

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL**



**Profesor Patrocinante:** Alvaro Suazo Schwencke

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE LLUVIA ARTIFICIAL DE  
EROSIVIDAD EQUIVALENTE A LA PRECIPITACIÓN  
EN LA CIUDAD DE CONCEPCIÓN**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
Título de Ingeniero Civil

**Cristian Andrés Jiménez Campos**

Concepción, Enero del 2014

*Dedicado a:*

*Nury del Carmen Campos Fonseca, quien con su esfuerzo hizo que este sueño fuese posible al ser padre, madre, amiga, guía y el sustento del hogar sin pedir nada a cambio. Este logro es para ti.*

## **Agradecimiento.**

Es difícil poder plasmar la gratitud de toda una carrera en tan solo una hoja, este es solo un mero intento de hacerlo.

Agradezco profundamente a mi Dios, quien me vio desde el vientre de mi madre y desde entonces no me ha desamparado. En segundo lugar, la cato. Agradezco también a mi familia, que ha sido la motivación para terminar esta carrera cuando todo lo que mi cuerpo deseaba era tirar la toalla, a mi madre, la Jenny y capitán. También a mi iglesia, la cual yo sé que no dejó de orar por mi ni de darme ánimos cuando lo necesitaba. A mi padre que a pesar de no estar en casa siempre se esforzó para que no me faltara nada material, a pesar de estar en otros caminos no apartó su vista de lo que había dejado atrás. A Érica Andrade, quien ha sido mi consejera a lo largo de estos años, usted me enseñó lo que es la universidad más que nadie.

Agradezco desde lo profundo de mi corazón a quien en esta carrera fue más que un hermano, y aun cuando no compartíamos los mismos ramos siempre estuvo ahí para tenderme su mano, Mauricio Avilez muchas gracias por tu ayuda en todo. A Francisco Belmar por acudir a cualquier llamado de ayuda y enseñarme lo que no sabía. A la Ruty por las largas conversaciones y tenerme más fe de la que jamás me tendré. A sir William por los poderes. Y así a todos mis compañeros, por enseñarme que la colaboración es más importante que la competencia desleal.

Y por último agradezco a mis profesores, esta carrera es humana gracias a ustedes, no dejen de comprometerse con los que serán sus alumnos, una sonrisa en aflicción es más poderosa que mil bombas. Por atender mis preguntas locas cuando a veces ni siquiera me hacían clases. A las secretarías que son el motor del departamento, ayudando siempre que se lo piden. Y en especial al profesor Álvaro Suazo, por su paciencia, sus conocimientos y siempre responder mis locas preguntas con una sonrisa a pesar de tener una agenda apretada.

# Índice

RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
<b>1- INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1- IDENTIFICACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA. ....</b>	<b>3</b>
<b>1.2- ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN. ....</b>	<b>4</b>
<b>1.3- OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.1- OBJETIVO GENERAL: .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....</b>	<b>4</b>
<b>2.- FUNDAMENTOS DEL DISEÑO. ....</b>	<b>5</b>
<b>2.1- CARACTERIZACIÓN DE LA LLUVIA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2- GENERACIÓN DE PRECIPITACIÓN ARTIFICIAL.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3- VELOCIDAD DE APLICACIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>2.4- ENSAYOS EN TERRENO.....</b>	<b>9</b>
<b>3-METODOLOGÍA. ....</b>	<b>9</b>
<b>3.1-CARACTERIZACIÓN DE LA LLUVIA EN CONCEPCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2-SELECCIÓN DEL PROTOTIPO A DESARROLLAR. ....</b>	<b>11</b>
<b>3.3-DIMENSIONAMIENTO DEL PROTOTIPO .....</b>	<b>12</b>
<b>3.3.1- VELOCIDAD LÍMITE. ....</b>	<b>12</b>
<b>3.3.2- ALTURA DE DESARROLLO DE LA VELOCIDAD LIMITE. ....</b>	<b>14</b>
<b>3.3.3- VELOCIDAD DE SALIDA DEL ASPERSOR.....</b>	<b>15</b>
<b>3.4- MATERIALIDAD.....</b>	<b>16</b>
<b>3.5 DISEÑO DE DISTRIBUCIÓN DE ASPERSORES.....</b>	<b>17</b>
<b>3.6- MÉTODO DE VALIDACIÓN .....</b>	<b>18</b>
<b>4- IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO Y VALIDACIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1- ELECCIÓN DEL ASPERSOR.....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 ENSAYOS Y ESTADO RESULTADO.....</b>	<b>20</b>
<b>4.2.1 VERIFICACIÓN DE INTENSIDAD DE DISEÑO.....</b>	<b>20</b>
<b>4.2.2 VERIFICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA GOTA. ....</b>	<b>20</b>
<b>4.2.3 TEST DE UNIFORMIDAD .....</b>	<b>21</b>
<b>5- DIMENSIONES FINALES DEL PROTOTIPO.....</b>	<b>22</b>
<b>6- CONCLUSIONES.....</b>	<b>24</b>

<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>25</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>27</b>
<b>DATOS DE ENSAYO POR ASPERSOR .....</b>	<b>27</b>
<b>DATOS DE ENSAYO EN TERRENO PARA 4 ASPERSORES.....</b>	<b>30</b>

# **DISEÑO DE UN SISTEMA DE LLUVIA ARTIFICIAL DE EROSIVIDAD EQUIVALENTE A LA PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE CONCEPCIÓN**

**Autor: Cristian Jiménez Campos**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío.

cristianojimenez@gmail.com

**Profesor Patrocinante: Dr. Álvaro Suazo Schwencke**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío.

## **Resumen**

Bajo la necesidad de contar con lluvia para realizar ensayos de erosión en taludes, fue desarrollado un simulador de lluvia tanto para terreno como para laboratorio. Empleando materiales de fácil adquisición y con un diseño económico, el simulador es capaz de reproducir lluvias de intensidades variadas ajustándose al sector a ensayar. En el caso particular, el sistema, se calibró para que sea representativo de la ciudad de Concepción. La intensidad de lluvia varía con la cantidad de aspersores, presión de entrada al sistema y la altura a la que se encuentre la caída de agua. La uniformidad de lluvia sobre un área de 2m por 2m es en promedio 93% y en los aspersores por separado es sobre un 85% en todos los casos. El simulador en sí es ligero y portable por lo que puede ser cargado a cualquier camioneta y ser trasladado a terreno.

Palabras claves: Simulador de lluvia, Intensidad de lluvia, lluvia artificial.

7090 palabras + 9 Tablas/Fig\*250 = 9340

## **DESIGN OF A RAINFALL SIMULATOR WITH AN EROSION EQUIVALENT TO THE RAIN IN CONCEPCIÓN CITY.**

**Author: Cristian Jiménez Campos**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío.

cristianojimenez@gmail.com

**Sponsor professor: Dr. Álvaro Suazo Schwencke**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío.

### **Abstract**

Under the need of rain for slope erosion tests, a rainfall simulator has been developed for both field and laboratory. Employing readily available materials and an economic design, the simulator is capable to reproduce plenty of storm intensities adjusting to the studied zone. On this particular case, the system was calibrated to be representative of the city of Concepción. The storm intensity depends on the amount of sprinklers, head pressure and the height of the fall of water. Uniformity of rainfall intensity over a 2m by 2m area averages 93% and sprinklers alones over 85% in all the cases. The simulator is light and portable so it can be loaded into any truck for transport to the field.

Keywords: Rainfall simulator, storm intensity, artificial rain.

## **1- Introducción.**

En la Región del Biobío, Chile, se encuentran en la actualidad numerosas carreteras en operación, de las cuales un gran porcentaje posee taludes en tramos considerables. Una de las grandes problemáticas presentes en esta zona geográfica es la erosión de dichos taludes, lo que conlleva desde la disminución del nivel de servicio en carreteras, hasta riesgos para la vida humana y la habitabilidad en sectores aledaños a terrenos escarpados.

En el caso del estudio de la erosividad en taludes, antes de observar la efectividad de un método de tratamiento, es necesario contar con una precipitación que sea similar a una lluvia de carácter natural. Ya que los ensayos con precipitación natural dependen de la meteorología, no son posibles en ciertas estaciones del año, y son difíciles de programar con antelación debido a la imposibilidad de predecir lluvias de manera exacta al alejarse mucho el horizonte de observación. Por lo tanto, es necesario elaborar ensayos con una representatividad que asegure un análisis adecuado del problema utilizando técnicas de simulación de lluvia.

### **1.1- Identificación y justificación del problema.**

Para el análisis de la erosión en taludes se puede esperar la lluvia natural. No siempre esto es posible, por lo que se requiere la utilización de sistemas de lluvia artificial. En este caso se debe asegurar que ese tipo de sistema sea representativo de la erosividad de las precipitaciones que ocurren en una zona en particular, para que los resultados sean comparables a lo que acontecería en la realidad.

El propósito principal de un simulador de lluvia es la emulación de la precipitación de manera exacta y precisa. La lluvia es un fenómeno complejo, que posee la interacción de varias de sus propiedades de manera simultánea (tamaño de la gota, velocidad de caída, intensidad de lluvia, etc.) además de grandes variaciones climáticas basadas en la topografía e influencias marinas. Por ello su simulación es necesaria para los estudios de erosión que quieran llevarse a cabo.



## **1.2- Alcances de la investigación.**

El correcto uso de las técnicas de simulación de lluvia es necesario para realizar cualquier ensayo relacionado con ella, tanto de erosión como de infiltración. Su implementación de una manera adecuada, según sea el caso, puede resultar en una laboriosa tarea que implica tanto tiempo como recursos. Además se requiere diseño y evaluación de alternativas.

Para cumplir con estos alcances, se ha desarrollado una metodología que consiste en la elaboración de un simulador de lluvia, diseñado según las observaciones de proyectos agrícolas e ingenieriles realizados con anterioridad.

## **1.3- Objetivos de la investigación.**

### **1.3.1- Objetivo general:**

- Diseñar un sistema de lluvia artificial que represente las precipitaciones registradas en la ciudad de Concepción.

### **1.3.2- Objetivos específicos:**

- Seleccionar las características de las lluvias en base a las máximas anuales en Concepción.
- Analizar alternativas de configuración del simulador y comportamiento de los elementos.
- Dimensionar el prototipo de precipitación artificial.
- Desarrollar el prototipo en laboratorio.
- Validar el prototipo mediante ensayos controlados.

## **2.- Fundamentos del diseño.**

Antes de realizar un diseño es preciso contar con los conocimientos y las herramientas necesarias para que el prototipo sea acorde a lo requerido, por lo que se definirán los conceptos necesarios y los parámetros a emular. Estos últimos definirlos en relación al uso que se les dará, para así caracterizar la lluvia de una manera óptima y concisa.

### **2.1- Caracterización de la lluvia.**

Para la modelación de lluvia en laboratorio es necesario identificar las características relevantes a emular, para así poder contar con un prototipo válido para la experiencia. Estas variables relevantes dependen básicamente del uso que se le dará al prototipo, ya sea ensayos de regadío, erosión de suelos, análisis de lixiviados en pilas de residuos sólidos, etc.

La simulación apropiada de la lluvia requiere varios criterios: 1. Distribución del tamaño de la gota próxima a una lluvia natural (Bubbenzer, 1979). 2. Velocidad de impacto de la gota cercana a la velocidad terminal de precipitación natural (Laws, 1941; Gunn y Kinzer, 1949). 3. Intensidad de lluvia uniforme y distribución aleatoria del tamaño de gota (Laws y Parsons, 1943). 4. Aplicación de una lluvia uniforme a lo largo de toda el área de prueba. 5. Ángulo vertical de impacto. 6. Patrones de lluvia reproducibles con duración e intensidad significativas (Moore et. al., 1983) (Meyer y Harmon, 1979).

En pos de definir físicamente la lluvia natural lo más fidedignamente posible, y en aras de la simplicidad y economía del diseño, se han seleccionado las principales características:

Tamaño de la gota: las gotas de lluvia varían desde un tamaño insignificante en la niebla hasta un máximo de seis o siete mm de diámetro. Este es el límite físico superior del tamaño de la gota y por encima de esa dimensión cualquier gota que se forme como resultado de la unión de más de una gota será inestable y se dividirá en gotas más pequeñas. El diámetro medio de una gota es de 2 a 3 mm y varía con la intensidad (Laws 1941). Las precipitaciones ciclónicas en los climas templados están principalmente compuestas de gotas de tamaño pequeño o mediano. En cambio las tempestades tropicales de gran intensidad tienen una proporción mayor de gotas grandes. En el caso de la ciudad de Concepción se estima gotas de tamaño

medio, por tener precipitaciones del tipo frontal, por lo que el tamaño promedio de la gota estimado por Laws (1941) resulta representativo para el análisis.

Velocidad de caída: las gotas de lluvia que caen alcanzan una velocidad máxima (o terminal) cuando la fuerza de aceleración gravitacional es igual a la resistencia de la gota que cae a través del aire. La velocidad terminal está en función del tamaño de la gota y aumenta hasta un máximo de 9 m/s para las gotas mayores (Laws, 1941).

La energía cinética: Es la suma de la energía cinética de las gotas individuales. Está en función del tamaño y de la velocidad de caída y se utiliza frecuentemente como un parámetro deseable para un simulador ya que se sabe que está estrechamente relacionada con la capacidad de la lluvia para causar erosión. La energía cinética de la lluvia varía con la intensidad (Hudson, 1981) situándose el límite superior para una precipitación de 75 mm/h. Este límite superior es el resultado del límite superior del tamaño de las gotas de lluvia (las intensidades máximas tienen más gotas, pero no de un tamaño constantemente creciente), de manera que la energía por volumen de lluvia no aumenta por encima de las intensidades de 75 mm/h. La energía por segundo, aumenta con la intensidad a todos los niveles de intensidad. La intensidad de la lluvia no está relacionada con la precipitación anual media, dado que las lluvias en regiones áridas o semiáridas pueden alcanzar intensidades tan elevadas como en los trópicos húmedos, aunque menos frecuentemente.

La intensidad de las precipitaciones o el caudal de la lluvia: puede variar rápidamente en la lluvia natural, pero no suele ser práctico ni necesario construir simuladores de lluvia que puedan cambiar su intensidad durante una prueba. Normalmente el simulador se elige y diseña para un único valor de intensidad, por ejemplo 25 mm/h, con el fin de simular precipitaciones en zonas templadas, o de 75 mm/h para precipitaciones sobre regiones tropicales o semiáridas.

Uniformidad de distribución: es conveniente que haya uniformidad de la distribución de la lluvia sobre las parcelas de ensayo. Lo más común es el uso del coeficiente de uniformidad de Christiansen, CU.

## **2.2- Generación de precipitación artificial.**

Para lograr la creación de lluvia artificial existen varios modelos y prototipos realizados. El estado del arte en esta área es ya avanzado pues su desarrollo se remonta al avance ingenieril

en la agricultura. La gran variedad de prototipos realizados se puede clasificar en dos categorías globales (Thomas y El Swaifi, 1989): con y sin presión.

- a) Simuladores de lluvia sin presión: utilizan el principio de que las gotas se forman y caen desde los extremos de los tubos conectados con un suministrador de agua. El tamaño de la gota está relacionado con la dimensión del tubo. Se han utilizado tubos de metal, vidrio o plástico o agujas hipodérmicas que se fabrican con un alto grado de precisión. Es posible utilizar un conjunto de tubos de diferentes tamaños para producir una lluvia con gotas de tamaños distintos.

Las ventajas de este método son que el tamaño de las gotas y su velocidad de caída son constantes, la distribución de la lluvia a través de la parcela de ensayo es uniforme y se puede lograr con baja presión del agua.

Las desventajas son que, salvo si el dispositivo se coloca muy alto (10 metros) (Grierson and Oades, 1977), las gotas golpean la parcela de prueba a una velocidad muy inferior a la velocidad terminal de la lluvia natural y, en consecuencia, los valores de la energía cinética son también reducidos. Una gota grande de 5 mm de diámetro necesita una altura de caída de unos 12 metros para alcanzar la velocidad terminal y esto es difícil de lograr en condiciones de campo. En cierta medida, esto se puede compensar utilizando gotas de mayor tamaño que las de la lluvia natural. Otra desventaja es que la dimensión de la parcela de ensayo es reducida a causa de las dificultades prácticas para construir un depósito suficientemente grande para la formación de las gotas.

- b) Simuladores basados en pulverización a presión: es la forma más sencilla de salpicadura. Consiste en la pulverización a presión con aspersores o rosetas conectados mediante una manguera a un sistema presurizado. La mayoría de los aspersores y rosetas comerciales poseen perforaciones de un mismo tamaño, pero es posible lograr una distribución mixta añadiendo agujeros de distinto diámetro. En el caso de las rosetas o rociadores se presenta el mismo problema que en los generadores de gota sin presión, el cual es que la velocidad de impacto es baja y depende de la altura que este tenga con respecto a la superficie a ensayar. En cambio, los aspersores a presión poseen la cualidad que la velocidad de impacto puede aumentarse dirigiendo el

aspersor hacia abajo para añadirle la velocidad de salida de la cabeza a la aceleración de gravedad.

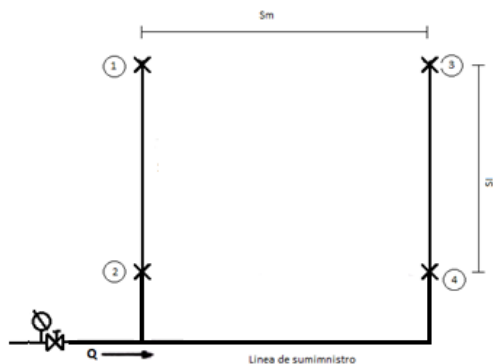
Una desventaja que presenta este tipo de simuladores es que, incluso a bajas presiones de agua, la intensidad que generan los regadores son elevadas (Elwell y Makwanya, 1980), por lo que requieren de un especial cuidado en su manipulación para no presentar intensidades superiores a la lluvia natural. Por lo tanto, es necesario interrumpir de alguna manera el rociador para reducir la intensidad hasta llegar a la natural (Meyer, 1988).

Los aspersores de bajo caudal permiten 120 a 350 l/hr a una presión en cabeza de 15 a 25 metros. Son usados principalmente en regadío bajo árboles frutales. Los aspersores, usualmente espaciados a intervalos de dos árboles por uno, son instalados en laterales portátiles de aluminio o en laterales plásticos de pequeño diámetro (16 mm o 20 mm).

Los aspersores de bajos caudales, teniendo pasos estrechos de caudal, pueden requerir filtros para evitar que se tapen. Filtros con malla 40 a 80 son de uso común, pero si es agua potable, los filtros son despreciables.

### **2.3- Velocidad de aplicación.**

La descarga,  $q$  ( $m^3/hr$ ), de un aspersor es una función del tamaño de la boquilla(s) y de la presión de operación en la cabeza. La descarga se extiende por un área efectiva  $S_m \times S_l$ , donde  $S_m$  (metros) es el espaciamiento entre los laterales y  $S_l$  (metros) es el espaciamiento entre los aspersores a lo largo del lateral (para máquinas que se mueven constantemente mientras irrigan,  $S_m$  es el espaciamiento entre rutas de viaje adyacentes y  $S_l$  es la distancia de viaje recorrida a lo largo de una hora). La altura promedio de agua por hora es definida como la velocidad de aplicación,  $I$  (mm/hr), como se observa en la ecuación (1) (Benami y Ofen, 1993).



$$I = \frac{q}{S_m \times S_l} \times 1000 \quad (\text{Ec1})$$

## 2.4- Ensayos en terreno.

La uniformidad de distribución de agua de los aspersores es evaluada por ensayos en terreno en los que el agua es medida mediante recipientes recolectores. Los procedimientos descritos a continuación se refieren a aspersores estacionarios durante la irrigación.

En un ensayo de terreno es evaluada una situación para un aspersor, boquilla, presión en cabeza y espaciamiento determinados. En general, los ensayos de terreno se realizan bajo condiciones de poco viento o la ausencia de él.

Estos ensayos son normalmente llevados a cabo con un solo lateral, y un solo aspersor, sobre un área provista con un drenaje amplio. Cuando se usa un solo lateral, se ubica de manera que sea capaz de alimentar a un aspersor ubicado en la parte central del terreno a ensayar. Una vez realizado esto se procede a recolectar datos de la distribución de agua en el área provista.

Ya con los datos que aportan los ensayos individuales a distintas presiones, se puede realizar una distribución de aspersores que garanticen una adecuada intensidad de lluvia y uniformidad de esta

## 3-Metodología.

El estudio de las lluvias y su simulación es un proceso teórico y práctico, el cual consiste en la evaluación de las precipitaciones medidas en una locación particular y luego llevarla a cabo bajo condiciones controladas en laboratorio o terreno. Gran parte de los simuladores de lluvia

como tal son realizados con fines agrícolas, produciendo lluvias de intensidad y duración ideales para el tipo de sembrado el cual se desea regar.

### 3.1- Caracterización de la lluvia en Concepción.

Para efectos de la presente, no solo es importante emular la intensidad y asegurar una duración de lluvia pertinente, sino que también se necesita una distribución de caída de agua uniforme a lo largo de toda el área a ensayar. Para esto se procede a establecer el método de ensaye y sus características más relevantes, así como plasmar también los puntos conflictivos y posibles soluciones en el desarrollo del prototipo a construir.

Por lo tanto, para poder establecer las cualidades de la lluvia a reproducir se procede a identificar las intensidades de lluvia de terreno mediante las curvas IDF elaboradas a través de datos medidos en estaciones cercanas (MOP, 2009), las cuales se muestran en la figura 1.

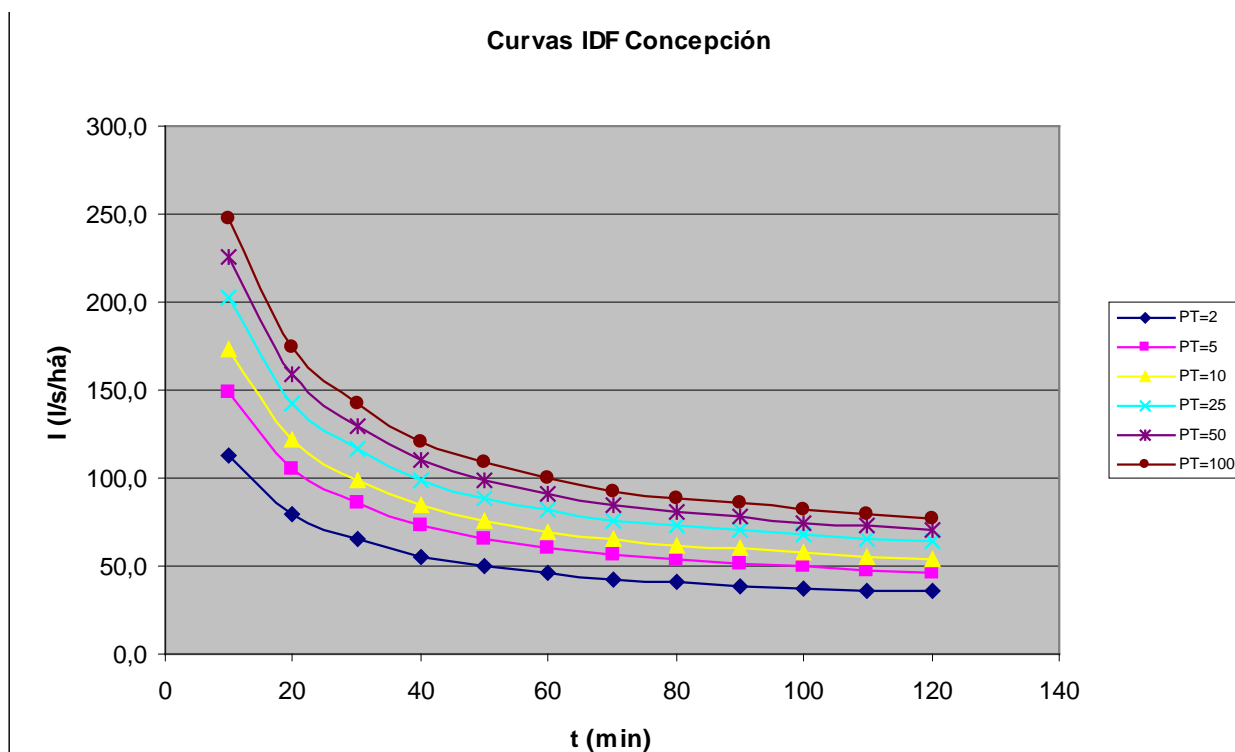


Figura 1 Curvas IDF Ciudad de Concepción (MOP, 2009).

Para un periodo de retorno de  $T=10$  años y una duración de lluvia de  $t=10$  minutos, tiempos usualmente usados en el diseño de aguas lluvias en obras viales (Manual de Carretera Vol.3), se obtiene una intensidad de lluvia de 175  $l/s/ha$  lo que equivale a una intensidad de 63  $mm/h$ .

### **3.2-Selección del prototipo a desarrollar.**

Las alternativas de diseño en este tipo de simuladores son tan variadas como las necesidades de cada caso. Por lo tanto, es necesario elegir el tipo de simulador, los parámetros y características relevantes que ayudarán a seleccionar la mejor alternativa a utilizar.

Los simuladores se sub-dividieron en dos categorías, simuladores sin presión y con presión. La selección del tipo de simulador sería en base a la economía. Por lo tanto se selecciona mediante los siguientes criterios:

-Captación de agua: Los simuladores que no utilizan agua a presión tienen la desventaja que requieren de un sistema de bombeo que proporcione un caudal constante (Armstrong and Quinton, 2009). Puesto que la mayoría de las bombas del mercado son de pulso es necesario tener un estanque acumulador a la altura de caída del agua para asegurar un flujo continuo. A su vez, las bombas que entregan caudales constantes son de elevado coste y, por lo tanto, fuera del alcance de este proyecto. En cambio, la conexión presurizada de la red de agua potable es óptima por el simple hecho de entregar una cantidad de agua constante regulable sin la necesidad de tener un estanque acumulador, estanque de suministro de agua, un sistema de recirculación y una bomba que eleve el fluido a la altura de caída.

-Velocidad inicial: Los simuladores no presurizados presentan la desventaja de que, para que las gotas de agua alcancen una velocidad límite de caída, es necesario que la altura de la salida de agua sea considerablemente alta. En cambio, un sistema a presión posee una salida de agua con una velocidad inicial en función de la presión de la red a la que se conecte, por lo que la altura de desarrollo de velocidad terminal de caída es menor que en el caso anterior.

Debido a la ventaja de su fácil adquisición de manera comercial y a la disponibilidad del sistema de agua potable de la ciudad, además de la ventaja de poder controlar la velocidad inicial de las gotas, se ha seleccionado la alternativa de diseñar un simulador de lluvia de presión.

En este caso, debido a que el suministro de agua se presenta mediante la red de agua potable de la ciudad, y no de recirculación por medio de una bomba, la utilización de filtros se hace innecesaria.



### 3.3-Dimensionamiento del prototipo

El proyecto va enfocado al ensayo de taludes en erosión, y aunque, puede ser destinado a ensayos de infiltración, lixiviados en pilas de compost y regadío entre otros. Puesto que las probetas de taludes poseen en promedio 1m x 1m de área a utilizar, se propone un área total de precipitación para el simulador de 2m x 2m (4m<sup>2</sup>).

Además, y debido a que la lluvia debe ser representativa a la realidad, es necesario darle al modelo la altura suficiente para que alcance una velocidad límite. Por lo tanto se debe evaluar los siguientes parámetros:

- Velocidad límite.
- Altura de desarrollo de la velocidad límite.
- Velocidad de salida del aspersor.

#### 3.3.1- Velocidad límite.

Teniendo ya los datos de intensidad de la lluvia a emular, es posible estimar el diámetro promedio de la gota mediante la gráfica propuesta por Laws (1941) (Figura 2).

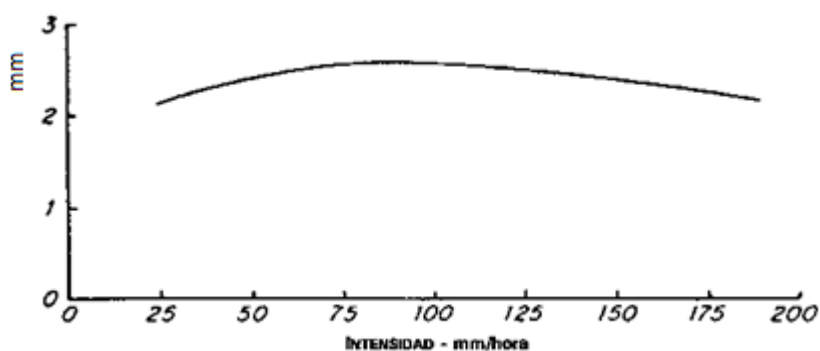


Figura 2 Relación entre el diámetro de la gota de volumen mediano y la intensidad (Laws 1941)

Para una intensidad de lluvia de 63 mm/h el diámetro promedio de gota es de 2,5 mm. Mediante esto es posible precisar la velocidad terminal a través de la Figura 3 (Laws, 1941). Así, la velocidad terminal para una gota de diámetro 2,5 mm es de 7 m/s.

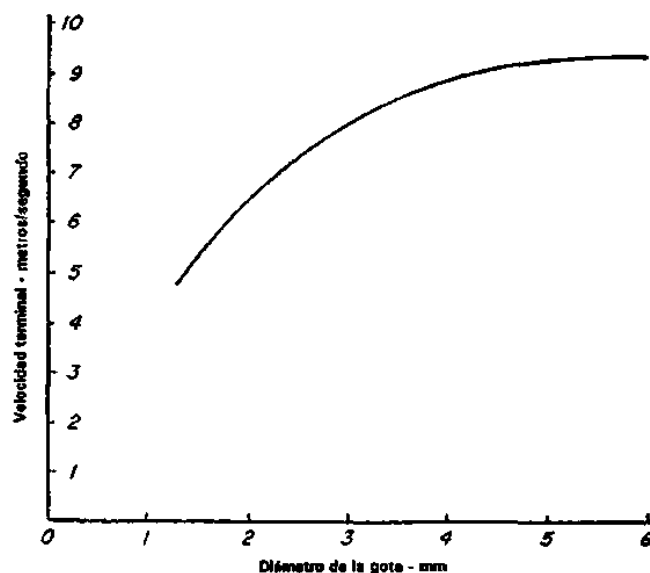


Figura 3 Velocidad terminal de las gotas de lluvia (Laws 1941)

Como dato adicional es posible obtener la energía cinética de la lluvia por metro cuadrado de la figura 3.2 Energía vs Intensidad (Hudson, 1981). Para este caso es de 28 J/m<sup>2</sup>/mm.

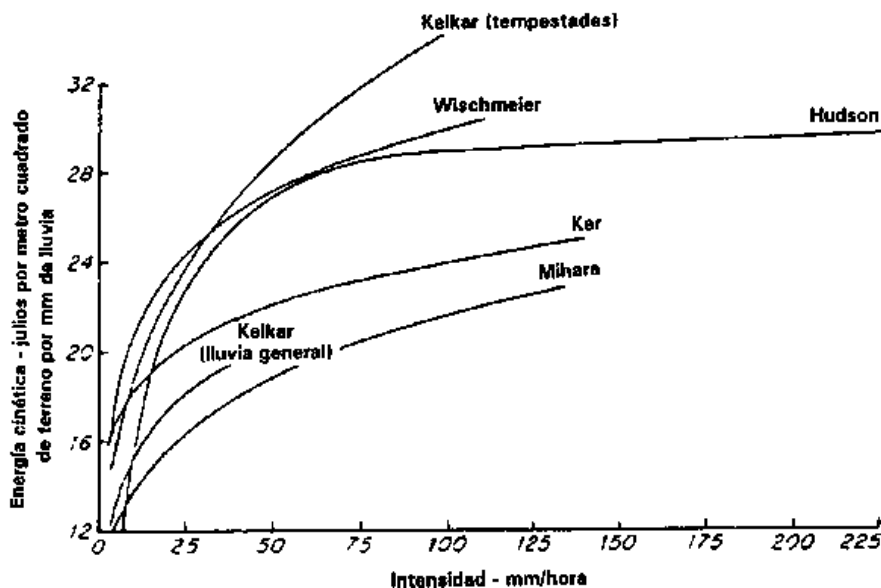


Figura 3.2 Relación entre la energía cinética de la lluvia y la intensidad. Cada curva se extiende hasta la intensidad máxima registrada (de Hudson 1981)

### 3.3.2- Altura de desarrollo de la velocidad limite.

Para poder estimar la altura en que la gota alcanza a desarrollar una velocidad terminal, es necesario tener en cuenta que la aceleración de ésta se ve afectada por la gravedad y la resistencia aerodinámica, la que a su vez depende de la velocidad a la que se encuentra desplazándose. Debido a que el análisis es complejo, se utiliza una aproximación de esta variación de aceleración llevándola a la linealidad, asumiendo que la aceleración decrece de manera constante a lo largo del recorrido. Es preciso mencionar que este análisis es válido solo en el tramo de tiempo en que la gota llega a una velocidad terminal (o que la aceleración llega a cero) por lo que el dominio es  $0 \leq t \leq t_{\text{term}}$ , donde  $t_{\text{term}}$  es el tiempo terminal (o de desarrollo de la velocidad terminal).

Así pues, se expresa esto como la ecuación (2).

$$\frac{da}{dt} = -K ; 0 \leq t \leq t_{\text{term}} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

K: Constante de decrecimiento de la aceleración.

$t_{\text{term}}$ : Tiempo terminal.

Ello da como resultado mediante integración y asumiendo una aceleración inicial de  $g=9.8\text{m/s}^2$  la ecuación (3).

$$R(t) = \frac{-Kt^3}{6} + 4.9t^2 - tV_0 + R_0 \quad \text{Ec. (3)}$$

Trabajando con los supuestos de que  $K= 9,8 \text{ m/s}^3$ , el tiempo terminal es de 1 s,  $R_0=0 \text{ m}$  y  $V_0=0\text{m/s}$ .

Esto da como resultado  $R= 3,2 \text{ m}$  como altura, en el caso de que la velocidad de salida de los aspersores sea nula. Esto será un factor de seguridad para el diseño, pues se sabe que el prototipo al ser de tipo presurizado posee velocidades de salida superiores y que pueden ser reguladas para ser próximas a la terminal.

### 3.3.3- Velocidad de salida del aspersor.

Para una correcta operación en el prototipo y asegurar que las gotas de agua alcancen a desarrollar una velocidad límite, es necesario controlar la velocidad de salida de agua en el sistema. Así, en virtud de la confiabilidad del diseño la velocidad de salida debe ser lo más cercana posible a 7 m/s, para que así la distancia de desarrollo de ésta sea la mínima posible. Para este análisis es necesario conocer las variables de entrada a la red de agua, así como de salida.

El método más sencillo para este análisis es el enfoque energético, utilizando la teoría de conservación de energía en fluidos dentro de una línea de flujo propuesta por Bernoulli (Shames, 1997), como se observa en la ecuación (4).

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = Cte \quad Ec(4)$$

Asumiendo esto, es necesario conocer la velocidad, presión y cota en dos puntos del sistema. Para las presiones, mediante la normativa se sabe que la presión mínima entregada por la red de agua potable urbana es de 15 mca, y la variación mínima es de 5 mca (NCh 283 Of.68). Eso da como resultado una presión mínima del sistema de 10 mca. Esquematisando el problema se puede resumir gráficamente en la Figura 4.

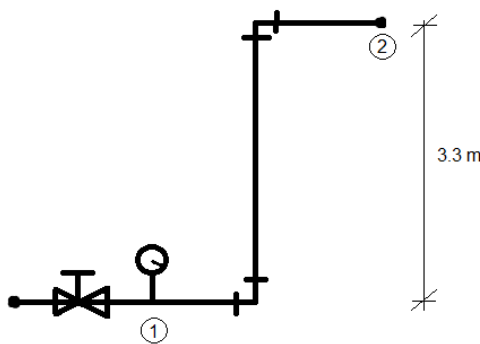


Figura 4 Esquema Red Agua (elaboración propia)

Si se hace equilibrio de energías entre los puntos (1) y (2) se tiene la relación entre ambos extremos del sistema, como puede observarse en la ecuación (5).

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \quad Ec. (5)$$

Donde,  $V_1 = 0$  m/s,  $P_1 = 10$  mca,  $Z_1 = 0$  m,  $P_2 = 0$  mca y  $Z_2 = 3,3$  m. Esto arroja una velocidad de salida del aspersor de  $V_2 = 11,5$  m/s, lo cual es superior a la velocidad límite, aun tomando en cuenta que la presión inicial es la menor posible por normativa. Ello hace que teóricamente esta velocidad de salida sea aún mayor.

De la ecuación (5) también se puede obtener la presión óptima de entrada al sistema para que los aspersores logren una velocidad de 7 m/s. Utilizando  $P_1$  como incógnita y  $V_2 = 7$  m/s, lo que arroja una presión  $P_1 = 5,8$  mca como resultado. Por lo que para que el diseño sea consistente con la erosividad de una lluvia natural, se debe asegurar lograr dichos valores.

### **3.4- Materialidad**

Una de las características ideales es que la estructura del simulador sea lo suficientemente liviano como para poder transportarlo sin necesidad de desarmar el modelo u ocupar maquinaria. Por esto el material óptimo para trabajar la estructura es la madera. En este caso por la buena disponibilidad se trabajará con pino dimensionado 2"x2".

Por otra parte, la red de agua se confeccionará con PVC hidráulico comercial de 1/2" clase 4 debido a su fácil disposición, buen desempeño y bajo coste.

El perímetro debe ser aislado del viento para evitar cargas laterales en la gota que afecten su trayectoria y más tarde puedan afectar directamente en la uniformidad de la lluvia (De Lima et al., 2003). Por ello la estructura en su perímetro se forrará con polietileno transparente.

Para la elección de aspersores se determinó utilizar aspersores suspendidos de bajo caudal y con válvula integrada. En el comercio se puede encontrar una variedad de aspersores, los cuales serán evaluados, y de aquellos se seleccionará el tipo de aspersor que más se ajuste a los requerimientos, además de poseer bajo costo en relación a otros tipos.

Como dispositivo de control se utilizará un manómetro conectado después de la salida de una válvula giratoria, lo que en conjunto funcionará para monitorear y controlar la presión del sistema.

### 3.5 Diseño de distribución de aspersores

Para poder distribuir los aspersores de manera que aseguren una uniformidad de lluvia primero se debe realizar un ensayo de prueba. Este tendrá como función caracterizar el aporte de precipitación de un aspersor aislado para luego superponer los aportes de unos con otros dentro de la red.

La uniformidad de distribución de agua de los aspersores es evaluada por ensayos en terreno en los que el agua es medida mediante recipientes recolectores. Los procedimientos descritos a continuación se refieren a aspersores estacionarios durante la irrigación (Benami y Ofen, 1993).

En un ensayo de terreno individual de uniformidad de distribución de agua es evaluada una situación para un aspersor, boquilla, presión en cabeza y espaciamiento determinados. En general, los ensayos de terreno se realizan bajo condiciones de poco viento o la ausencia de él.

Estos ensayos son normalmente llevados a cabo con un solo lateral, y un solo aspersor, sobre un área provista con un drenaje amplio. Cuando se usa un solo lateral éste es ubicado de manera que sea capaz de alimentar a un aspersor ubicado en la parte central del terreno a ensayar. Una vez realizado esto se procede a recolectar datos de la distribución de agua en el área provista (Figura 5).

Ya con los datos que aportan los ensayos individuales a distintas presiones, se puede realizar una distribución de aspersores que garanticen una adecuada intensidad de lluvia y uniformidad de ésta. En este caso se procede a la utilización de dos laterales separados  $S_m$  metros entre sí y dos aspersores en cada lateral, espaciados  $S_l$  metros uno de otro, instalados a lo largo de estos. El lateral debe tener un diámetro considerable para evitar las pérdidas de presión en la cabeza (Benami y Ofen, 1993). Los recipientes recolectores, ordenados en una grilla rectangular, se ubican a ambos costados del lateral entre dos aspersores interiores. Los recipientes están generalmente distanciados 2 metros en ambas direcciones unos de otros cuando se ensayan

aspersores rotatorios comunes, y un metro (o menos), para aspersores de bajo caudal-velocidad. En este caso particular, se utilizará una distancia de espaciamiento de 20 cm unos de otros.

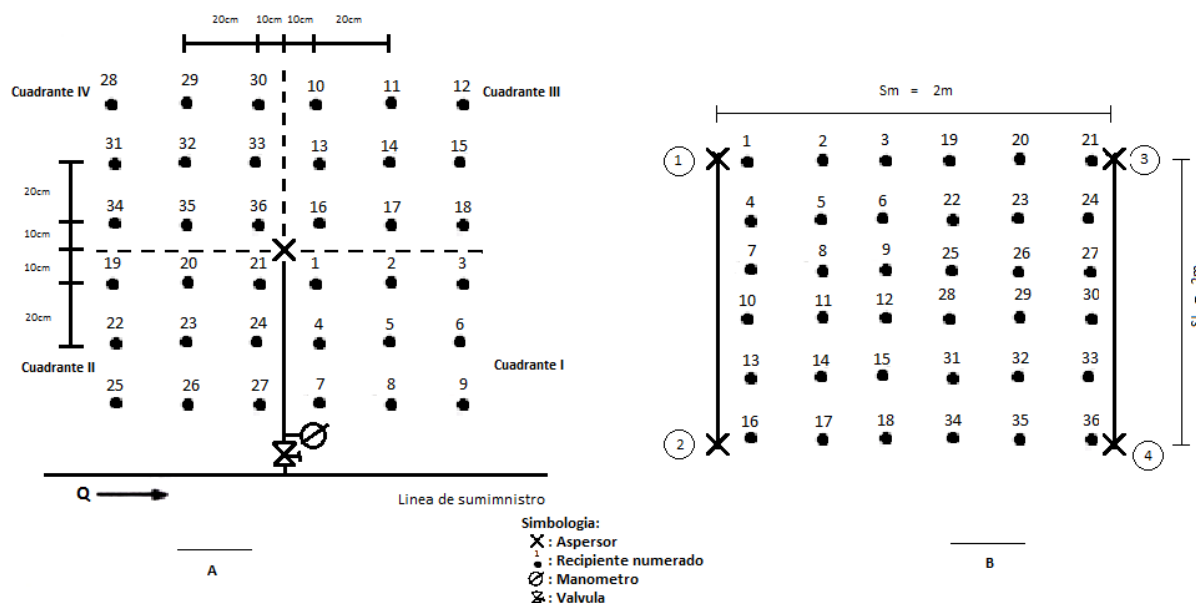


Figura 5 Distribución de sistema de aspersión y recolección. A) Ensayo para un solo aspersor. B) Ensayo con cuatro aspersores. (Elaboración propia).

### 3.6- Método de validación

Una vez construido el prototipo es necesario comprobar que el sistema funciona de acuerdo con lo diseñado. Para esto se realizarán ensayos de terreno, los cuales serán utilizados para corroborar el diseño.

Para evaluar la uniformidad de lluvia caída se utilizará el coeficiente de uniformidad. El más usado durante décadas en ensayos y regadío agrícola, es el coeficiente de uniformidad de Christiansen  $C_u$ , (Christiansen, 1942). El valor  $C_u=100$  significa que la irrigación es completamente uniforme; este valor es inalcanzable en la práctica, pero valores sobre  $C_u=80$  es el aceptable en la mayoría de los casos.

## 4- Implementación del equipo y validación

Con el fin de conservar una uniformidad e intensidad de lluvia, a cada tipo o modelo de aspersor corresponde espaciamientos de laterales distintos. A su vez, dentro de un mismo lateral también es necesario distribuir los aspersores a una distancia óptima para conservar las propiedades de la lluvia de diseño. Para esto es necesario ensayar en terreno los tipos de aspersores y seleccionar aquel que tenga las propiedades óptimas para este prototipo.

### 4.1- Elección del aspersor

Para la realización de los ensayos se ha seleccionado tres aspersores de bajo caudal, los cuales tienen características diferentes tanto en funcionamiento como en su uso. Para esto se ha elegido un aspersor de turbina regular, uno de turbina pop-up y uno de aspersión de impacto. Dentro de los aspersores de cada tipo comercial se tiene el microaspersor de turbina con caudal regulable “Vari-jet 360° C4034”, el aspersor pop-up “Orbit watera emerge 2 360°” y el aspersor de impacto “Netafim 35l/h supernet LRD”. (figura 6).



**Figura 6 Aspersores de prueba para el prototipo**

Una vez ensayados los aspersores de forma independiente mediante tres ensayos controlados por cada tipo de aspersor, se obtuvieron los coeficientes de uniformidad de Christiansen de cada uno de ellos. Además de esto, una estimación teórica del modelo de cuatro aspersores antes mencionados en el capítulo 3.5. Y como puede observarse en la tabla n°1, tanto en



individual como en conjunto el aspersor de turbina con caudal regulable tendría un mejor desempeño en cuanto a la uniformidad de agua caída.

**Tabla 1 Uniformidad de aspersores para elección de uso**

Tipo de aspersor	CU 1	CU 2	CU 3	CU para 4 aspersores
Turbina regulable	85,4	92,4	93,4	93,8
Turbina Pop-up	82,8	85,8	82,3	92,0
Impacto	74,9	73,1	79,7	87,5

Por lo tanto, el aspersor a utilizar para el prototipo será el microaspersor de turbina con caudal regulable, “Vari-jet 360° C4034”, el cual posee un área de salida de 9,9 mm<sup>2</sup>.

## **4.2 Ensayos y estado resultado.**

Realizada ya la decisión del aspersor a utilizar, y planteando el área efectiva sobre la cual se quiere realizar ensayos (2mx2m), es necesario ensayar el prototipo para corroborar el diseño planteado y la representatividad de este mediante ensayos controlados en laboratorio.

### **4.2.1 Verificación de Intensidad de diseño.**

Para lograr los objetivos de diseño es necesario comprobar que la intensidad de lluvia lograda sea la esperada, o en su defecto lo más cercano posible a la obtenida del plan maestro de aguas lluvias. Para esto se utiliza la Ecuación 1 (Benami y Ofen, 1993), la cual relaciona los espaciamientos de laterales y aspersores con la descarga de un aspersor para estimar la intensidad de lluvia final del diseño. Para este caso se tiene como variables de entrada el área de salida del aspersor ( $A=9,9 \text{ mm}^2$ ), la separación de aspersores dentro del lateral ( $S_m=2\text{m}$ ), la separación de los laterales ( $S_l=2\text{m}$ ) y la velocidad de salida del agua en el aspersor ( $V=7\text{m/s}$ ). Introduciendo estas variables a la ecuación se tiene una intensidad de lluvia de 62,4 mm/h, lo cual cumple con las expectativas de diseño.

### **4.2.2 Verificación del tamaño de la gota.**

Ademas de verificar la intensidad de lluvia que poseerá el prototipo, es necesario corroborar el tamaño promedio de las gotas para asegurar una velocidad y energía adecuadas. Para esto se procede a realizar un ensaye de verificación del tamaño, el cual es realizado dejando llover

sobre un recipiente con aceite por un breve periodo de tiempo (Eigel and Moore, 1983). Una vez obtenidas las gotas, por diferencia de densidad estas se mantienen en superficie, lo cual facilita la medición de su volumen. Este volumen es llevado a una esfera obteniendo su diámetro, aproximándose al de la gota en caída.

Con la red de aspersores en posición y realizado el ensayo pudo observarse que el promedio de diámetros es 2,4mm y que el tamaño máximo no supera los 2,8mm. Por ello se puede asegurar que la velocidad límite media de las gotas no supera los 7 m/s y que la energía es representativa de la precipitación a emular.

### **4.2.3 Test de Uniformidad**

Una vez determinado el tipo de aspersor apropiado para el simulador, se realiza una red de aspersión que consiste en un cuadrilátero que posee en cada esquina un aspersor, como se observa en la figura 5.B. Esto último asegura una uniformidad superior que la de un único aspersor y, por lo tanto, disminuye el margen de error en el prototipo. Los ensayos de precipitación se elaboran en un ambiente controlado y aislado de cargas de viento lateral sobre las gotas mediante una manga plástica que cubre el perímetro del simulador.

Una vez realizados 30 ensayos controlados se puede apreciar que la tendencia global de datos excede en todos los casos una uniformidad del 85%, además de una media del 93,1% y una desviación estándar de un 2,15%. Por ello se concluye que el prototipo es estable en uniformidad, como puede apreciarse en la Figura 6.

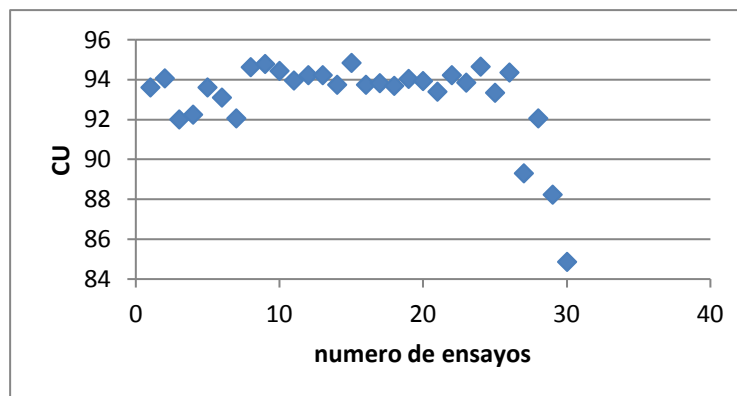


Figura 7, Uniformidad de lluvia vs número de ensayo (elaboración propia).

Como se puede apreciar en el gráfico, los últimos tres datos obtenidos escaparon de la tendencia general. El principal motivo de esto es que, el día en que los datos fueron obtenidos, las ráfagas de viento que se presentaron alcanzaron los 19,8 m/s (Observatorio Geodésico TIGO, 25 febrero del 2014) lo que, a pesar de poseer una barrera de nylon para controlar el viento, generó turbulencias dentro del simulador afectando así la trayectoria de las gotas lo que se vio reflejado en una disminución de la uniformidad de la lluvia producida.

Cabe también destacar que la intensidad de lluvia promedio de los ensayos fue de 63,9 mm/h con una desviación estándar de 2.2 mm/h, lo cual se encuentra dentro de los rangos aceptables para este diseño.

## 5- Dimensiones Finales del prototipo.

Observándose todos los datos obtenidos, y contrastándolos con los de diseño, se puede concluir que el dimensionamiento y la operación del simulador en cuestión son correctos. Con eso, se recapitula el diseño y sus dimensiones en conformidad con lo realizado en terreno.

El área visto desde planta del simulador es de  $4\text{m}^2$  ( $2\text{m} \times 2\text{m}$ ), la altura es de  $3.2\text{m}$  y su forma es rectangular, como se observa en la Figura 8. La estructura es de madera y el sistema de agua es de PVC hidráulico clase 4 con micro-aspersores vari-jet  $360^\circ$  C4034 dispuestos en las esquinas del prototipo; con dos laterales separados  $2\text{m}$  entre sí, y dos aspersores por lateral con una separación de  $2\text{m}$ . Todo esto alimentado por la red de agua potable, controlado por un manómetro y una válvula en la entrada del sistema.

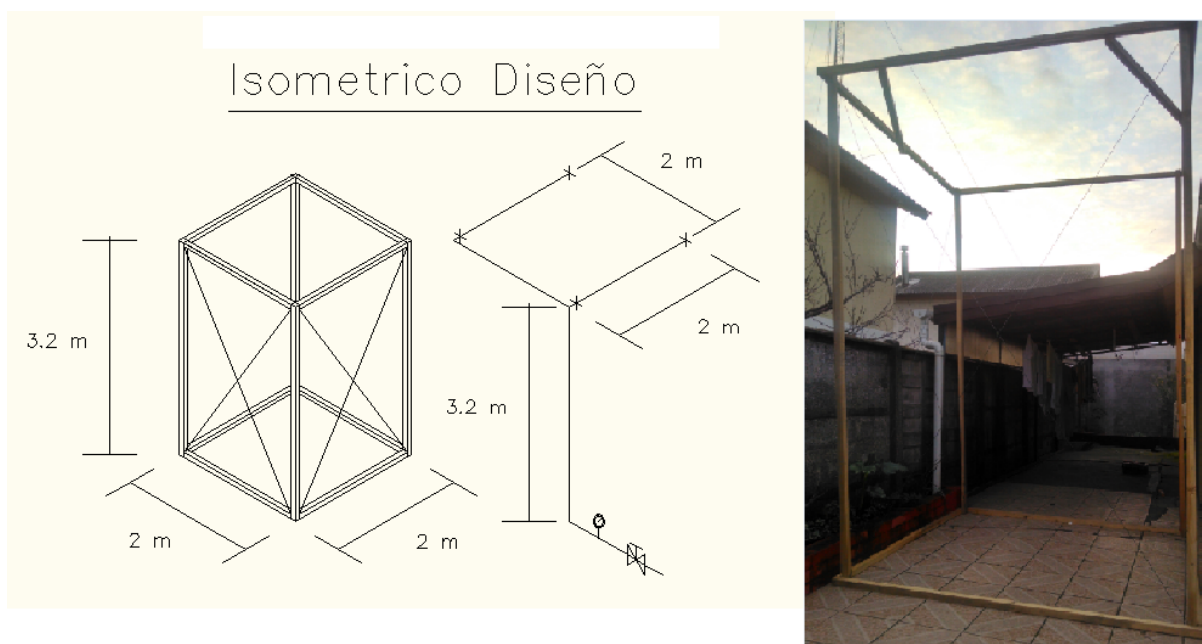


Figura 8. Isométrico Diseño estructura y red de agua. Elaboración propia.

## 6- Conclusiones.

Tras el desarrollo del prototipo simulador de lluvia se satisfacen las variables más relevantes para ensayos erosivos en taludes: intensidad, uniformidad, velocidad de la gota y energía cinética por superficie de precipitación. Con una caída de agua que aporta una energía de 28 J/m<sup>2</sup>/mm, una intensidad de lluvia de 63 mm/h, una velocidad media de caída de gotas de 7m/s y un promedio en tamaño de gotas de 2.38 mm de diámetro, todas estas coincidentes con la precipitación que se presenta en la ciudad de Concepción. Dentro de todas las alternativas de diseño que existen para estos tipos de simulador, fue seleccionada la opción más económica y práctica para el caso. Optando por un simulador presurizado alimentado por la red de agua potable local construido con una estructura de madera. Con un área de ensaye de 4 m<sup>2</sup> de superficie que permite la cabida de probetas de taludes artificiales de distintos tamaños.

La validación del prototipo se llevó a cabo al aire libre en condiciones de viento leve a moderado, con un perímetro aislado mediante mangas de nylon transparente, suficiente para este rango bajo de velocidades de viento pero que no constituye en suficiente protección contra vientos moderados a fuertes por lo que es recomendable que el horizonte de ensayos con este prototipo sea de corto plazo pues ráfagas de viento nocturno o días muy tempestuosos pueden destruir la estructura si la barrera se encuentra instalada. Considerando todo esto, se obtuvo un simulador de bajo costo (\$70.000) y fácil fabricación que emula la lluvia de la ciudad de Concepción de manera satisfactoria dentro del rango estadístico aceptable en los ensayos controlados realizados.

## Referencias

- Armstrong A., Quinton J. N.(2009), Pumped rainfall simulators: the impact of rain pulses on sediment concentration and size., *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 34, Issue 9, pages 1310–1314, July.
- Benami A., Ofen A.. (1993), *Irrigation Engineering, AGRIPRO- Agricultural Projects (AGP).*, Second Edition., Israel.
- Bubbenzer, G.D. and Jones B.A. 1971. Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall. *Trans. of the ASAE*, 14 (4):625-628.
- Christiasen J.E.(1942), "Irrigation by Sprinkling", Bull. 670, Agricultural Experiment Station, University of California, Berkeley.
- De Lima JLMP, Singh VP, De Lima MIP.(2003), *The influence of storm movement on water erosion: storm direction and velocity effects.*, Elsevier- Catena.
- Eigel J.D., and I.D. Moore. 1983. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. *Trans. Of the ASAE*: 1079-1084.
- Elwell H.A. y Makwanya H. 1980. Design and calibration of a rainfall simulator nozzle assembly for laboratory and field studies. *Res. Bulletin 25*, Dept. de Técnica Agrícola y Servicio de Extensión, Zimbabwe.
- Grierson I.T. and Oades J.M. 1977. A rainfall simulator for field studies of run-off and soil erosion. *Agricultural Engineering Res.* 22: 37-44.
- Gunn, R. and Kinzer G.D. 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *J. Meteor.* 6:243-248.
- Hudson N.W. 1981. *Soil Conservation. Chapter 3, The Physics of Rainfall*, 2nd. ed. Batsford, Londres, y Cornell University Press, Ithaca, Nueva York.
- Laws J.O. 1941. Measurements of fall velocity of water drops and raindrops. *Trans. American Geophysical Union* 22:709.

Laws J.O. y Parsons D.A. 1943. The relation of raindrop size to intensity. En: Trans. American Geophysical Union 24:452-450.

Meyer L.D. 1988. Rainfall simulators for soil conservation research. Chapter 4. En: Soil Erosion Research Methods. R. Lal (ed.). Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.

Meyer L.D. and Harmon W.C. 1979. Multiple Intensity Rainfall Simulator for erosion research on row side slopes. Trans. Of the ASAE, 22: 100-103.

Moore I., Hirschi M. and Barfield B. 1983. Kentucky rainfall simulator. Trans. Of the ASAE, 23: 1085-1089.

MOP. 2009. Plan maestro de aguas lluvias de la ciudad de Concepción.

MOP. 1999. Manual de carreteras. Vol. 3 Of.99.

Observatorio Geodésico TIGO, Universidad de Concepción-Chile.

Shames, J.H (1997). "Mecánica de Fluidos". Ed. McGraw Hill.

Thomas N.P. and El Swaify S. 1989. Construction and calibration of a rainfall simulator. Journal of Agricultural Engineering Research, 43: 1-9.

## ANEXOS

### Datos de ensayo por aspersor

Fecha	12-10-2013							
Presión entrada	0,57 bar	8,25 PSI			CU01	85,36		
Altura de caída	3,3 m				CU02	92,36		
Modelo de aspersor	Vari-jet 360 C4034 Microaspersor				CU03	93,41		
	Resultados ensayo en terreno							
Vasija	Ensayo 01	Ensayo 02	Ensayo 03	Media ensayos	Xi-prom	Xi-prom  1	Xi-prom  2	Xi-prom  3
1	53	46	45	48,00	5,77	8,89	3,83	4,58
2	35	39	40	38,00	4,23	9,11	3,17	0,42
3	37	42	40	39,67	2,56	7,11	0,17	0,42
4	35	42	38	38,33	3,90	9,11	0,17	2,42
5	35	40	42	39,00	3,23	9,11	2,17	1,58
6	37	46	42	41,67	0,56	7,11	3,83	1,58
7	53	44	38	45,00	2,77	8,89	1,83	2,42
8	54	44	35	44,33	2,10	9,89	1,83	5,42
9	39	45	38	40,67	1,56	5,11	2,83	2,42
10	50	43	42	45,00	2,77	5,89	0,83	1,58
11	39	41	37	39,00	3,23	5,11	1,17	3,42
12	48	40	45	44,33	2,10	3,89	2,17	4,58
13	39	47	40	42,00	0,23	5,11	4,83	0,42
14	53	42	37	44,00	1,77	8,89	0,17	3,42
15	41	47	43	43,67	1,44	3,11	4,83	2,58
16	42	44	38	41,33	0,90	2,11	1,83	2,42
17	54	43	42	46,33	4,10	9,89	0,83	1,58
18	45	44	43	44,00	1,77	0,89	1,83	2,58
19	41	39	40	40,00	2,23	3,11	3,17	0,42
20	40	41	44	41,67	0,56	4,11	1,17	3,58
21	54	52	43	49,67	7,44	9,89	9,83	2,58
22	52	43	37	44,00	1,77	7,89	0,83	3,42
23	40	44	31	38,33	3,90	4,11	1,83	9,42
24	39	38	40	39,00	3,23	5,11	4,17	0,42
25	58	46	43	49,00	6,77	13,89	3,83	2,58
26	54	39	45	46,00	3,77	9,89	3,17	4,58
27	49	37	36	40,67	1,56	4,89	5,17	4,42
28	41	36	38	38,33	3,90	3,11	6,17	2,42
29	51	40	41	44,00	1,77	6,89	2,17	0,58
30	47	38	45	43,33	1,10	2,89	4,17	4,58
31	35	45	38	39,33	2,90	9,11	2,83	2,42
32	37	44	44	41,67	0,56	7,11	1,83	3,58
33	43	34	44	40,33	1,90	1,11	8,17	3,58
34	36	35	40	37,00	5,23	8,11	7,17	0,42
35	35	50	39	41,33	0,90	9,11	7,83	1,42
36	47	38	42	42,33	0,10	2,89	4,17	1,58
Suma	1588	1518	1455		94,59	232,44	116,00	95,83



Fecha	19-10-2013				CU04	82,79		
Presión entrada	0,57 bar	8,25 PSI			CU05	85,77		
Altura de caída	3,3 m				CU06	82,34		
Modelo de aspersor	Orbit Pop-up watera Emerge 2" 360°							
	Resultados ensayo en terreno							
Vasija	Ensayo 04	Ensayo 05	Ensayo 06	Media ensayos	Xi-prom	Xi-prom 1	Xi-prom 2	Xi-prom 3
1	47	42	47	45,33	2,87	6,89	2,83	4,56
2	37	42	35	38,00	4,46	3,11	2,83	7,44
3	29	59	35	41,00	1,46	11,11	14,17	7,44
4	28	35	54	39,00	3,46	12,11	9,83	11,56
5	43	37	43	41,00	1,46	2,89	7,83	0,56
6	43	47	48	46,00	3,54	2,89	2,17	5,56
7	54	49	43	48,67	6,20	13,89	4,17	0,56
8	32	54	35	40,33	2,13	8,11	9,17	7,44
9	43	45	42	43,33	0,87	2,89	0,17	0,44
10	37	46	39	40,67	1,80	3,11	1,17	3,44
11	32	34	34	33,33	9,13	8,11	10,83	8,44
12	36	59	34	43,00	0,54	4,11	14,17	8,44
13	47	37	47	43,67	1,20	6,89	7,83	4,56
14	49	53	38	46,67	4,20	8,89	8,17	4,44
15	50	34	33	39,00	3,46	9,89	10,83	9,44
16	40	38	44	40,67	1,80	0,11	6,83	1,56
17	50	37	38	41,67	0,80	9,89	7,83	4,44
18	32	38	56	42,00	0,46	8,11	6,83	13,56
19	35	45	52	44,00	1,54	5,11	0,17	9,56
20	33	42	39	38,00	4,46	7,11	2,83	3,44
21	54	43	55	50,67	8,20	13,89	1,83	12,56
22	45	45	38	42,67	0,20	4,89	0,17	4,44
23	36	43	56	45,00	2,54	4,11	1,83	13,56
24	34	53	52	46,33	3,87	6,11	8,17	9,56
25	39	46	35	40,00	2,46	1,11	1,17	7,44
26	37	42	55	44,67	2,20	3,11	2,83	12,56
27	47	60	37	48,00	5,54	6,89	15,17	5,44
28	38	33	41	37,33	5,13	2,11	11,83	1,44
29	31	46	56	44,33	1,87	9,11	1,17	13,56
30	52	41	31	41,33	1,13	11,89	3,83	11,44
31	26	58	31	38,33	4,13	14,11	13,17	11,44
32	54	36	60	50,00	7,54	13,89	8,83	17,56
33	47	60	34	47,00	4,54	6,89	15,17	8,44
34	35	40	33	36,00	6,46	5,11	4,83	9,44
35	41	52	46	46,33	3,87	0,89	7,17	3,56
36	31	43	32	35,33	7,13	9,11	1,83	10,44
Suma	1444	1614	1528	Suma	122,67	248,44	229,67	269,78

Fecha	26-10-2013								
Presión entrada	0,57 bar	8,25 PSI			CU07		74,89		
Altura de caída	3,3 m				CU08		73,14		
Modelo de aspersor	Netafim 35 l/h Supernet LRD				CU09		79,65		
	Resultados ensayo en terreno								
Vasija	Ensayo 07	Ensayo 08	Ensayo 09	Media ensayos	Xi-prom	Xi-prom 1	Xi-prom 2	Xi-prom 3	
1	53	27	31	37,00	4,58	9,89	12,19	11,44	
2	58	29	56	47,67	6,08	14,89	10,19	13,56	
3	43	48	48	46,33	4,75	0,11	8,81	5,56	
4	59	22	54	45,00	3,42	15,89	17,19	11,56	
5	53	35	35	41,00	0,58	9,89	4,19	7,44	
6	41	55	55	50,33	8,75	2,11	15,81	12,56	
7	49	43	35	42,33	0,75	5,89	3,81	7,44	
8	58	60	37	51,67	10,08	14,89	20,81	5,44	
9	47	29	57	44,33	2,75	3,89	10,19	14,56	
10	50	23	39	37,33	4,25	6,89	16,19	3,44	
11	57	32	36	41,67	0,08	13,89	7,19	6,44	
12	56	49	57	54,00	12,42	12,89	9,81	14,56	
13	45	21	54	40,00	1,58	1,89	18,19	11,56	
14	60	22	58	46,67	5,08	16,89	17,19	15,56	
15	51	47	26	41,33	0,25	7,89	7,81	16,44	
16	32	52	52	45,33	3,75	11,11	12,81	9,56	
17	21	37	37	31,67	9,92	22,11	2,19	5,44	
18	46	23	46	38,33	3,25	2,89	16,19	3,56	
19	26	44	41	37,00	4,58	17,11	4,81	1,44	
20	37	33	24	31,33	10,25	6,11	6,19	18,44	
21	35	28	52	38,33	3,25	8,11	11,19	9,56	
22	56	54	46	52,00	10,42	12,89	14,81	3,56	
23	22	47	48	39,00	2,58	21,11	7,81	5,56	
24	30	36	36	34,00	7,58	13,11	3,19	6,44	
25	24	41	48	37,67	3,92	19,11	1,81	5,56	
26	41	56	55	50,67	9,08	2,11	16,81	12,56	
27	24	56	47	42,33	0,75	19,11	16,81	4,56	
28	27	30	38	31,67	9,92	16,11	9,19	4,44	
29	31	31	34	32,00	9,58	12,11	8,19	8,44	
30	28	34	36	32,67	8,92	15,11	5,19	6,44	
31	56	40	39	45,00	3,42	12,89	0,81	3,44	
32	53	54	25	44,00	2,42	9,89	14,81	17,44	
33	59	47	35	47,00	5,42	15,89	7,81	7,44	
34	38	42	37	39,00	2,58	5,11	2,81	5,44	
35	48	60	30	46,00	4,42	4,89	20,81	12,44	
36	38	24	44	35,33	6,25	5,11	15,19	1,56	
Suma	1552	1411	1528	Suma	187,67	389,78	379,00	310,89	

### Datos de ensayo en terreno para 4 aspersores

Radio Vacija	3,5 cm		Prom	63,9					
Area Vacija	38,4846 cm2		devesta	2,20332972					
Tiempo	10 min								
Vasija	Ensayo 01	Ensayo 02	Ensayo 03	Ensayo 04	Ensayo 05	Ensayo 06	Ensayo 07	Ensayo 08	Ensayo 09
1	67,0	65,5	59,2	68,6	63,9	67,0	65,5	56,1	68,6
2	70,2	62,4	57,7	57,7	67,0	67,0	54,6	56,1	67,0
3	60,8	63,9	59,2	67,0	59,2	54,6	62,4	60,8	63,9
4	68,6	65,5	59,2	57,7	65,5	56,1	68,6	65,5	60,8
5	57,7	59,2	53,0	70,2	71,7	65,5	56,1	63,9	59,2
6	62,4	62,4	62,4	60,8	56,1	63,9	60,8	59,2	70,2
7	62,4	65,5	68,6	60,8	63,9	65,5	67,0	60,8	62,4
8	70,2	54,6	67,0	56,1	70,2	60,8	56,1	60,8	60,8
9	68,6	67,0	65,5	68,6	63,9	62,4	70,2	60,8	60,8
10	56,1	60,8	67,0	62,4	59,2	62,4	67,0	63,9	65,5
11	59,2	68,6	63,9	56,1	59,2	68,6	59,2	59,2	57,7
12	57,7	56,1	54,6	59,2	62,4	56,1	56,1	68,6	68,6
13	59,2	54,6	54,6	71,7	60,8	54,6	60,8	62,4	67,0
14	65,5	57,7	70,2	60,8	63,9	56,1	65,5	65,5	62,4
15	59,2	65,5	53,0	67,0	56,1	56,1	53,0	54,6	57,7
16	60,8	57,7	53,0	56,1	68,6	56,1	67,0	54,6	67,0
17	62,4	62,4	57,7	67,0	56,1	62,4	53,0	60,8	60,8
18	56,1	59,2	53,0	62,4	68,6	65,5	63,9	65,5	57,7
19	65,5	60,8	60,8	65,5	59,2	53,0	54,6	57,7	68,6
20	60,8	63,9	68,6	65,5	54,6	57,7	60,8	63,9	63,9
21	68,6	62,4	65,5	60,8	63,9	54,6	60,8	54,6	57,7
22	62,4	65,5	57,7	71,7	70,2	67,0	51,4	63,9	57,7
23	70,2	65,5	59,2	67,0	60,8	56,1	65,5	62,4	67,0
24	68,6	67,0	68,6	68,6	59,2	67,0	54,6	63,9	65,5
25	60,8	63,9	56,1	67,0	62,4	63,9	68,6	62,4	63,9
26	70,2	67,0	56,1	60,8	67,0	63,9	57,7	67,0	62,4
27	67,0	59,2	59,2	65,5	67,0	54,6	62,4	63,9	63,9
28	57,7	68,6	70,2	63,9	57,7	59,2	54,6	60,8	59,2
29	62,4	56,1	59,2	98,2	59,2	62,4	70,2	67,0	60,8
30	57,7	54,6	68,6	68,6	68,6	65,5	68,6	65,5	65,5
31	63,9	62,4	59,2	67,0	57,7	70,2	65,5	67,0	65,5
32	57,7	67,0	57,7	74,8	63,9	59,2	63,9	67,0	62,4
33	54,6	59,2	70,2	74,8	57,7	54,6	57,7	63,9	62,4
34	68,6	63,9	59,2	67,0	59,2	62,4	68,6	59,2	59,2
35	60,8	53,0	59,2	73,3	70,2	60,8	67,0	56,1	70,2
36	62,4	59,2	68,6	70,2	62,4	60,8	59,2	67,0	57,7

Ensayo 10	Ensayo 11	Ensayo 12	Ensayo 13	Ensayo 14	Ensayo 15	Ensayo 16	Ensayo 17	Ensayo 18	Ensayo 19
62,4	67,0	70,2	63,9	57,7	62,4	65,5	68,6	74,8	63,9
68,6	63,9	65,5	65,5	70,2	56,1	65,5	59,2	59,2	65,5
62,4	67,0	62,4	68,6	70,2	60,8	70,2	70,2	65,5	71,7
62,4	63,9	63,9	67,0	63,9	62,4	68,6	60,8	60,8	73,3
70,2	67,0	67,0	68,6	71,7	71,7	63,9	67,0	73,3	63,9
65,5	59,2	65,5	74,8	68,6	68,6	74,8	63,9	63,9	62,4
59,2	62,4	70,2	67,0	70,2	67,0	67,0	71,7	67,0	70,2
65,5	60,8	68,6	63,9	62,4	67,0	57,7	59,2	57,7	68,6
60,8	65,5	60,8	60,8	68,6	63,9	70,2	67,0	67,0	68,6
71,7	56,1	62,4	73,3	73,3	68,6	68,6	68,6	65,5	59,2
70,2	59,2	60,8	62,4	71,7	60,8	76,4	71,7	67,0	73,3
67,0	57,7	70,2	63,9	63,9	67,0	60,8	62,4	65,5	63,9
70,2	59,2	68,6	71,7	71,7	60,8	54,6	63,9	60,8	73,3
68,6	67,0	60,8	65,5	62,4	71,7	59,2	60,8	62,4	60,8
68,6	63,9	68,6	74,8	62,4	62,4	65,5	57,7	63,9	67,0
67,0	57,7	70,2	67,0	65,5	60,8	68,6	63,9	62,4	62,4
62,4	60,8	67,0	73,3	71,7	68,6	70,2	56,1	70,2	63,9
71,7	62,4	59,2	73,3	68,6	62,4	57,7	68,6	57,7	65,5
57,7	67,0	67,0	68,6	65,5	68,6	67,0	62,4	59,2	56,1
59,2	70,2	63,9	68,6	73,3	68,6	60,8	62,4	65,5	70,2
62,4	59,2	60,8	70,2	62,4	68,6	73,3	70,2	59,2	67,0
59,2	56,1	60,8	65,5	70,2	65,5	65,5	67,0	56,1	68,6
62,4	57,7	67,0	70,2	67,0	62,4	71,7	65,5	60,8	57,7
59,2	57,7	59,2	60,8	73,3	56,1	68,6	63,9	57,7	57,7
67,0	56,1	59,2	60,8	63,9	60,8	65,5	71,7	65,5	67,0
68,6	67,0	56,1	65,5	73,3	70,2	62,4	67,0	59,2	65,5
65,5	59,2	60,8	74,8	62,4	65,5	59,2	62,4	65,5	57,7
63,9	65,5	59,2	73,3	73,3	63,9	60,8	60,8	71,7	63,9
67,0	68,6	59,2	60,8	67,0	65,5	65,5	71,7	65,5	65,5
59,2	63,9	57,7	74,8	62,4	60,8	63,9	60,8	70,2	67,0
62,4	68,6	65,5	70,2	60,8	67,0	65,5	71,7	62,4	62,4
60,8	70,2	60,8	60,8	67,0	65,5	70,2	65,5	68,6	62,4
70,2	67,0	56,1	68,6	74,8	70,2	74,8	62,4	70,2	57,7
67,0	67,0	63,9	71,7	74,8	67,0	67,0	74,8	63,9	63,9
62,4	67,0	62,4	71,7	56,1	62,4	59,2	60,8	57,7	59,2
62,4	63,9	59,2	74,8	70,2	67,0	63,9	60,8	56,1	59,2

Ensayo 20	Ensayo 21	Ensayo 22	Ensayo 23	Ensayo 24	Ensayo 25	Ensayo 26	Ensayo 27	Ensayo 28	Ensayo 29	Ensayo 30
56,1	57,7	65,5	63,9	57,7	56,1	63,9	70,2	53,0	56,1	49,9
70,2	67,0	63,9	60,8	59,2	63,9	60,8	51,4	59,2	48,3	54,6
68,6	57,7	71,7	71,7	56,1	56,1	68,6	78,0	57,7	49,9	48,3
67,0	60,8	65,5	71,7	67,0	57,7	56,1	63,9	56,1	74,8	73,3
59,2	60,8	71,7	57,7	65,5	71,7	60,8	70,2	57,7	74,8	54,6
67,0	60,8	57,7	63,9	62,4	68,6	56,1	79,5	65,5	76,4	63,9
63,9	59,2	65,5	59,2	57,7	65,5	59,2	51,4	51,4	62,4	49,9
59,2	56,1	56,1	63,9	59,2	63,9	63,9	70,2	62,4	56,1	59,2
70,2	65,5	70,2	70,2	57,7	56,1	60,8	74,8	60,8	65,5	71,7
56,1	56,1	71,7	62,4	68,6	65,5	60,8	67,0	71,7	60,8	70,2
59,2	70,2	62,4	59,2	62,4	57,7	56,1	82,6	56,1	76,4	68,6
67,0	56,1	67,0	63,9	67,0	60,8	57,7	78,0	60,8	65,5	70,2
59,2	62,4	74,8	65,5	57,7	59,2	62,4	48,3	54,6	65,5	53,0
68,6	65,5	65,5	70,2	65,5	62,4	56,1	65,5	60,8	73,3	53,0
62,4	60,8	62,4	70,2	59,2	63,9	60,8	78,0	65,5	81,1	62,4
62,4	60,8	63,9	56,1	62,4	74,8	57,7	85,7	68,6	63,9	49,9
62,4	57,7	56,1	56,1	59,2	62,4	63,9	78,0	62,4	74,8	78,0
57,7	68,6	65,5	62,4	67,0	73,3	65,5	79,5	67,0	68,6	73,3
63,9	67,0	65,5	62,4	57,7	62,4	56,1	59,2	57,7	65,5	79,5
70,2	70,2	62,4	63,9	60,8	62,4	60,8	73,3	56,1	78,0	71,7
59,2	68,6	60,8	59,2	65,5	63,9	73,3	68,6	59,2	70,2	79,5
63,9	65,5	60,8	56,1	60,8	63,9	60,8	76,4	62,4	62,4	84,2
57,7	65,5	62,4	56,1	63,9	62,4	70,2	84,2	63,9	68,6	74,8
60,8	59,2	65,5	62,4	62,4	71,7	57,7	78,0	70,2	49,9	60,8
63,9	67,0	57,7	60,8	68,6	68,6	62,4	68,6	56,1	48,3	73,3
70,2	70,2	67,0	57,7	56,1	56,1	67,0	60,8	71,7	76,4	53,0
62,4	65,5	63,9	63,9	57,7	56,1	62,4	67,0	59,2	48,3	82,6
56,1	57,7	60,8	56,1	60,8	63,9	68,6	70,2	57,7	63,9	78,0
68,6	70,2	71,7	62,4	56,1	63,9	63,9	79,5	70,2	68,6	82,6
63,9	60,8	70,2	65,5	60,8	57,7	62,4	73,3	63,9	60,8	60,8
67,0	65,5	62,4	56,1	65,5	70,2	67,0	73,3	73,3	51,4	71,7
62,4	60,8	56,1	57,7	56,1	60,8	59,2	59,2	71,7	57,7	53,0
63,9	56,1	70,2	62,4	59,2	56,1	68,6	56,1	62,4	67,0	59,2
68,6	62,4	67,0	57,7	59,2	67,0	60,8	62,4	68,6	56,1	81,1
67,0	67,0	63,9	56,1	57,7	67,0	63,9	65,5	68,6	67,0	74,8
56,1	68,6	63,9	65,5	57,7	57,7	57,7	68,6	67,0	60,8	76,4