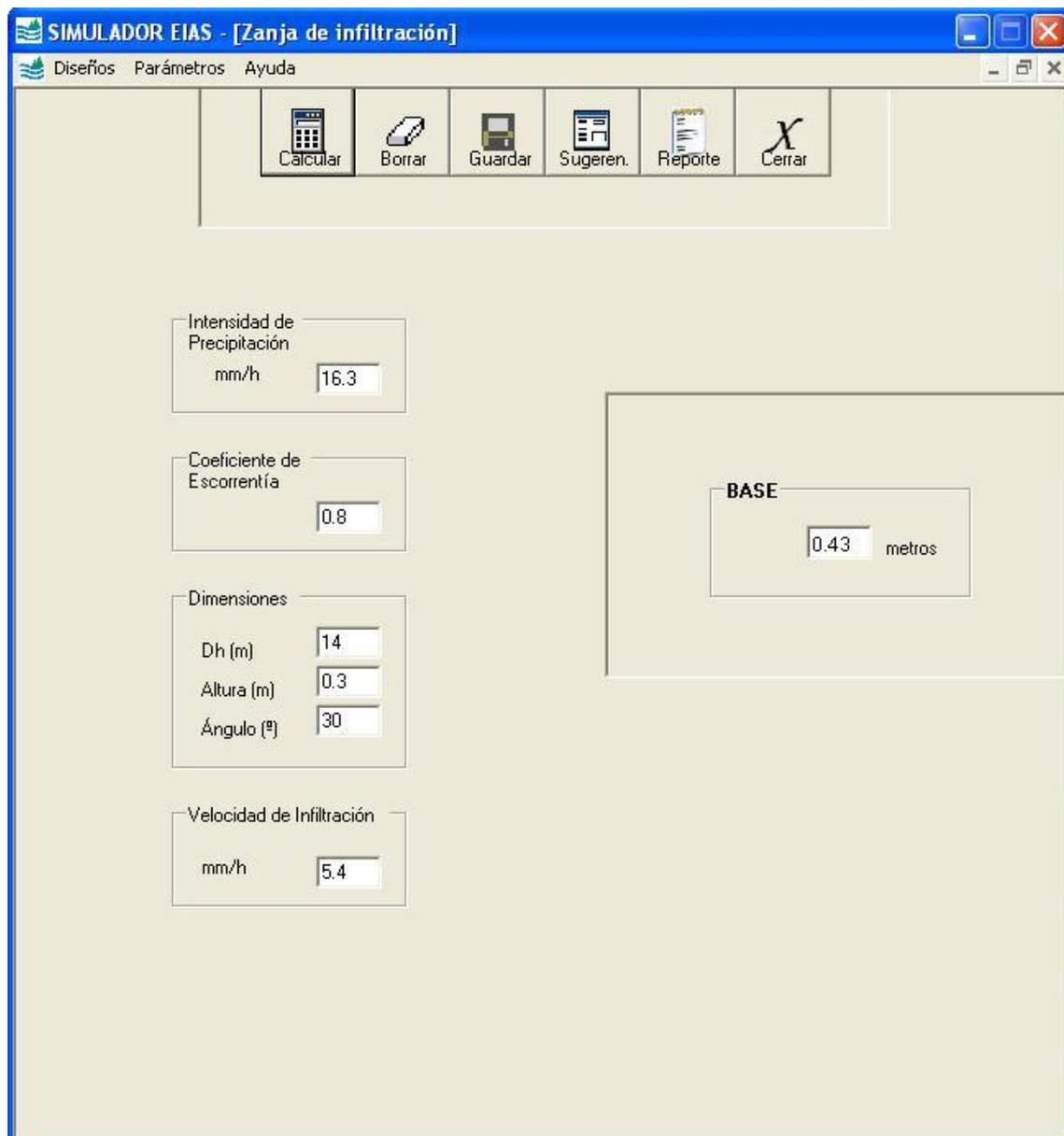


Figura N°14: Imagen capturada del reporte generado para cálculo de la base horizontal entre zanjas de infiltración.

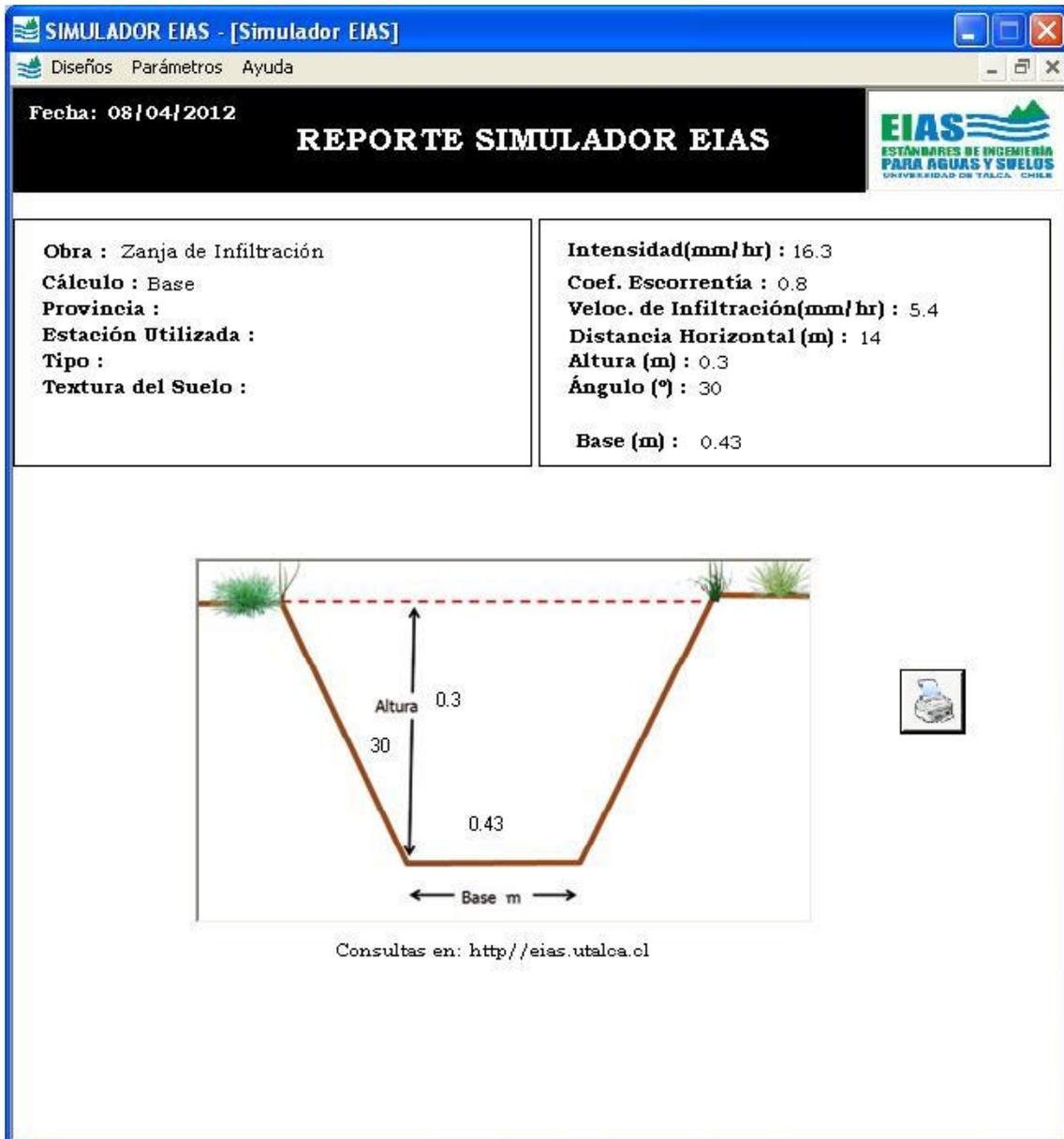


Figura N°15: Imagen capturada correspondiente al diseño de la altura para zanjas de infiltración.

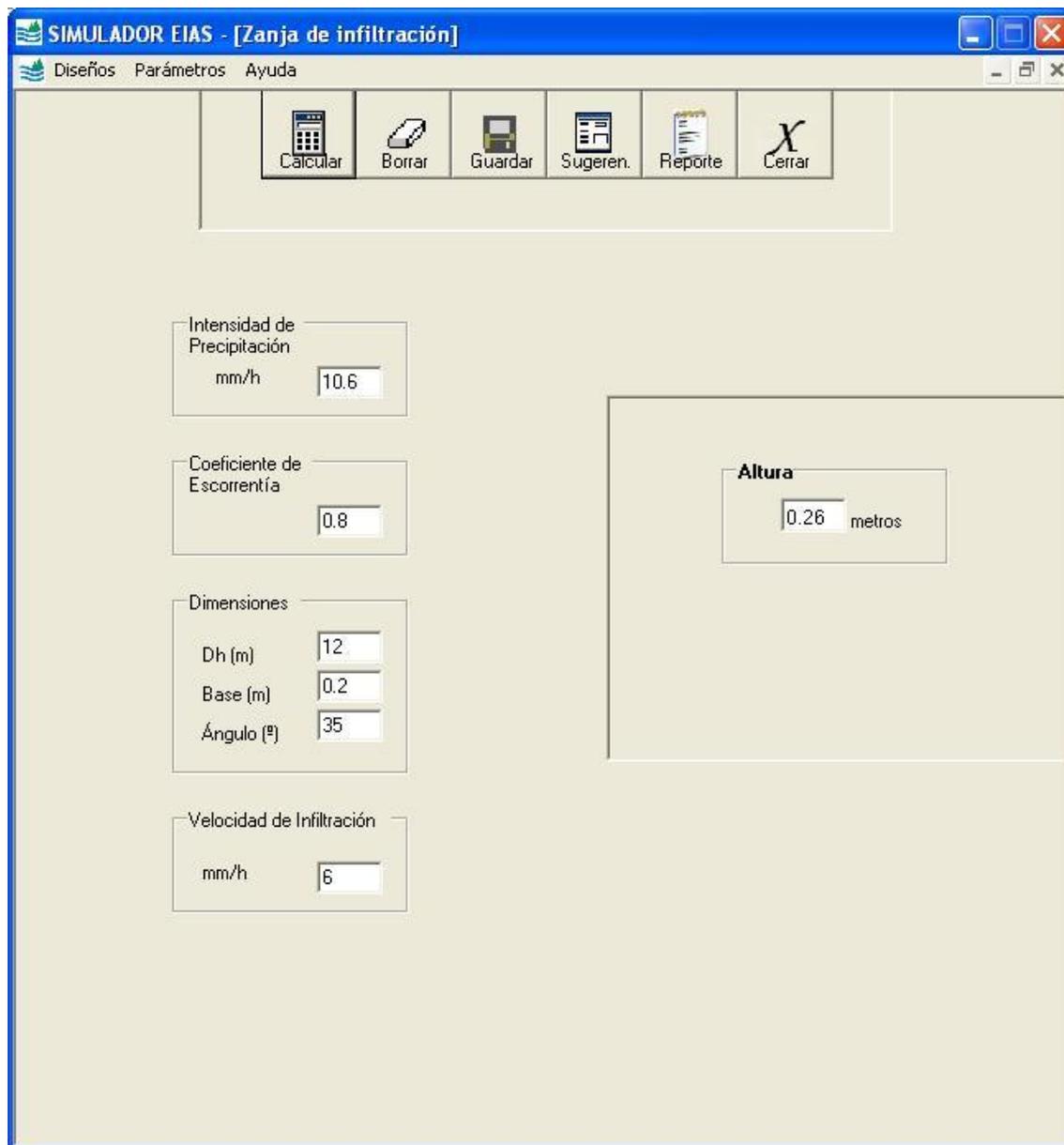


Figura N°16: Imagen capturada del archivo de texto generado para cálculo de la altura de zanjas de infiltración.



Figura N°17: Imagen capturada correspondiente al diseño de canales de desviación

SIMULADOR EIAS - [Canales de Desviación]

Diseños Parámetros Ayuda

Calcular Borrar Guardar Sugeren. Reporte Cerrar

Intensidad de Precipitación
mm/hr 15.3

Coeficientes
Escorrentía 0.8
Rugosidad 0.14

Dimensiones
Ángulo (°) 30
Área de Impluvio (m²) 530000

Velocidad de Diseño
m/s 0.83

DIMENSIONES

Caudal (m³/s) 1.80 Sección (m²) 2.17
Radio Hidráulico (m) 0.56 Tirante (m) 1.12
Base (m) 1.29 Pendiente 0.0293
Talud (m) 1.29 Revancha (m) 0.22

Figura N°18: Imagen capturada del reporte generado para cálculo de las dimensiones de canales de desviación

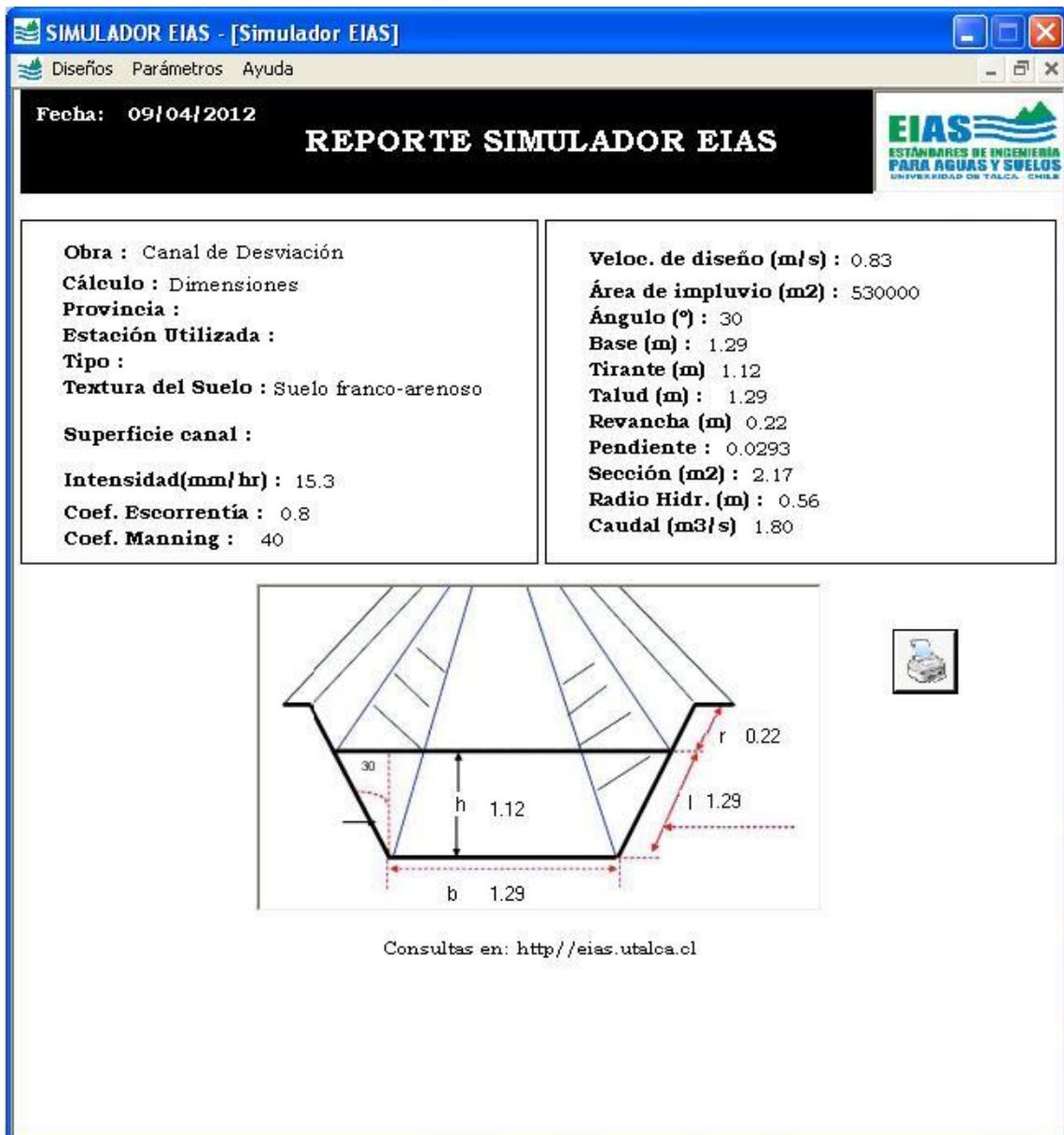


Figura N°19: Imagen capturada del archivo de texto generado para cálculo de la altura de zanjas de infiltración.



Figura N°20: Imagen capturada correspondiente al cálculo del distanciamiento horizontal entre terrazas de infiltración.

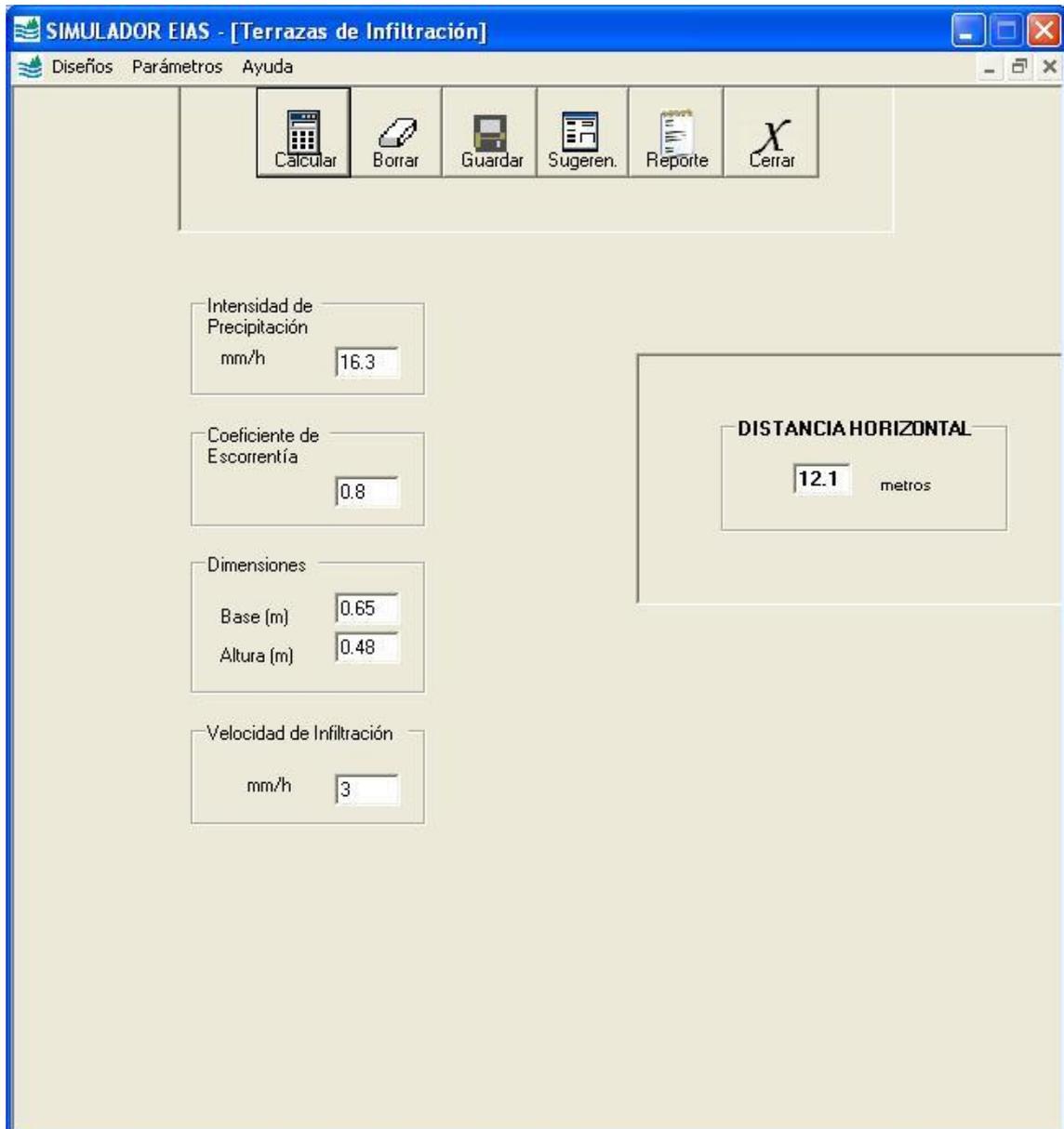


Figura N°21: Imagen capturada del reporte generado para cálculo del distanciamiento entre terrazas de infiltración.

SIMULADOR EIAS - [Simulador EIAS]

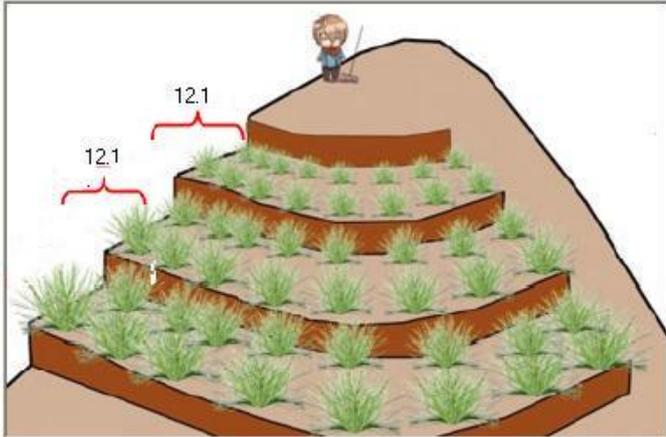
Diseños Parámetros Ayuda

Fecha: 09/04/2012

REPORTE SIMULADOR EIAS

EIAS
ESTÁNDARES DE INGENIERÍA
PARA AGUAS Y SUELOS
UNIVERSIDAD DE TALCA, CHILE

| | |
|--|---|
| Obra : Terraza de Infiltración | Intensidad(mm/ hr) : 16.3 |
| Cálculo : Distancia Horizontal | Coef. Escorrentía : 0.8 |
| Provincia : | Veloc. de Infiltración(mm/ hr) : 3 |
| Estación Utilizada : | Base (m) : 0.65 |
| Tipo : | Altura (m) : 0.48 |
| Textura del Suelo : franco-arcillosa, arcillosa | Distancia Horizontal (m) : 12.11 |



Consultas en: <http://eias.utalca.cl>

Figura N°22: Imagen capturada del reporte generado para cálculo de la base de terrazas de infiltración

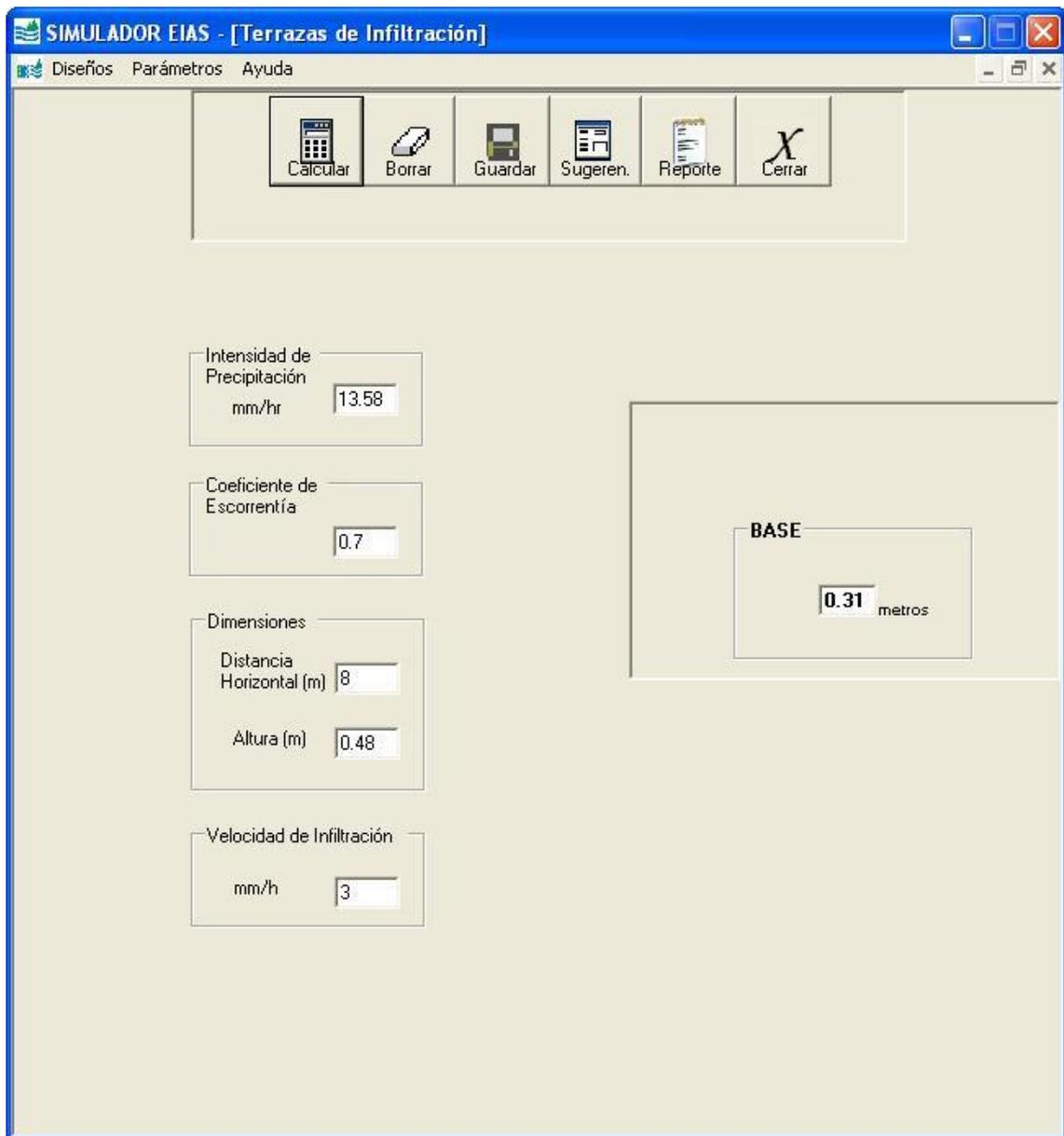


Figura N°23: Imagen capturada del reporte generado para cálculo de la base de terrazas de infiltración.

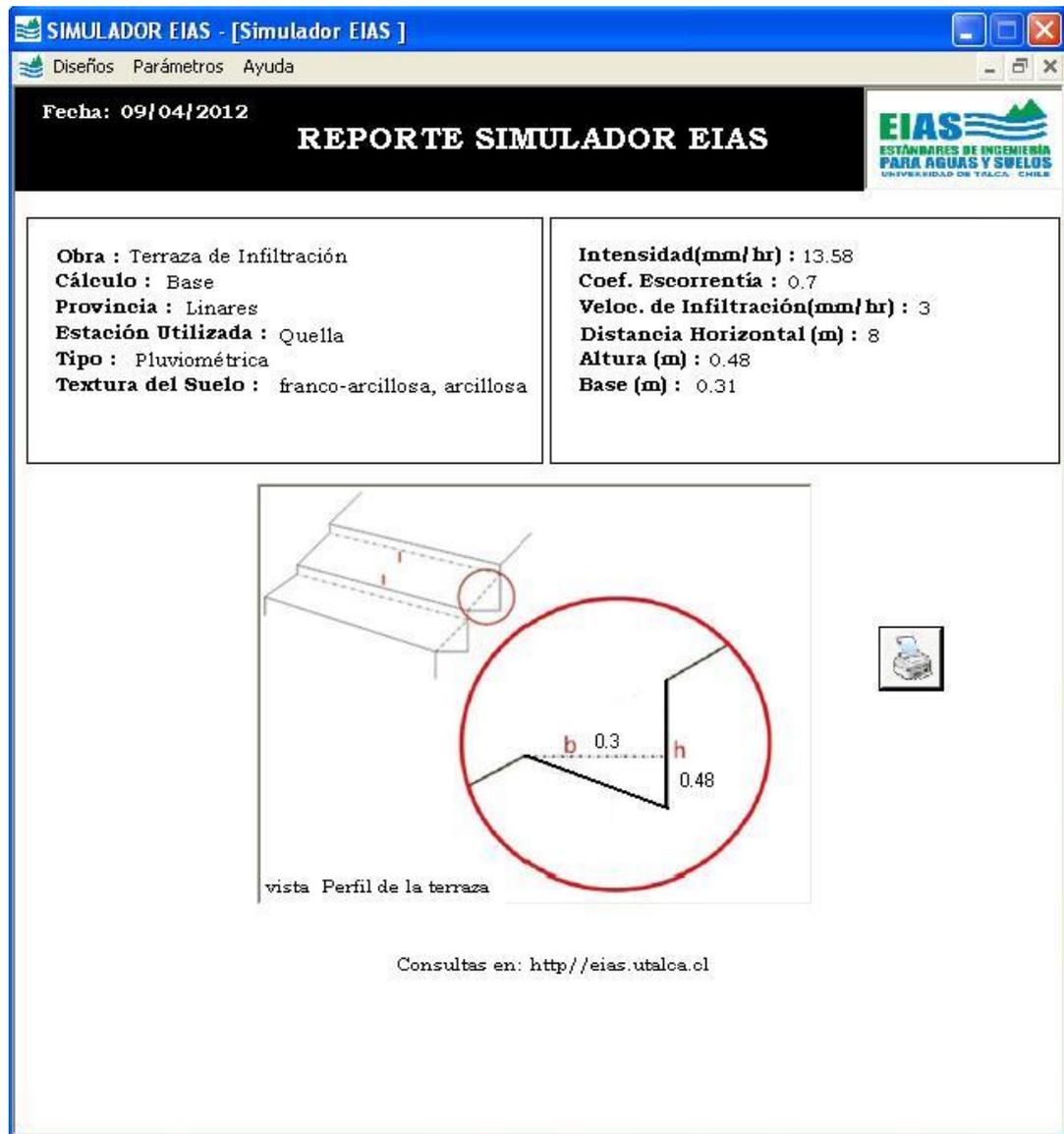
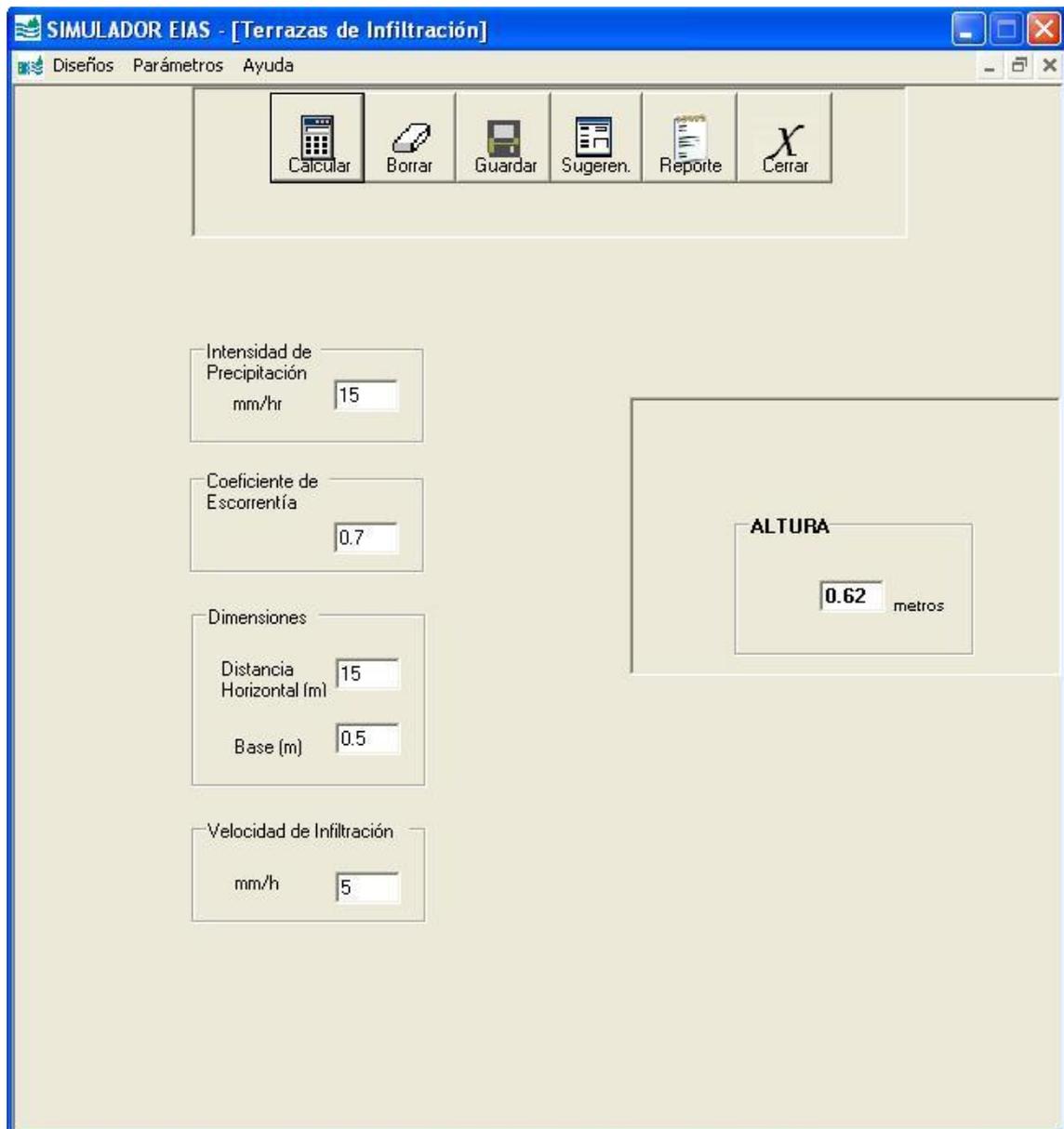


Figura N°24: Imagen capturada del reporte generado para cálculo de la altura de terrazas de infiltración



ANEXOS

Anexo I: Precipitaciones

Precipitaciones máximas en 24 h estaciones pluviométricas Región del Maule

| Armerillo | | | Colbún | | El Guindo | | El Manzano | | Gualleco | |
|-----------|-------|-------|--------|------|-----------|------|------------|-------|----------|------|
| 372.8 | 221.3 | 190.3 | 208.5 | 87.1 | 110.0 | 65.0 | 220.0 | 113.5 | 201.0 | 86.0 |
| 334.0 | 220.5 | 190.0 | 200.0 | 87.0 | 107.5 | 64.0 | 205.0 | 112.0 | 173.2 | 86.0 |
| 312.0 | 219.7 | 189.6 | 150.0 | 85.0 | 107.0 | 62.0 | 186.0 | 110.5 | 140.0 | 85.0 |
| 290.0 | 217.0 | 188.7 | 135.0 | 85.0 | 100.0 | 62.0 | 185.0 | 110.0 | 134.5 | 84.0 |
| 282.0 | 216.2 | 188.5 | 133.0 | 85.0 | 99.0 | 61.0 | 156.0 | 109.5 | 126.0 | 81.0 |
| 280.0 | 212.2 | 184.6 | 130.0 | 85.0 | 90.5 | 61.0 | 153.0 | 109.0 | 121.0 | 79.0 |
| 273.6 | 211.5 | 183.6 | 129.0 | 84.0 | 90.0 | 60.3 | 150.0 | 108.5 | 121.0 | 78.0 |
| 270.0 | 210.0 | 183.4 | 121.0 | 83.0 | 82.0 | 59.5 | 145.0 | 107.0 | 113.5 | 76.0 |
| 263.5 | 209.0 | 183.3 | 120.0 | 83.0 | 79.0 | 59.0 | 144.0 | 106.0 | 107.5 | 74.0 |
| 256.0 | 208.0 | 182.0 | 116.0 | 83.0 | 77.0 | 59.0 | 144.0 | 105.0 | 104.0 | 73.0 |
| 255.0 | 208.0 | 180.8 | 115.0 | 82.0 | 73.0 | 58.0 | 138.0 | 104.0 | 104.0 | 73.0 |
| 254.8 | 207.6 | 178.0 | 108.0 | 82.0 | 72.0 | 57.5 | 132.0 | 104.0 | 102.0 | 72.5 |
| 251.5 | 205.1 | 176.9 | 108.0 | 80.0 | 71.0 | 57.0 | 131.5 | 103.8 | 102.0 | 72.0 |
| 248.7 | 204.0 | 176.7 | 103.5 | 80.0 | 70.0 | 56.0 | 131.5 | 102.0 | 97.0 | 72.0 |
| 246.5 | 204.0 | 176.1 | 100.0 | 77.0 | 69.5 | 55.5 | 125.0 | 102.0 | 97.0 | 72.0 |
| 241.0 | 202.0 | 174.7 | 97.0 | 77.0 | 69.0 | 54.5 | 124.0 | 100.5 | 97.0 | 70.0 |
| 241.0 | 200.7 | 172.3 | 97.0 | 77.0 | 69.0 | 54.3 | 123.0 | 100.5 | 96.0 | 70.0 |
| 237.6 | 200.0 | 172.0 | 95.0 | 76.0 | 69.0 | 54.0 | 122.0 | 100.5 | 93.5 | 70.0 |
| 237.0 | 199.0 | 170.0 | 93.0 | 75.0 | 68.0 | 54.0 | 122.0 | 100.4 | 93.0 | 68.0 |
| 234.5 | 198.2 | 169.1 | 93.0 | 75.0 | 67.0 | 53.0 | 120.0 | 100.0 | 93.0 | 68.0 |
| 230.3 | 198.0 | 168.0 | 92.0 | 74.0 | 67.0 | 52.5 | 118.0 | 100.0 | 89.0 | 66.0 |
| 229.0 | 196.0 | 167.1 | 92.0 | 74.0 | 66.0 | 52.0 | 117.0 | 100.0 | 89.0 | 66.0 |
| 228.0 | 195.2 | 167.0 | 91.0 | 73.0 | 66.0 | 52.0 | | | 89.0 | 65.2 |
| 226.7 | 192.9 | 165.8 | 91.0 | 72.0 | 65.0 | | | | 88.0 | 65.1 |
| 226.4 | 192.5 | 164.9 | 89.0 | 72.0 | | | | | 86.5 | 65.0 |
| 225.9 | 192.0 | 164.5 | 88.0 | 70.1 | | | | | | |
| 225.5 | 191.2 | 164.5 | | | | | | | | |
| 225.0 | 190.4 | 164.3 | | | | | | | | |
| | | 162.4 | | | | | | | | |

| Las Hornillas | | Lontué | | Liguay | Nirivilo | | Quella | | Sta. Sus | Tutuvén |
|---------------|-------|--------|------|--------|----------|------|--------|------|----------|---------|
| 455.0 | 183.8 | 153.0 | 74.0 | 138.0 | 175.0 | 79.5 | 183.0 | 51.0 | 116.0 | 132.0 |
| 300.0 | 183.0 | 153.0 | 74.0 | 95.0 | 163.0 | 76.5 | 116.0 | 51.0 | 112.4 | 125.6 |
| 290.0 | 182.5 | 110.0 | 73.0 | 94.0 | 142.2 | 76.0 | 94.0 | 51.0 | 104.0 | 110.4 |
| 284.0 | 179.0 | 97.8 | 71.5 | 88.5 | 128.0 | 76.0 | 89.0 | 50.0 | 102.0 | 110.4 |
| 278.5 | 178.0 | 90.0 | 71.5 | 87.0 | 123.0 | 74.2 | 75.0 | 50.0 | 99.5 | 110.4 |
| 278.0 | 178.0 | 90.0 | 69.0 | 80.0 | 121.0 | 72.1 | 74.0 | 50.0 | 96.0 | 105.4 |
| 259.9 | 177.0 | 88.0 | 69.0 | 76.0 | 115.0 | 72.0 | 70.5 | 50.0 | 96.0 | 105.0 |
| 256.0 | 176.0 | 88.0 | 68.0 | 76.0 | 112.0 | 71.0 | 70.0 | 50.0 | 95.0 | 104.4 |
| 245.0 | 172.5 | 87.0 | 67.0 | 75.5 | 110.0 | 71.0 | 70.0 | 50.0 | 93.5 | 95.6 |
| 240.0 | 168.0 | 82.9 | 67.0 | 75.0 | 106.0 | 70.0 | 65.5 | 50.0 | 90.0 | 95.4 |
| 240.0 | 165.0 | 82.9 | 66.5 | 74.0 | 105.0 | 70.0 | 62.5 | 50.0 | 86.0 | 94.3 |
| 223.5 | 163.0 | 78.0 | 66.0 | 71.0 | 101.2 | 69.1 | 62.0 | 50.0 | 84.0 | 90.9 |
| 220.0 | 162.5 | 78.0 | 66.0 | 69.0 | 100.0 | 67.0 | 60.0 | 50.0 | 81.0 | 90.0 |
| 213.5 | 162.0 | 78.0 | 65.5 | 65.0 | 95.5 | 66.0 | 59.0 | 50.0 | 78.0 | 85.2 |
| 213.0 | 161.0 | 78.0 | 65.0 | 63.0 | 95.0 | 65.5 | 56.0 | 50.0 | 76.3 | 85.0 |
| 212.0 | 160.0 | 77.0 | 64.0 | 62.0 | 91.0 | 65.5 | 55.5 | 50.0 | 76.0 | 84.5 |
| 211.9 | 157.0 | 77.0 | 64.0 | 60.0 | 90.0 | 65.5 | 55.2 | 50.0 | 75.0 | 83.4 |
| 209.0 | 156.0 | 74.0 | 62.5 | 60.0 | 89.2 | 65.0 | 55.0 | 50.0 | 75.0 | 83.2 |
| 207.0 | 154.5 | 74.0 | 62.5 | 56.5 | 86.0 | 64.0 | 53.3 | 50.0 | 75.0 | 82.4 |
| 204.5 | 153.0 | | | 55.1 | 85.0 | 63.1 | 53.0 | 50.0 | 75.0 | 82.4 |
| 204.0 | 152.0 | | | 55.0 | 85.0 | 62.9 | 53.0 | 50.0 | 73.8 | 80.4 |
| 203.0 | 151.0 | | | 55.0 | 84.0 | 62.0 | 52.0 | 50.0 | 72.0 | 78.5 |
| 200.0 | 149.5 | | | 55.0 | 82.5 | 62.0 | 52.0 | 50.0 | 72.0 | 75.0 |
| 190.0 | 149.5 | | | 53.5 | 82.0 | 62.0 | 52.0 | 50.0 | 71.0 | 73.4 |
| 190.0 | 149.0 | | | 53.0 | 80.0 | 62.0 | 52.0 | 50.0 | 70.0 | 73.4 |
| | | | | 52.0 | 80.0 | 60.1 | | | 70.0 | 73.1 |
| | | | | 51.0 | | | | | 70.0 | 72.4 |
| | | | | 50.7 | | | | | | 72.3 |
| | | | | 50.5 | | | | | | 70.4 |
| | | | | 50.5 | | | | | | 69.4 |
| | | | | 50.5 | | | | | | 68.3 |
| | | | | 50.5 | | | | | | 68.0 |
| | | | | 50.5 | | | | | | 67.5 |
| | | | | 50.5 | | | | | | 65.5 |
| | | | | 50.0 | | | | | | 65.4 |
| | | | | 50.0 | | | | | | 65.4 |

| Constit. | El Durazno | H. de Maule | Juan Amigo | La Estrella | La Sexta | Putú | San Rafael | Bullileo | V. Prat |
|----------|------------|-------------|------------|-------------|----------|------|------------|----------|---------|
| 94 | 100 | 81.5 | 176.5 | 83.5 | 176.5 | 125 | 64.5 | 303.5 | 118.4 |
| 91 | 99.5 | 72.9 | 165 | 81.5 | 142 | 107 | 64.5 | 178.5 | 90.5 |
| 85.7 | 91 | 72.8 | 141 | 74.5 | 122 | 93.5 | 64 | 171.3 | 79.4 |
| 84.6 | 86 | 71.4 | 132.5 | 74.5 | 113.5 | 91 | 63.5 | 170.5 | 68.5 |
| 75 | 83.5 | 71 | 124.5 | 73.5 | 111.5 | 88.5 | 62.6 | 156.5 | 65 |
| 75 | 80 | 67.5 | 122.5 | 72.5 | 109.5 | 88 | 58.5 | 156.1 | 64.5 |
| 71 | 77.5 | 63.2 | 117.5 | 69.5 | 106.7 | 78 | 57.5 | 154.8 | 63 |
| 70.5 | 75 | 62.4 | 115.5 | 68.5 | 95 | 77.5 | 56.6 | 152.5 | 62.5 |
| 68.5 | 75 | 59.4 | 115 | 66.5 | 88.5 | 77.5 | 56.2 | 150.5 | 61.5 |
| 66 | 73 | 59.3 | 112 | 62.5 | 86 | 75 | 55.2 | 150.5 | 57 |
| 63.7 | 72.5 | 58.8 | 111 | 60.5 | 86 | 75 | 55 | 144.5 | 56.4 |
| 63 | 72.5 | 58.8 | 110.5 | 58.5 | 84 | 72 | 54.5 | 143.5 | 56 |
| 60.7 | 71.5 | 58.3 | 108.5 | 57.5 | 82.5 | 64 | 54.3 | 142.5 | 55.6 |
| 60.4 | 71 | 57.2 | 106.5 | 57 | 82 | 63 | 54.3 | 142.5 | 55.2 |
| 60.3 | 71 | 56.4 | 104 | 56.5 | 81.5 | 61 | 54.3 | 140.5 | 54.5 |
| 60 | 69 | 56.3 | 103.5 | 55.6 | 81 | 59.5 | 53.2 | 135.5 | 54.4 |
| 57 | 68 | 55.6 | 101.2 | 55.5 | 77 | 59 | 53.2 | 130.5 | 54.2 |
| 55 | 67 | 55.2 | 99.5 | 55.5 | 76.5 | 58.5 | 52.5 | 128.5 | 52.3 |
| 54 | 65.5 | 55 | 94 | 55.5 | 75 | 56 | 52.5 | 125.5 | 52 |

Precipitaciones máximas en 24 h estaciones pluviométricas Región Coquimbo

| Trapiche | Laguna Embalse | | Juntas | Huanta | Pisco Elqui | Los Nichos | La Ortiga | Cochiguaz | Monte grande | |
|----------|----------------|------|--------|--------|-------------|------------|-----------|-----------|--------------|------|
| 56.0 | 108.0 | 29.5 | 71.0 | 60.5 | 92.0 | 124.0 | 165.0 | 75.0 | 80.0 | 20.0 |
| 50.0 | 81.0 | 29.0 | 47.7 | 52.0 | 89.9 | 99.0 | 98.0 | 54.0 | 76.0 | 19.0 |
| 45.5 | 75.5 | 29.0 | 44.9 | 35.0 | 79.4 | 98.0 | 92.4 | 52.0 | 72.0 | 19.0 |
| 45.0 | 74.0 | 28.5 | 44.0 | 32.2 | 75.0 | 79.4 | 85.2 | 51.0 | 66.0 | 18.0 |
| 38.5 | 71.0 | 28.5 | 40.0 | 31.0 | 69.0 | 74.5 | 71.0 | 49.0 | 55.5 | 18.0 |
| 35.0 | 70.0 | 28.5 | 37.0 | 31.0 | 63.5 | 74.0 | 68.0 | 49.0 | 50.0 | 17.5 |
| 31.5 | 67.0 | 28.0 | 33.5 | 29.0 | 63.5 | 72.7 | 66.0 | 48.0 | 50.0 | 17.0 |
| 28.0 | 66.5 | 28.0 | 29.6 | 25.0 | 61.5 | 71.0 | 65.0 | 46.5 | 47.0 | 17.0 |
| 27.5 | 54.0 | 26.5 | 29.0 | 24.0 | 53.0 | 66.0 | 65.0 | 37.5 | 46.0 | 17.0 |
| 26.5 | 49.0 | 26.0 | 27.5 | 20.2 | 53.0 | 65.5 | 64.0 | 37.0 | 43.0 | 17.0 |
| 26.1 | 46.0 | 25.0 | 26.3 | 20.0 | 53.0 | 65.0 | 58.0 | 35.0 | 43.0 | 16.0 |
| 25.5 | 46.0 | 25.0 | 26.3 | 20.0 | 47.9 | 64.0 | 57.0 | 34.9 | 42.0 | 16.0 |
| 25.0 | 43.0 | 24.0 | 26.0 | 19.2 | 47.0 | 56.5 | 56.0 | 34.0 | 39.0 | 15.4 |
| 24.1 | 43.0 | 24.0 | 24.6 | 18.0 | 46.0 | 54.0 | 52.0 | 33.0 | 39.0 | 15.0 |
| 23.0 | 43.0 | 24.0 | 23.3 | 17.5 | 42.0 | 49.0 | 50.0 | 28.0 | 38.0 | 15.0 |
| 22.5 | 40.0 | | 23.3 | 17.0 | 41.5 | 42.5 | 48.0 | 25.0 | 36.5 | 14.0 |
| 20.5 | 40.0 | | 20.2 | 17.0 | 33.5 | 42.0 | 48.0 | 24.0 | 33.0 | 14.0 |
| 20.5 | 39.0 | | 20.0 | 16.0 | 33.0 | 40.5 | 47.5 | 22.2 | 33.0 | 14.0 |
| 20.5 | 38.0 | | 19.9 | 15.0 | 33.0 | 38.0 | 44.1 | 21.0 | 33.0 | |
| 19.5 | 38.0 | | 19.0 | 14.5 | 28.2 | 38.0 | 38.9 | 20.0 | 28.0 | |
| 18.0 | 38.0 | | 18.9 | 14.0 | 27.5 | 36.5 | 36.5 | 20.0 | 27.0 | |
| 16.5 | 38.0 | | | 12.7 | 27.4 | 35.8 | 34.5 | 19.0 | 27.0 | |
| 16.5 | 36.5 | | | | 26.7 | 35.0 | 34.0 | | 25.0 | |
| 16.0 | 36.0 | | | | 26.0 | 34.0 | 33.0 | | 25.0 | |
| 16.0 | 36.0 | | | | 26.0 | 29.5 | 31.8 | | 24.0 | |
| 15.5 | 35.0 | | | | 23.5 | 29.5 | 30.5 | | 23.0 | |
| 13.5 | 34.5 | | | | 23.0 | 28.5 | 29.5 | | 23.0 | |
| 13.0 | 33.0 | | | | 22.0 | 28.5 | 26.5 | | 23.0 | |
| 13.0 | 32.0 | | | | 21.4 | 26.4 | 26.0 | | 22.0 | |
| 13.0 | 31.5 | | | | 20.5 | 26.0 | 26.0 | | 22.0 | |
| | 30.0 | | | | 20.0 | 25.0 | 25.5 | | 21.5 | |
| | 30.0 | | | | 20.0 | 23.0 | 24.1 | | 21.0 | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

| Vicuña | | El Almendral | | La Serena | | Pabellón | | Las Breas | Hurtado | | |
|--------|------|--------------|------|-----------|------|----------|------|-----------|---------|------|------|
| 78.8 | 23.3 | 95.0 | 27.0 | 93.8 | 20.9 | 104.0 | 30.0 | 81.0 | 119.0 | 37.0 | 25.7 |
| 70.0 | 22.9 | 64.0 | 27.0 | 83.5 | 20.9 | 103.0 | 30.0 | 76.0 | 83.5 | 36.5 | 25.5 |
| 67.4 | 22.8 | 53.5 | 26.5 | 80.9 | 20.9 | 80.5 | 30.0 | 75.0 | 80.0 | 36.5 | 25.2 |
| 65.1 | 22.2 | 52.0 | 26.0 | 71.5 | 20.8 | 80.0 | 29.5 | 62.0 | 75.5 | 36.0 | 25.0 |
| 57.4 | 21.5 | 52.0 | 25.0 | 63.1 | 20.0 | 75.0 | 29.0 | 62.0 | 71.0 | 36.0 | |
| 53.0 | 21.1 | 50.5 | 25.0 | 52.8 | 19.9 | 74.0 | 29.0 | 58.0 | 71.0 | 35.5 | |
| 50.8 | 20.7 | 50.0 | 23.6 | 48.8 | 19.7 | 73.0 | 29.0 | 57.5 | 65.0 | 35.2 | |
| 46.3 | 20.5 | 48.5 | 23.0 | 46.0 | 19.5 | 65.0 | 29.0 | 54.0 | 64.0 | 35.0 | |
| 45.4 | | 44.0 | 22.0 | 44.5 | | 65.0 | 28.0 | 50.0 | 64.0 | 34.5 | |
| 42.7 | | 43.5 | 22.0 | 43.0 | | 60.0 | 28.0 | 50.0 | 62.6 | 34.0 | |
| 41.4 | | 42.5 | 21.0 | 40.3 | | 58.0 | 27.0 | 45.0 | 59.5 | 34.0 | |
| 41.0 | | 41.0 | 21.0 | 39.1 | | 57.5 | | 40.0 | 57.5 | 33.5 | |
| 39.9 | | 41.0 | 21.0 | 38.1 | | 55.0 | | 37.0 | 57.0 | 33.3 | |
| 38.1 | | 38.5 | 21.0 | 33.8 | | 52.0 | | 35.0 | 54.1 | 33.0 | |
| 37.5 | | 38.0 | 20.5 | 33.2 | | 52.0 | | 35.0 | 53.0 | 33.0 | |
| 36.0 | | 38.0 | | 32.5 | | 50.0 | | 34.0 | 52.0 | 33.0 | |
| 33.0 | | 37.0 | | 32.5 | | 47.0 | | 34.0 | 50.5 | 31.5 | |
| 32.9 | | 36.0 | | 31.5 | | 46.7 | | 33.0 | 48.0 | 31.0 | |
| 32.8 | | 36.0 | | 30.8 | | 46.0 | | 32.0 | 48.0 | 31.0 | |
| 32.2 | | 35.0 | | 30.0 | | 46.0 | | 32.0 | 45.0 | 30.3 | |
| 31.8 | | 35.0 | | 29.5 | | 45.0 | | 30.5 | 42.0 | 30.0 | |
| 30.8 | | 35.0 | | 27.8 | | 44.0 | | 30.0 | 42.0 | 30.0 | |
| 28.5 | | 33.0 | | 26.8 | | 42.0 | | 29.3 | 41.0 | 30.0 | |
| 28.0 | | 32.5 | | 25.5 | | 41.0 | | 28.0 | 40.5 | 30.0 | |
| 27.1 | | 32.0 | | 25.0 | | 39.0 | | 28.0 | 40.5 | 29.5 | |
| 26.7 | | 32.0 | | 23.0 | | 38.0 | | 28.0 | 40.0 | 29.0 | |
| 25.0 | | 31.5 | | 22.9 | | 37.0 | | | 39.3 | 28.0 | |
| 24.8 | | 31.2 | | 22.1 | | 36.0 | | | 39.0 | 27.4 | |
| 24.3 | | 30.5 | | 21.7 | | 36.0 | | | 38.0 | 27.0 | |
| 24.0 | | 28.5 | | 21.0 | | 35.0 | | | 38.0 | 27.0 | |
| 24.0 | | 28.0 | | 21.0 | | 35.0 | | | 37.0 | 26.0 | |
| 23.3 | | 27.0 | | 21.0 | | 32.0 | | | 37.0 | 26.0 | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

| Samo alto | Pichasca | | Recoleta Embalse | | Las Ramadas | | Tascadero | | Tulahuén | |
|--------------|----------|------|---------------------|------|-------------|------|-----------|------|----------|------|
| | | | | | | | | | | |
| 96.0 | 97.5 | 35.0 | 110.0 | 33.5 | 120.0 | 64.0 | 120.0 | 55.5 | 150.0 | 60.0 |
| 60.0 | 91.0 | 35.0 | 84.0 | 32.0 | 104.0 | 63.0 | 117.0 | 55.0 | 118.3 | 58.0 |
| 56.5 | 83.5 | 34.4 | 81.0 | 31.5 | 100.1 | 62.5 | 108.0 | 54.0 | 115.0 | 57.5 |
| 55.0 | 83.0 | 34.0 | 69.5 | 31.5 | 99.0 | 60.0 | 105.0 | 52.0 | 115.0 | 57.2 |
| 42.0 | 76.5 | 34.0 | 68.0 | 31.0 | 96.4 | 60.0 | 100.0 | 51.0 | 115.0 | 57.0 |
| 36.0 | 73.5 | 33.5 | 61.5 | 30.3 | 95.0 | 60.0 | 99.0 | 50.0 | 111.0 | 57.0 |
| 33.0 | 73.0 | 33.0 | 58.0 | 30.0 | 95.0 | 59.0 | 95.0 | 49.0 | 107.0 | 56.0 |
| 33.0 | 69.0 | 32.0 | 57.8 | 30.0 | 90.0 | 58.8 | 95.0 | 48.0 | 100.0 | 53.0 |
| 32.0 | 68.0 | 31.0 | 57.0 | 30.0 | 87.0 | 57.9 | 94.0 | 48.0 | 98.5 | 52.0 |
| 31.0 | 58.0 | 31.0 | 53.5 | 29.5 | 86.5 | 57.4 | 93.0 | 46.5 | 91.0 | 51.0 |
| 27.6 | 55.0 | 31.0 | 53.0 | 29.4 | 80.5 | 56.0 | 91.0 | 45.3 | 87.5 | 49.5 |
| 27.0 | 52.0 | 31.0 | 51.0 | 28.9 | 80.0 | 56.0 | 86.0 | 45.0 | 85.0 | 49.0 |
| 26.5 | 52.0 | 31.0 | 50.0 | 28.0 | 80.0 | 55.0 | 79.0 | 44.5 | 85.0 | 47.0 |
| 26.5 | 51.2 | 31.0 | 50.0 | 28.0 | 79.8 | 53.0 | 78.0 | 44.0 | 84.0 | 47.0 |
| 25.0 | 50.0 | 30.0 | 50.0 | 27.5 | 79.0 | 52.5 | 78.0 | 44.0 | 82.0 | 46.0 |
| 24.5 | 50.0 | 30.0 | 49.5 | 27.0 | 78.0 | 51.5 | 77.0 | 44.0 | 82.0 | 46.0 |
| 24.5 | 49.0 | 29.6 | 49.3 | 27.0 | 78.0 | 51.0 | 76.0 | 43.0 | 80.0 | 46.0 |
| 24.0 | 46.1 | 29.0 | 47.5 | 26.5 | 76.0 | 50.0 | 76.0 | | 78.0 | 46.0 |
| 23.5 | 43.0 | 28.8 | 43.0 | 26.0 | 76.0 | 50.0 | 74.0 | | 77.0 | 45.2 |
| 23.0 | 41.0 | 28.5 | 42.5 | 26.0 | 75.5 | 49.0 | 73.0 | | 77.0 | 45.0 |
| | 40.0 | 28.0 | 42.0 | 26.0 | 75.0 | 49.0 | 73.0 | | 76.0 | 45.0 |
| | 39.0 | 28.0 | 38.0 | 25.5 | 74.0 | 49.0 | 69.0 | | 74.0 | 44.8 |
| | 39.0 | 27.5 | 37.0 | 25.5 | 72.5 | 49.0 | 67.0 | | 73.0 | 44.0 |
| | 38.0 | 27.0 | 37.0 | 25.0 | 70.5 | 49.0 | 67.0 | | 72.0 | 43.5 |
| | 37.0 | 27.0 | 36.5 | 24.5 | 70.1 | 49.0 | 66.5 | | 70.0 | 42.0 |
| | 37.0 | 27.0 | 36.5 | 24.5 | 70.0 | 48.2 | 64.0 | | 66.0 | 42.0 |
| | 36.5 | 27.0 | 36.0 | 24.0 | 70.0 | 48.0 | 61.0 | | 65.0 | 41.0 |
| | 36.0 | 26.5 | 36.0 | 24.0 | 70.0 | 47.2 | 60.0 | | 64.0 | 41.0 |
| | 36.0 | 26.0 | 35.5 | 24.0 | 67.0 | 46.5 | 60.0 | | 63.0 | 40.0 |
| | 35.0 | 25.0 | 35.5 | 23.5 | 66.0 | 46.0 | 59.0 | | 63.0 | 40.0 |
| | 35.0 | 25.0 | 34.0 | 23.5 | 65.0 | 46.0 | 59.0 | | 61.0 | |
| | 35.0 | 25.0 | 33.5 | 23.0 | 64.2 | 45.5 | 58.0 | | 61.0 | |
| | | 25.0 | | 22.5 | | 45.5 | | | | |
| | | | | | | 45.0 | | | | |
| | | | | | | 45.0 | | | | |
| | | | | | | | | | | |

| Carén | | El Pedregal | Ramadilla | Rapel | | Cogotí 18 | | Combarbalá |
|-------|------|-------------|-----------|-------|------|-----------|------|------------|
| 105.0 | 54.0 | 146.0 | 150.0 | 101.0 | 37.0 | 120.0 | 50.0 | 135.0 |
| 101.5 | 51.0 | 145.5 | 115.0 | 100.0 | 36.0 | 114.2 | 50.0 | 111.0 |
| 101.0 | 51.0 | 113.0 | 103.9 | 90.0 | 35.0 | 98.0 | 49.0 | 105.6 |
| 95.0 | 50.0 | 100.0 | 102.0 | 71.0 | 35.0 | 96.5 | 48.0 | 102.0 |
| 90.0 | 50.0 | 89.5 | 91.0 | 70.5 | 34.5 | 94.0 | 48.0 | 96.2 |
| 89.0 | 49.5 | 65.0 | 83.0 | 63.0 | 34.0 | 93.0 | 47.8 | 85.5 |
| 83.5 | 48.0 | 57.0 | 80.0 | 56.0 | 33.0 | 87.5 | 47.4 | 79.0 |
| 82.0 | 48.0 | 53.0 | 80.0 | 54.0 | 33.0 | 87.0 | 46.1 | 74.5 |
| 80.0 | 48.0 | 53.0 | 70.0 | 54.0 | 33.0 | 83.0 | 43.5 | 73.0 |
| 78.0 | 47.5 | 51.5 | 70.0 | 53.7 | 33.0 | 75.0 | 43.0 | 72.0 |
| 78.0 | 47.0 | 50.0 | 62.0 | 52.0 | | 71.0 | 43.0 | 71.5 |
| 76.0 | 47.0 | 49.0 | 58.0 | 52.0 | | 70.0 | 42.0 | 68.1 |
| 75.5 | 47.0 | 47.5 | 57.9 | 51.4 | | 70.0 | 42.0 | 64.0 |
| 74.0 | 46.0 | 46.0 | 55.0 | 51.0 | | 68.0 | 42.0 | 63.0 |
| 72.5 | 46.0 | 43.0 | 55.0 | 51.0 | | 62.8 | 41.0 | 62.0 |
| 71.5 | 45.5 | 40.0 | 54.0 | 48.5 | | 62.0 | 41.0 | 59.0 |
| 69.5 | 45.0 | 40.0 | 53.0 | 48.0 | | 60.0 | 40.5 | 59.0 |
| 69.0 | 45.0 | 36.0 | 52.0 | 48.0 | | 59.0 | 40.0 | 59.0 |
| 67.0 | 45.0 | 33.5 | 52.0 | 48.0 | | 58.1 | 40.0 | 58.0 |
| 66.5 | 45.0 | 33.0 | 51.0 | 46.0 | | 58.0 | 39.0 | 52.5 |
| 66.0 | 44.5 | 33.0 | 51.0 | 45.0 | | 57.0 | 39.0 | 50.6 |
| 63.5 | 44.0 | 32.0 | 50.0 | 43.0 | | 56.0 | 38.0 | 50.5 |
| 63.0 | 44.0 | 30.0 | 50.0 | 43.0 | | 56.0 | 38.0 | 49.5 |
| 62.0 | 43.5 | | | 42.0 | | 55.0 | 38.0 | 49.5 |
| 61.0 | 42.5 | | | 42.0 | | 55.0 | 38.0 | 47.0 |
| 60.0 | 42.0 | | | 40.0 | | 54.5 | 38.0 | 46.5 |
| 57.8 | 41.1 | | | 38.0 | | 54.5 | 38.0 | 46.4 |
| 57.0 | 40.8 | | | 38.0 | | 54.0 | 38.0 | 44.6 |
| 57.0 | 40.5 | | | 37.0 | | 53.0 | 37.8 | 44.6 |
| 55.0 | 40.5 | | | 37.0 | | 51.0 | 37.0 | 44.0 |
| 55.0 | 40.0 | | | 37.0 | | 51.0 | 37.0 | 42.0 |
| 55.0 | 40.0 | | | 37.0 | | 50.5 | 37.0 | 40.9 |
| | 39.0 | | | | | | 36.7 | 38.0 |
| | 38.5 | | | | | | 36.5 | 38.0 |
| | | | | | | | 36.0 | |
| | | | | | | | 35.0 | |

| El Tomé | | Sotaquí | | Ovalle DGA | | La Torre | | La Placilla |
|---------|------|---------|------|------------|------|----------|------|-------------|
| 111.7 | 34.8 | 101.5 | 37.0 | 89.5 | 25.0 | 115.0 | 41.0 | 153.0 |
| 109.5 | 33.0 | 81.0 | 36.5 | 73.5 | 24.6 | 98.0 | 40.6 | 105.0 |
| 100.0 | 32.0 | 78.5 | 36.0 | 66.0 | 24.5 | 78.0 | 39.5 | 99.0 |
| 94.0 | 32.0 | 73.0 | 35.0 | 62.0 | 24.0 | 70.0 | 39.5 | 92.0 |
| 82.0 | 32.0 | 73.0 | 35.0 | 57.0 | 23.5 | 68.0 | 38.0 | 84.0 |
| 66.0 | 31.0 | 67.0 | 34.0 | 55.0 | 23.0 | 68.0 | 37.5 | 83.0 |
| 66.0 | 31.0 | 65.0 | 34.0 | 53.7 | 23.0 | 66.0 | 37.0 | 76.5 |
| 63.5 | 31.0 | 63.0 | 33.5 | 50.8 | | 65.0 | 37.0 | 75.0 |
| 60.0 | 31.0 | 63.0 | 33.0 | 48.0 | | 64.0 | 36.0 | 73.0 |
| 60.0 | 31.0 | 61.5 | 33.0 | 44.1 | | 59.0 | 36.0 | 69.8 |
| 56.0 | 31.0 | 59.0 | 32.5 | 41.5 | | 58.0 | 35.0 | 66.5 |
| 55.5 | 30.0 | 53.5 | 32.3 | 39.5 | | 58.0 | 35.0 | 65.0 |
| 53.5 | 30.0 | 52.5 | 32.0 | 39.5 | | 56.0 | 34.0 | 59.0 |
| 53.0 | | 49.0 | 32.0 | 39.0 | | 55.5 | 34.0 | 56.0 |
| 50.5 | | 49.0 | 31.0 | 38.0 | | 53.5 | 34.0 | 56.0 |
| 50.0 | | 48.0 | 31.0 | 35.0 | | 52.0 | 33.7 | 55.2 |
| 48.5 | | 45.0 | 30.0 | 35.0 | | 51.0 | 33.0 | 55.0 |
| 48.0 | | 44.5 | 30.0 | 34.5 | | 50.0 | 33.0 | 50.5 |
| 46.5 | | 43.0 | 30.0 | 33.0 | | 50.0 | 33.0 | 50.0 |
| 46.0 | | 43.0 | 29.0 | 32.0 | | 50.0 | 33.0 | 48.0 |
| 45.5 | | 43.0 | 28.0 | 31.5 | | 49.0 | 31.5 | 46.0 |
| 43.0 | | 42.5 | 28.0 | 30.2 | | 49.0 | 30.0 | 44.5 |
| 42.4 | | 42.5 | 28.0 | 30.1 | | 49.0 | 30.0 | |
| 41.0 | | 42.5 | 27.5 | 29.8 | | 47.3 | 30.0 | |
| 40.0 | | 42.5 | | 28.5 | | 46.0 | 29.0 | |
| 40.0 | | 42.1 | | 28.0 | | 46.0 | 28.5 | |
| 38.5 | | 39.5 | | 27.5 | | 45.0 | 27.5 | |
| 38.4 | | 38.0 | | 27.3 | | 45.0 | 27.5 | |
| 38.0 | | 38.0 | | 27.0 | | 45.0 | 27.0 | |
| 38.0 | | 38.0 | | 27.0 | | 44.0 | 27.0 | |
| 38.0 | | 37.5 | | 26.4 | | 42.5 | | |
| 36.0 | | 37.0 | | 25.2 | | 42.0 | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| Punitaqui | | Peña Blanca | Cuncumén | | Coirón | | Salamanca | |
|-----------|------|-------------|----------|------|--------|------|-----------|------|
| 162.0 | 43.0 | 84.0 | 129.0 | 49.0 | 167.5 | 48.0 | 143.5 | 41.5 |
| 122.0 | 42.0 | 78.0 | 113.0 | 49.0 | 125.0 | 46.4 | 99.0 | 39.5 |
| 92.5 | 41.0 | 60.0 | 110.0 | 48.0 | 123.0 | 45.0 | 93.0 | 38.7 |
| 84.0 | 41.0 | 57.0 | 100.0 | 48.0 | 122.5 | 45.0 | 80.0 | 38.0 |
| 81.0 | 41.0 | 57.0 | 95.0 | 47.3 | 110.3 | 45.0 | 79.0 | 37.0 |
| 78.5 | 40.5 | 55.5 | 90.9 | 47.0 | 99.0 | | 78.2 | 35.5 |
| 78.5 | 39.0 | 55.0 | 82.0 | 45.9 | 98.5 | | 77.6 | |
| 70.0 | 38.0 | 55.0 | 81.0 | 45.5 | 94.0 | | 75.2 | |
| 68.0 | 38.0 | 54.0 | 80.0 | 45.0 | 89.5 | | 72.0 | |
| 68.0 | 38.0 | 52.0 | 77.0 | 44.0 | 83.0 | | 62.0 | |
| 65.5 | 36.0 | 51.0 | 76.0 | 43.3 | 76.0 | | 61.0 | |
| 64.8 | 34.5 | 50.0 | 72.0 | 41.0 | 75.0 | | 59.0 | |
| 60.0 | 34.5 | 49.0 | 70.0 | 40.0 | 74.0 | | 56.5 | |
| 57.0 | 34.0 | 47.0 | 66.0 | 39.0 | 73.4 | | 55.0 | |
| 56.5 | 33.5 | 45.5 | 64.0 | 38.5 | 68.0 | | 53.8 | |
| 56.0 | 33.0 | 41.0 | 64.0 | 37.7 | 67.0 | | 52.5 | |
| 56.0 | 33.0 | 38.0 | 61.0 | 36.0 | 65.0 | | 52.0 | |
| 55.5 | | 37.4 | 59.0 | 35.0 | 64.5 | | 50.0 | |
| 53.0 | | 35.5 | 58.0 | | 63.0 | | 49.3 | |
| 52.5 | | 35.0 | 57.0 | | 60.0 | | 49.0 | |
| 52.0 | | 35.0 | 57.0 | | 59.0 | | 48.1 | |
| 52.0 | | 34.0 | 56.0 | | 56.5 | | 48.0 | |
| 50.0 | | | 56.0 | | 55.5 | | 47.1 | |
| 49.0 | | | 55.0 | | 55.0 | | 46.0 | |
| 48.0 | | | 55.0 | | 54.6 | | 46.0 | |
| 48.0 | | | 53.5 | | 54.0 | | 45.5 | |
| 48.0 | | | 53.0 | | 52.8 | | 45.2 | |
| 45.0 | | | 53.0 | | 52.2 | | 45.1 | |
| 44.1 | | | 52.0 | | 51.0 | | 44.0 | |
| 44.0 | | | 50.5 | | 50.5 | | 44.0 | |
| 44.0 | | | 50.0 | | 49.3 | | 42.9 | |
| 44.0 | | | 50.0 | | 48.5 | | 41.5 | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| San Agustín | | | Mal Paso | Limahuida | | Las Burras | Sta. Virginia |
|-------------|------|------|----------|-----------|------|------------|---------------|
| 117.7 | 51.0 | 38.8 | 90.0 | 86.0 | 35.0 | 207.3 | 105.5 |
| 103.0 | 50.0 | 38.0 | 80.0 | 77.3 | 35.0 | 110.0 | 88.0 |
| 102.5 | 50.0 | 37.9 | 73.0 | 65.0 | 35.0 | 95.0 | 71.0 |
| 97.0 | 50.0 | 37.5 | 68.0 | 65.0 | 34.0 | 90.5 | 70.5 |
| 97.0 | 49.0 | 37.5 | 66.0 | 65.0 | 34.0 | 71.0 | 70.0 |
| 90.2 | 49.0 | 37.5 | 60.0 | 62.0 | 32.5 | 66.0 | 66.0 |
| 81.0 | 48.5 | | 60.0 | 50.0 | 32.5 | 63.5 | 66.0 |
| 80.0 | 48.0 | | 55.0 | 50.0 | 32.0 | 56.2 | 62.0 |
| 79.0 | 47.8 | | 54.0 | 50.0 | 32.0 | 54.5 | 58.0 |
| 78.5 | 47.0 | | 54.0 | 50.0 | 31.5 | 50.2 | 52.0 |
| 78.0 | 47.0 | | 52.0 | 50.0 | 30.0 | 46.0 | 51.0 |
| 77.0 | 46.8 | | 52.0 | 50.0 | 30.0 | 44.0 | 49.5 |
| 76.0 | 46.5 | | 51.0 | 50.0 | 30.0 | 40.0 | 49.0 |
| 73.0 | 46.0 | | 50.0 | 49.0 | 30.0 | 39.0 | 45.0 |
| 72.5 | 45.5 | | 50.0 | 48.0 | 28.5 | 38.5 | 44.0 |
| 72.2 | 45.5 | | 50.0 | 48.0 | | 38.5 | 43.5 |
| 71.0 | 45.0 | | 50.0 | 46.0 | | 36.5 | 42.0 |
| 70.5 | 42.0 | | 49.0 | 46.0 | | 35.5 | 42.0 |
| 70.5 | 42.0 | | 46.0 | 46.0 | | 34.0 | 41.5 |
| 66.0 | 41.5 | | 46.0 | 45.0 | | 33.2 | 41.0 |
| 62.8 | 41.5 | | 45.0 | 44.0 | | 32.0 | 41.0 |
| 61.7 | 41.4 | | 45.0 | 44.0 | | 32.0 | 40.0 |
| 60.0 | 40.7 | | 42.0 | 41.0 | | | 39.0 |
| 58.0 | 40.0 | | 41.0 | 40.0 | | | 38.0 |
| 56.5 | 40.0 | | 41.0 | 40.0 | | | 38.0 |
| 56.4 | 40.0 | | 40.0 | 40.0 | | | 34.0 |
| 56.0 | 40.0 | | 40.0 | 40.0 | | | 33.5 |
| 56.0 | 39.5 | | 40.0 | 39.0 | | | 32.5 |
| 55.0 | 39.0 | | 37.0 | 37.0 | | | 30.0 |
| 54.0 | 39.0 | | | 37.0 | | | |
| 54.0 | 39.0 | | | 36.0 | | | |
| 54.0 | 39.0 | | | 36.0 | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

| Huintil | | Mincha Norte | | La Canela DMC | | Caimán | Los Vilos |
|---------|------|--------------|------|---------------|------|--------|-----------|
| 127.0 | 42.0 | 95.0 | 34.5 | 90.0 | 30.0 | 121.0 | 155.0 |
| 103.0 | 42.0 | 82.0 | 34.0 | 76.7 | 29.7 | 116.0 | 88.6 |
| 99.5 | 41.9 | 73.0 | 34.0 | 69.8 | 29.5 | 105.0 | 87.0 |
| 83.5 | 40.0 | 68.0 | 34.0 | 63.0 | 29.0 | 92.0 | 83.9 |
| 80.5 | 39.5 | 64.0 | 33.5 | 60.0 | 28.8 | 86.0 | 78.7 |
| 68.0 | 38.0 | 59.0 | | 58.5 | | 79.0 | 78.0 |
| 67.0 | 38.0 | 54.0 | | 54.5 | | 74.5 | 77.0 |
| 66.0 | 37.0 | 54.0 | | 48.3 | | 70.0 | 74.0 |
| 66.0 | 37.0 | 52.0 | | 48.0 | | 69.0 | 74.0 |
| 65.5 | 36.3 | 50.0 | | 46.8 | | 67.3 | 73.5 |
| 65.0 | 35.0 | 50.0 | | 46.0 | | 61.5 | 71.0 |
| 64.0 | 35.0 | 48.0 | | 44.5 | | 59.0 | 69.1 |
| 57.0 | 34.0 | 47.0 | | 43.5 | | 58.0 | 63.8 |
| 55.8 | 34.0 | 45.5 | | 43.0 | | 55.0 | 62.0 |
| 55.5 | 33.0 | 45.0 | | 43.0 | | 54.0 | 61.0 |
| 55.0 | 33.0 | 44.0 | | 42.0 | | 53.0 | 60.5 |
| 52.0 | | 44.0 | | 38.7 | | 53.0 | 60.0 |
| 51.0 | | 43.0 | | 37.0 | | 53.0 | 57.0 |
| 50.7 | | 42.0 | | 37.0 | | 47.5 | 52.0 |
| 50.0 | | 40.5 | | 35.8 | | 46.8 | 52.0 |
| 50.0 | | 40.5 | | 35.5 | | 44.5 | 47.5 |
| 49.5 | | 40.0 | | 35.0 | | | 46.0 |
| 47.0 | | 39.1 | | 34.1 | | | 44.5 |
| 47.0 | | 37.0 | | 34.0 | | | 44.0 |
| 45.0 | | 37.0 | | 34.0 | | | 44.0 |
| 44.5 | | 36.5 | | 33.8 | | | 44.0 |
| 44.5 | | 36.0 | | 32.3 | | | 43.3 |
| 44.0 | | 36.0 | | 32.0 | | | 43.0 |
| 43.5 | | 35.5 | | 31.0 | | | 42.2 |
| 43.0 | | 35.0 | | 30.0 | | | |
| 43.0 | | 35.0 | | 30.0 | | | |
| 42.5 | | 35.0 | | 30.0 | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

| Culimo Embalse | | Quilimari |
|-------------------|------|-----------|
| 108.0 | 42.7 | 129.5 |
| 102.3 | 42.0 | 105.0 |
| 98.0 | 42.0 | 95.0 |
| 96.2 | 41.4 | 85.7 |
| 96.0 | 40.6 | 85.6 |
| 95.2 | 40.0 | 84.5 |
| 81.0 | 40.0 | 84.3 |
| 81.0 | | 81.7 |
| 79.9 | | 78.2 |
| 79.8 | | 75.7 |
| 78.5 | | 71.6 |
| 77.4 | | 64.5 |
| 74.2 | | 64.0 |
| 73.8 | | 60.8 |
| 61.7 | | 60.1 |
| 61.2 | | 59.4 |
| 57.2 | | 58.3 |
| 56.9 | | 58.0 |
| 56.3 | | 55.2 |
| 55.8 | | 54.0 |
| 54.0 | | 53.6 |
| 54.0 | | 53.5 |
| 51.9 | | 52.2 |
| 48.2 | | 50.6 |
| 48.2 | | 50.0 |
| 46.0 | | 48.6 |
| 45.5 | | 48.5 |
| 44.3 | | 48.3 |
| 44.2 | | 48.0 |
| 43.5 | | 47.9 |
| 43.5 | | 47.8 |
| 43.0 | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |