

**Universidad Del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires**

**“Análisis y rediseño de sistema de riego para plantación de nueces de pecán”**

Ingeniería Mecánica

“Práctica Profesional Supervisada”

Estudiante: Agustín Simone

Tutor docente: Ing. Tomás Guerriero

Empresa: TURBEN S.A

Fecha de presentación:

## INDICE

1. Introducción.....	3
2. Objetivos.....	5
2.1 Objetivo general.....	5
2.2 Objetivos específicos .....	5
3. Justificación .....	6
4. Plan de trabajo y carga horaria .....	7
5. Descripción de la Práctica Profesional Supervisada .....	8
5.1 Metodología de trabajo .....	8
5.2 Requerimientos hídricos de las plantas de pecan .....	9
5.3 Componentes del sistema de riego .....	10
5.4 Demanda hídrica de la plantación y tiempo de riego .....	15
5.5 Marco Teórico .....	19
Sistema solar para alimentación de bomba.....	37
Conclusión del proyecto .....	39
Agradecimientos .....	48
Bibliografía.....	49

## 1. Introducción

TURBEN S.A. es una sociedad que tiene una de sus actividades vinculadas a la producción agrícola tradicional. Hace dos años comenzó a proyectarse una alternativa productiva basada en el cultivo de nuez pecán, evaluando no solo su viabilidad económica, sino también el impacto positivo que genera al impulsarla.

El proyecto se encuentra en su primer año y medio de implementación. La plantación fue establecida en la localidad de Chivilcoy, Provincia de Buenos Aires, con un total de 750 pecanes plantados en 2024 sumando 750 más en 2025 y 1500 a plantar en 2026, dispuestos en un sistema de plantación conocido como “tresbolillos”. Este sistema agrupa aproximadamente 110 plantas por hectárea alcanzando así una superficie implantada de aproximadamente 27 hectáreas. La decisión de utilizar este método de plantación fue únicamente por estética ya que formaba calles diagonales y visualmente resultaba agradable.

El pecán es el fruto proveniente de un árbol del mismo nombre, originario de la cuenca de los ríos Mississippi-Missouri en la zona centro-sur de los Estados Unidos, que fue ampliamente utilizado por los habitantes originarios de esa región. El árbol no puede superar la altura de 10 metros para ser productivo y hay registros de árboles de 45 años con vida productiva. Comienza a dar fruto a partir del quinto año de vida y entre los 15 y 25 años alcanza su máximo rendimiento, produciendo potencialmente de 30 a 50 kilos de nueces por cosecha entre *abril y julio*.

Para que las plantas comiencen su etapa productiva a partir del quinto año y, con el transcurso del tiempo, alcancen los niveles de rendimiento esperados, es necesario considerar diversos factores de manejo. Entre ellos se destacan las podas de formación, el control fitosanitario y la fertilización; sin embargo, el riego constituye el *factor determinante* para asegurar un desarrollo óptimo del cultivo.

El trabajo realizado tuvo como finalidad el análisis de un sistema de riego para la plantación de nuez pecán, considerando dicho recurso como el factor determinante en el crecimiento y la productividad del cultivo. Como parte de estas acciones, se evaluaron las condiciones de implantación y las necesidades hídricas de la plantación. De esta manera, el estudio del riego se estableció como el eje central de la mejora productiva, contribuyendo directamente al rendimiento futuro y a la consolidación de la viabilidad económica del emprendimiento.



Ilustración 1. Día uno del proyecto: pozos y colocación de plantas. Fuente: Propia

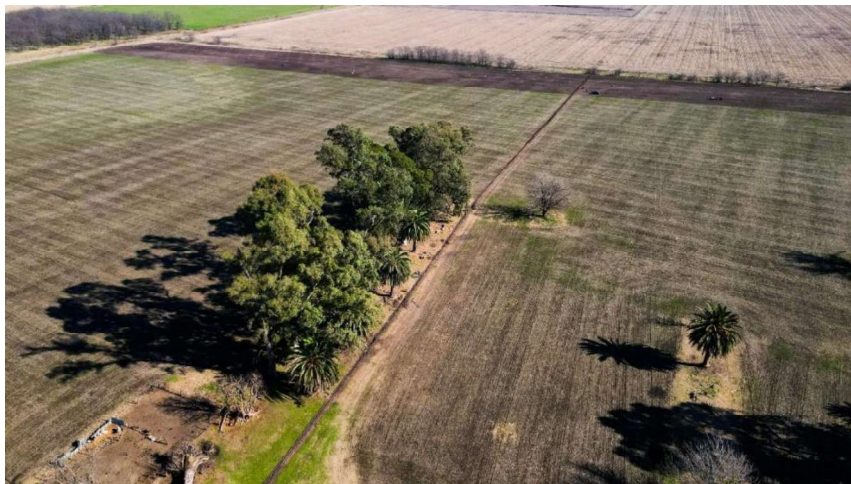


Ilustración 2. Día uno del proyecto: pozos y colocación de plantas. Fuente: Propia

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Justificar técnicamente el sistema de riego por goteo implementado en la plantación de nuez pecán, verificando el desempeño hidráulico de la red instalada y en caso de ser necesario seleccionar la bomba adecuada para satisfacer las demandas presentes y futuras del cultivo.

### 2.2 Objetivos específicos

- Relevar y caracterizar el área de riego mediante mediciones directas en la plantación de nuez pecán.
- Verificar la disposición general del sistema de conducción, definiendo el trazado del ramal principal y los ramales secundarios según la configuración de la plantación.
- Verificar la elección de las tuberías y accesorios previamente adquiridos, evaluando pérdidas de carga, caudales requeridos y condiciones operativas del sistema.
- Verificar si la bomba previamente instalada cumple con los parámetros necesarios. Caso contrario: dimensionar y seleccionar la bomba hidráulica adecuada en función de la demanda hídrica del cultivo y de las condiciones hidráulicas del sistema de conducción.
- Uniformizar el caudal de riego en cada sector a fin de no causar stress hídrico en sectores y déficit hídrico en otros.
- Consultar y determinar viabilidad económica actual para adquirir un sistema de alimentación solar para el funcionamiento de la bomba trifásica instalada.

### 3. Justificación

En conjunto con la firma Turben S.A., se decidió aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la formación universitaria para asumir la responsabilidad del funcionamiento eficiente del sistema de riego, contando con el apoyo de la empresa ARECO RIEGO, que proporcionó los materiales y la mano de obra para la instalación.

La firma Turben S.A. ya había adquirido, antes del inicio de la práctica, las tuberías para el tendido de las líneas de riego por goteo, la bomba sumergible, los emisores y las conexiones necesarias tanto para la primera etapa de plantación realizada en 2024 como para la correspondiente a 2025.

El sistema de riego se puso en funcionamiento en 2024 junto con la primera tanda de plantación. Posteriormente, en julio de 2025, cuando se incorporaron 750 pecanes adicionales, se completó la instalación de las tuberías restantes para asegurar el abastecimiento hídrico de las nuevas plantas.

Al momento de poner en marcha el riego para las 1500 plantas, **se constató que la distribución de agua no era uniforme.**

El informe se centró en estudiar la situación actual y partiendo de esto proponer una solución. Se realizó un cálculo preciso con el objetivo de ajustar la infraestructura hidráulica a las necesidades reales de las plantas, evitando sobredimensionamientos que incrementaran innecesariamente los costos de instalación y operación, así como deficiencias que pudieran afectar el desarrollo y rendimiento del cultivo.

Cabe destacar que los diámetros de las tuberías utilizadas y la bomba instalada desde el inicio del proyecto fueron recomendados por la empresa Areco Riego, ellos sostuvieron desde un primer momento que el equipo instalado iba a cumplir con las necesidades hídricas futuras. Las dimensiones seleccionadas

corresponden a medidas estandarizadas que la empresa comercializa habitualmente, lo que permite obtener mejores condiciones de compra y disponibilidad inmediata.

#### 4. Plan de trabajo y carga horaria

*Diagrama de Gantt: Cronograma de actividades*

N°	ACTIVIDADES	TIEMPO DE DURACIÓN				
		SEMANAS				
		1	2	3	4	5
1	Reunión con el tutor de la empresa	■				
2	Relevaciones de datos a campo	■				
3	Reunión con docente tutor		■			■
4	Análisis de la situación actual		■	■		
5	Memoria de calculo			■	■	■
6	Verificación del desempeño operativo del sistema.					■
7	Redaccion del informe		■	■	■	■

La práctica se inició el día lunes 25 de agosto de 2025. Al tratarse de un proyecto de carácter personal y familiar, y considerando que el alumno participaba además en otras actividades vinculadas al mismo, se estableció una dedicación promedio de entre 7 y 8 horas diarias. Dicho tiempo se distribuyó entre las visitas al campo para el relevamiento de datos y la elaboración progresiva del informe.

*Nota:* Cabe destacar que la carga horaria no se mantuvo constante, ya que fue variando en función del tipo de actividades realizadas. Asimismo, se vieron afectadas algunas jornadas debido a tareas ajenas a la práctica y a condiciones climáticas adversas, las cuales dificultaron el acceso al campo por el estado de los caminos rurales.

## 5. Descripción de la Práctica Profesional Supervisada

### 5.1 Metodología de trabajo

Para la recolección de información se procedió a realizar visitas diarias a la plantación, aprovechando la ejecución de otras tareas complementarias vinculadas al proyecto. Para ser más exactos, teniendo en cuenta el método seleccionado para la disposición de las plantas (tresbolillo) se procedió a medir longitudes con un odómetro y se corroboró que las medidas coincidieran con lo planificado.

Cabe destacar que, antes de la implantación del cultivo, se había realizado una perforación para la extracción de agua futura, con una profundidad total de 40 metros, encamisada hasta los 30 metros, y con una bomba instalada a 18 metros de profundidad, que luego se remplazaría, ubicada en el centro de la plantación. Por simetría de la plantación y del campo, se aceptó la disposición de la misma favoreciendo al diseño del tendido de riego que se llevaría a cabo en 2024.

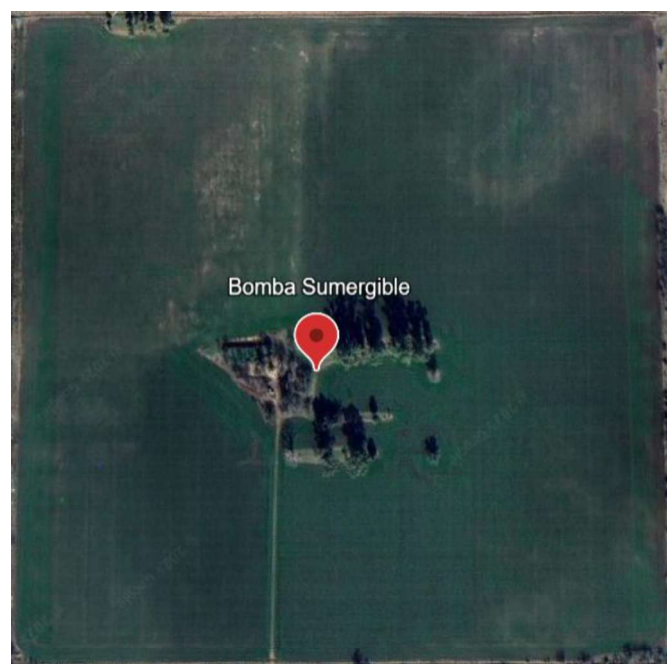


Ilustración 3. Ubicación de la perforación. Fuente: Propia

## 5.2 Requerimientos hídricos de las plantas de pecan

Según la información recopilada en diversas jornadas técnicas y convenciones organizadas por las cámaras reguladoras del cultivo de pecán en Argentina (Clúster del Pecán y CAPPECAN), así como a partir de la experiencia de productores de la región, las recomendaciones del vivero proveedor de las plantas y lo determinado por la consultora contratada dirigida por el Ing. Martin Basso quien realiza las auditorias en la plantación, se determinó que la misma requerirá, como máximo a lo largo de su ciclo productivo, una lámina de riego diaria de 1,7 mm/día.

La película de riego, también denominada lámina de riego, es una forma de expresar la cantidad de agua aplicada sobre una superficie determinada. Leer un valor de 1 mm/día de lámina de riego equivale a aplicar 1 litro de agua por metro cuadrado. La verificación de este dato se realiza mediante ensayos efectuados lo más cerca posible de la zona radicular de los árboles. Para ello, se selecciona una cantidad determinada de ejemplares de manera estratégica, sobre los cuales se efectúa un muestreo y posteriormente se promedian los valores obtenidos.

Anteriormente se mencionó que la película de riego máxima establecida debía medirse lo más cerca posible de la zona radicular de la planta. Dicha zona radicular se encuentra en un área que corresponde a la proyección del diámetro de la copa del árbol sobre el suelo. El control del diámetro de copa será una tarea a realizar en el futuro, estableciéndose un valor máximo de 8 metros. Al proyectar este diámetro sobre el terreno, se obtiene el área efectiva de riego.

La determinación de esta área efectiva de riego tuvo como objetivo lograr una mayor eficiencia, dado que en una hectárea (equivalente a 10.000 m<sup>2</sup>) y que la plantación se realizó en un marco de tresbolillo con un espaciamiento de 10 metros entre plantas y 10 metros entre filas, existirían superficies no productivas

donde no se desea aplicar riego. Por este motivo, se definió el área de riego deseada por planta y, considerando que existen aproximadamente 110 plantas por hectárea, se obtuvo el área efectiva de riego por hectárea ( $A_{ef}$ ).

### 5.3 Componentes del sistema de riego

Se contacto con la empresa Areco Riego, con sede central en la ciudad de Carmen de Areco, la cual, debido a su trayectoria en el rubro, disponibilidad de mano de obra especializada y stock de materiales, fue contratada para ejecutar la instalación del sistema de riego.

Dicha empresa, nos aseguró la disponibilidad tanto de los elementos de seguridad de la bomba como también así las tuberías que formaran parte de las líneas de riego.

En cuanto a elementos de seguridad la recomendación fue una válvula de alivio en caso de sobrepresiones y un filtro de anillos.



Ilustración 4. Filtro de anillos. Fuente: ARECO RIEGOS



Ilustración 5. Válvula de alivio Codital. Fuente: ARECO RIEGO

Las tuberías que conformaron las líneas de riego dicha firma recomendó el uso de tuberías de polietileno, siendo estas totalmente inocuas, lo que significa que no afectan en ninguna medida al agua que pasa en caudales por ellas, incluso aunque lleven productos fertilizantes. Otra de las características importantes es que la rugosidad relativa  $e/d$  es muy pequeña lo que haría que se obtenga un mejor caudal.



Ilustración 6. Tubería de Polietileno. Fuente: ARECO RIEGO

En cuanto al diseño de la plantación y debido a la ubicación previa a la misma de la estación de bombeo, se decidió disponer de manera perpendicular a las líneas de plantas el ramal primario (o tubería maestra) y de manera paralela a línea de plantas los ramales secundarios siendo estos la que alimentaran a cada ejemplar. En la imagen siguiente se representa lo mencionado anteriormente de manera esquemática:

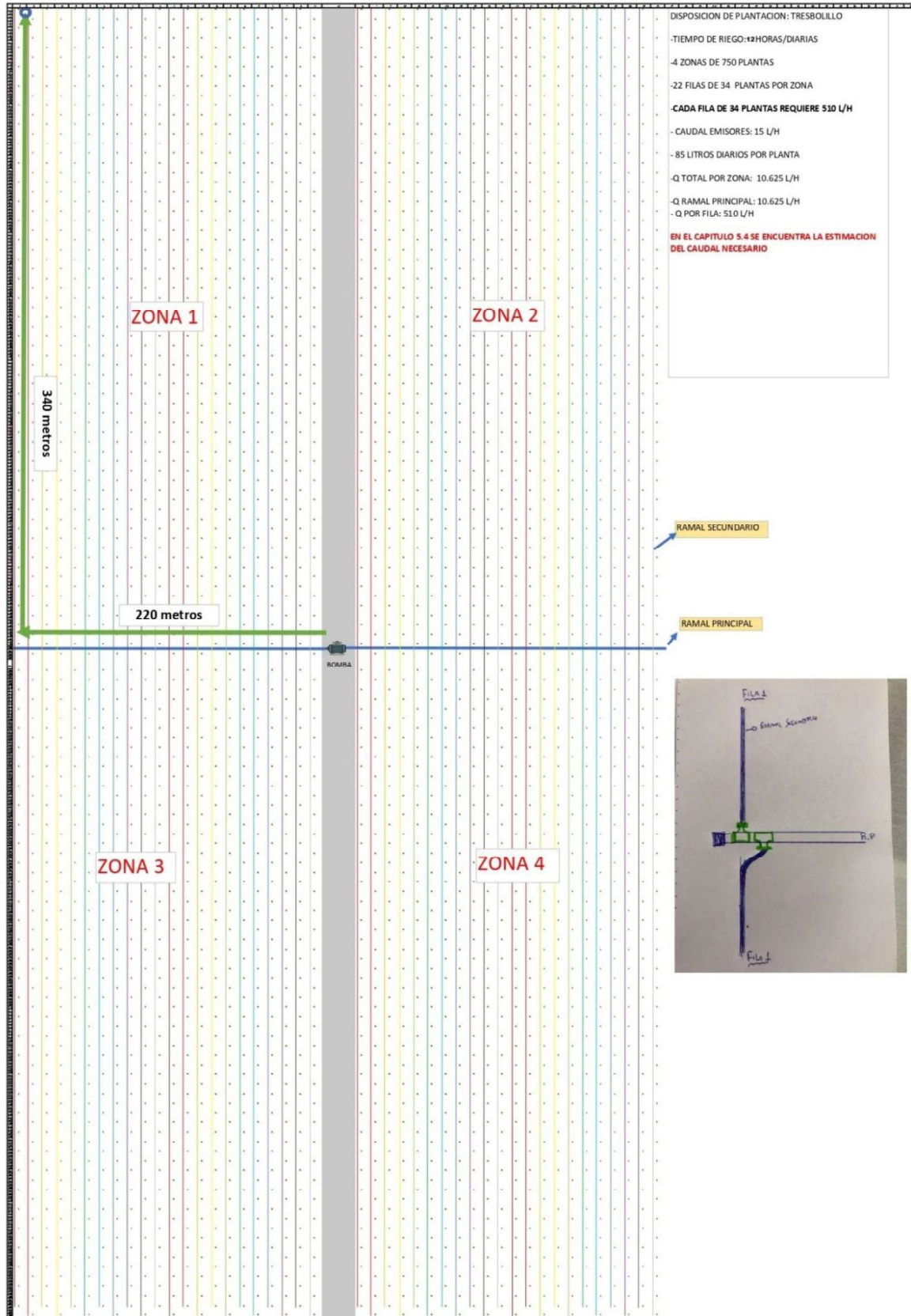


Ilustración 7. Esquema de plantación y línea primaria y líneas secundarias. Fuente: PROPIA

Como se mencionó anteriormente, los ramales secundarios tuvieron como objetivo suministrar agua a cada planta individual, lo cual se logró mediante la instalación de goteros. Dichos emisores se ubicaron sobre los ramales enfrentados a cada ejemplar, empleándose un gotero por planta. La empresa contratada proporcionó los emisores de mayor caudal disponibles, con una capacidad de 15 L/h.



Ilustración 8. Gotero 15 L/h. Fuente: ARECO RIEGO

Observando la ilustración 7 vemos que el fin de cada ramal secundario queda abierto, para evitar esto se procedió a colocar tapones para cada extremo.



Ilustración 9. Tapón para extremos de ramales secundarios. Fuente: ARECO RIEGO

También, se emplearon abrazaderas *tés* para derivar el flujo de agua desde el ramal principal hacia cada ramal secundario, asegurando una distribución eficiente y uniforme del líquido hacia cada planta del cultivo garantizando que cada gotero cumpliera con su función de riego.



Ilustración 10. Abrazaderas. Fuente: IRRITEC

Por último, luego de la conexión del ramal secundario a la abrazadera tee presentada anteriormente, se instalaron (luego de finalizar el informe) válvulas esféricas plásticas de doble espiga de  $\frac{3}{4}$ " para interrumpir el flujo en caso de mantenimiento de la línea y/o otras tareas.



Ilustración 11. Válvula esférica. Fuente: Tecflow

#### 5.4 Demanda hídrica de la plantación y tiempo de riego

En el capítulo 5.2 se comentó acerca del requerimiento hídrico máximo estimado a partir del tipo de suelo presente en la plantación, así como del área considerada para el diseño del sistema de riego. En el presente capítulo se expresaron los resultados de manera más precisa, obteniéndose uno de los datos fundamentales para el desarrollo del proyecto: *el caudal total necesario para abastecer la plantación a futuro.*

- Película de riego:  $1.7 \text{ mm}/\text{dia} = 1.7 \text{ Litros}/\text{m}^2 * \text{dia}$
- Diámetro de copa de árbol:  $8 \text{ m}$
- Área proyectada en el suelo (zona radicular):  $\pi * (4 \text{ m})^2 \cong 50 \text{ m}^2$  (por planta)
- $Q_{\text{CAUDAL}}$  agua diario:  $50 \text{ m}^2 * 1.2 \frac{\text{Litros}}{\text{m}^2 * \text{dia}} = 85 \frac{\text{litros}}{\text{dia}}$  (por planta)
- $Q_{\text{CAUDAL}}$  de agua total:  $3000 \text{ plantas} * 85 \frac{\text{Litros}}{\text{dia}} = 255.000 \frac{\text{Litros}}{\text{dia}} = 255 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$

En conclusión, se determinó que, en el escenario futuro más exigente, la plantación requeriría un máximo de 255 m<sup>3</sup> diarios, lo que equivalía a un aporte de aproximadamente 85 litros por planta por día. Abastecer este volumen de agua a toda la plantación de manera simultánea implicaba la necesidad de incorporar una electrobomba sumergible de características especiales, cuyo diámetro superaría el de la camisa de PVC previamente instalada en la perforación.

En el estado actual, dado que la plantación era joven, cada ejemplar demandaba alrededor de 15-30 litros diarios, valor que se mantendría durante los primeros cuatro años. A partir de ese período, el requerimiento hídrico por planta comenzaría a incrementarse gradualmente, condicionado por las propiedades del suelo, la profundidad del perfil radicular, los valores de evapotranspiración y el

nivel de humedad deseado. La lámina de riego futura tomada como referencia, recomendada por la consultora, fue de 1,7 mm/día.

En agosto del año 2025 cuando se requería el riego de las 1500 plantas de manera simultánea, se tomaron muestras en distintas plantas y el riego no era uniforme, traduciéndose esto a un déficit de riego en las plantas más alejadas. Lo que se propuso fue realizar el riego de manera sectorizada. Aprovechando la simetría de la plantación, se decidió dividirla en **cuatro zonas** y colocar válvulas esféricas en el inicio de cada ramal secundario (*ver ilustración 7 y 11*). La consultora aseguró que, debido a los promedios de lluvias históricos y a los que se registraban en la actualidad, cumplir estrictamente con el riego diario proyectado resultaba innecesario. Por ende, se consideró la posibilidad de regar 1.500 pecanes en un día y los restantes al día siguiente.

Se le comento acerca del caudal mínimo necesario a la empresa Areco Riego y aseguraron que no trabajaban con bombas de caudales que estuvieran por encima de 24 m<sup>3</sup>/h y que el modelo de la bomba que desde un principio colocaron era de 12 m<sup>3</sup>/h.

- Caudal total emisores:  $Q_{tot.emisores} = 3000 * 15 \frac{Litros}{horas} = 45.000 \frac{Litros}{horas}$

- $T_{de\ riego\ diario} = \frac{Q_{total}}{Q_{tot.emisores}} = \frac{255.000 \frac{Litros}{diarios}}{45.000 \frac{Litros}{horas}} = 5.6 \frac{h}{diarios}$

- Caudal total requerido BOMBA:  $\frac{255.000 \frac{Litros}{diarios}}{5.6 \frac{h}{diarios}} = 45.600 \frac{L}{h} = 45.6 \frac{m^3}{h}$

Un caudal de 45,6 m<sup>3</sup>/h resultaba difícil de alcanzar con una sola bomba, y más aun considerando que bombas electro sumergibles de altos caudales no se conseguían fácilmente. Al poder realizar el riego en dos días, se decide regar ZONA 1 y ZONA 3 (actualidad) en un tiempo de 6 horas cada zona y al día siguiente regar ZONA 2 y ZONA 4 (ver ilustración 12). Se recomendó para un futuro, realizar otra perforación y en caso de que la bomba ya adquirida abastezca cada zona de manera eficiente adquirir e instalar otro equipo de bombeo similar, y realizar el riego de los 3000 pecanes en una jornada de 12 horas totales.

A partir de esta situación, se propuso buscar la solución más eficiente posible con los recursos disponibles. Se sectorizó la plantación en 4 zonas de 750 plantas cada una y posteriormente se eligió la zona 1 como área de estudio para el desarrollo de la memoria de cálculo.



Ilustración 12. Esquema zonificación. Fuente: Propia

Se calcularon los nuevos valores de caudales a realizar:

- Demanda hídrica diaria por planta = 85 litros
- Demanda hídrica diaria por zona = 63.750 litros
- Tiempo de riego por zona = 6 horas

- Caudal necesario por zona =  $\frac{63.750 \text{ l}}{6 \text{ h}} = 10.625 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 10,625 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
- Caudal goteros por zona =  $15 \frac{\text{l}}{\text{h}} * 750 \text{ plantas} = 11.250 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 11,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

Se había comparado el caudal total que entregaban los goteros con el caudal necesario por cada zona, y este resultaba un 6 % superior al requerido. Esto significaba que, si la bomba era seleccionada correctamente, se cumpliría con el caudal necesario o bien se estaría dentro del valor esperado. En esas dimensiones de plantación, ser exacto no aportaba beneficios significativos.

A modo de dar introducción a la memoria de cálculo, se elaboró un esquema con los caudales en cada ramal.

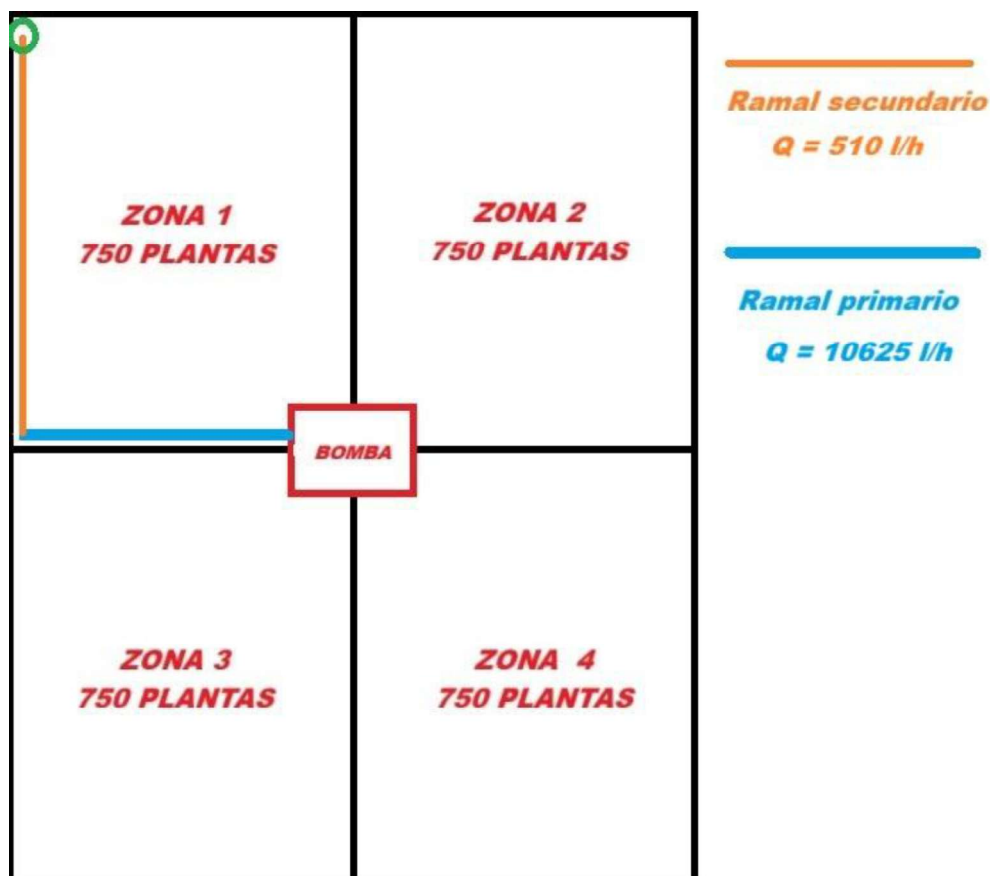


Ilustración 13. Sectorización con caudales. Fuente: Propia

En la *ilustración 13* se observaba un círculo verde que representaba a la planta más alejada. La zona 1, al igual que las demás, contenía 22 filas de 34 plantas cada una. El ramal primario transportaba el caudal necesario para abastecer dicha

zona, mientras que el caudal que circulaba por el ramal secundario, de 510 l/h, se debía a que cada planta tenía instalado un gotero de 15 l/h.

Nota: Se denomina filas a las que se encuentran de manera paralela a los ramales secundarios.

## 5.5 Marco Teórico

El riego por goteo es un sistema presurizado donde el agua se conduce y distribuye por conductos cerrados que requieren presión. Desde el punto de vista agronómico, se denominan riegos localizados porque humedecen un sector de volumen de suelo, suficiente para un buen desarrollo del cultivo.

Con el fin de garantizar que el agua llegara adecuadamente a cada emisor (encargado de aplicar el riego localizado sobre la zona radicular de las plantas), se llevaron a cabo los cálculos hidráulicos necesarios para verificar el buen funcionamiento del sistema.

En este capítulo se realizó:

### *a. Definición del esquema hidráulico:*

Se identificaron los tramos principales del sistema desde la bomba hasta el emisor más alejado, considerando longitudes, diámetros y accesorios.

### *b. Determinación de caudales:*

Se establecieron los caudales requeridos en cada tramo (ramal principal y secundario) y el caudal total demandado por la bomba.

### *c. Cálculo de velocidad en ambos ramales y tipo de flujo*

A partir de la ecuación de continuidad, se determinaron las velocidades de cada ramal. Luego se determinó si el flujo es laminar o turbulento por medio del número de Reynolds.

*d. Cálculo de pérdidas de carga distribuidas y localizadas:*

Se calcularon las pérdidas por fricción en las tuberías mediante las ecuaciones de Darcy–Weisbach.

Se evaluaron las pérdidas ocasionadas por accesorios (codos, tees, válvulas) a través de sus longitudes equivalentes o coeficientes  $K$ .

*e. Determinación de la altura geométrica:*

Se consideró la diferencia vertical entre el nivel de agua en la perforación y el punto más elevado o de descarga del sistema.

*f. Presión mínima en los emisores:*

Se incorporó la presión necesaria para el correcto funcionamiento de los goteros, según especificaciones del fabricante.

*g. Cálculo de la Altura Manométrica Total (HMT):*

Se sumaron la altura geométrica, las pérdidas de carga y la presión requerida en los emisores.

*h. Cálculo de la potencia teórica de bombeo:*

Se aplicó la ecuación determinar la potencia hidráulica necesaria.

*i. Corrección por eficiencia:*

Se ajustó la potencia teórica considerando la eficiencia de la bomba y del motor eléctrico.

*j. Verificación del punto de operación:*

Se comprobó que el caudal y altura determinado se encontraran en un punto de eficiencia aceptable.

- a. Como primera medida, se consideró el caso más desfavorable, correspondiente al recorrido comprendido entre la bomba y la planta ubicada en el punto más alejado de la plantación.

La *ilustración 14* encierra en un círculo azul la planta más alejada:

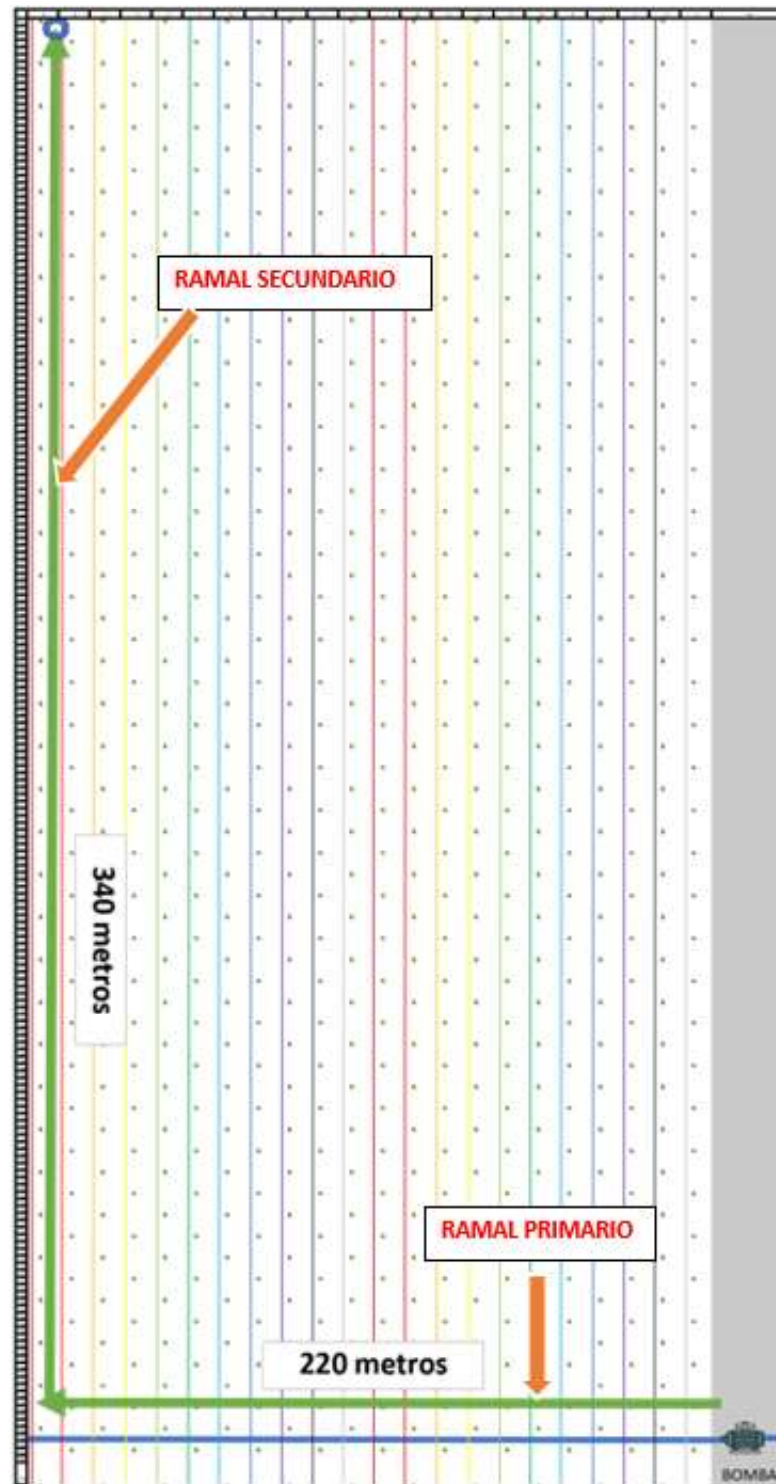


Ilustración 14. Representación del punto más desfavorable. Fuente: Propia

Los 220 metros corresponden al ramal principal que tiene un diámetro exterior de 63 milímetros y los 340 metros restantes para llegar a la planta más alejada corresponden al ramal secundario que cuenta con un diámetro exterior de 20 milímetros.

También se tuvo en cuenta la altura de succión, siendo esta de 18 metros. Como se representa en la *ilustración 15*, desde la salida de la bomba el fluido pasa por una válvula de alivio, luego por un filtro de anillos, luego se instaló una Tee donde el ramal primario se dirigiría por un lado a la parte izquierda de la plantación y por otro a la derecha.

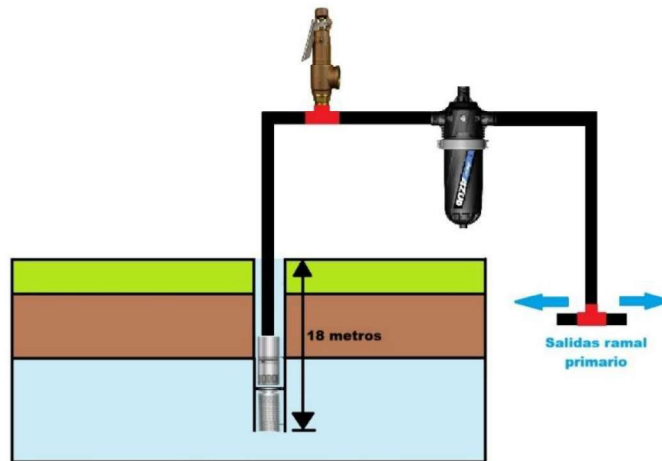


Ilustración 15. Esquema conexión salida de bomba. Fuente: Propia



Ilustración 16. Instalación real salida a ramal primario. Fuente: Propia

- b. Observando la *Ilustración 14*, se identificó el ramal seleccionado para el estudio. El ramal secundario presentó una longitud total de 340 metros, con las plantas dispuestas a una distancia de 10 metros entre sí, lo que determinó la presencia de 34 ejemplares a lo largo del mismo. En consecuencia, se consideraron 34 emisores de goteo, cada uno con un caudal nominal de 15 L/h, permitiendo así calcular el caudal total demandado por dicho ramal.

$$Q_{ramal\ secundario} = 34\ goteros * 15\ L/h = 0,51\ \frac{m^3}{h} = 510\ \frac{L}{h} = 0.141\ \frac{L}{s}$$

El ramal primario presentó una longitud horizontal de 220 metros desde la salida de la bomba hasta la unión con el ultimo ramal secundario. A través de este conducto se verificó que circulaba el caudal total necesario para garantizar el correcto abastecimiento de agua a cada emisor de goteo conectado al sistema.

$$Q_{ramal\ primario} = 10.62\ \frac{m^3}{h} = 10.625\ \frac{L}{h} = 2.95\ \frac{L}{s}$$

- c. Se utilizo la ecuación de continuidad  $Q = v * A$  para determinar la velocidad del fluido en cada ramal.

SDR PE 80 PE 100	41 PN 3,2 PN 4	33 PN 4 PN 5	26 PN 5 PN 6	21 PN 6 PN 8	17 PN 8 PN 10	13,6 PN10 PN 12,5
Diámetro	Espesor	Espesor	Espesor	Espesor	Espesor	Espesor
Ext (mm)	mm	mm	mm	mm	mm	mm
20	-	-	-	-	-	1,80
25	-	-	-	-	1,80	2,00
32	-	-	-	-	2,00	2,40
40	-	-	1,80	2,00	2,40	3,00
50	-	-	2,00	2,40	3,00	3,70
63	-	2,00	2,50	3,00	3,80	4,70

Ilustración 17. Catálogo de tuberías. Fuente: TIGRE

Ramal secundario:

- Diámetro exterior: 20 mm
- Diámetro interior ( $D_{\text{interno}}$ ): 18.2 mm = 0,0182 m
- $Q_{\text{RAMAL SECUNDARIO}}$ : 510 L/h = 0,51 m<sup>3</sup>/h

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\left(\frac{\pi * (D_{\text{interno}})^2}{4}\right)} = \frac{0,51 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{2,6 * 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,544 \text{ m/s}$$

La velocidad calculada para este ramal se encuentra dentro de los rangos aceptables de velocidades para fluidos acuosos por lo tanto la verificación se considera satisfactoria.

Numero de Reynolds:

$$R_e = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

- $\rho$  = densidad del fluido (1000 kg/m<sup>3</sup>)
- $v$  = velocidad del fluido (0,544 m/s)
- $D$  = diametro de la tuberia (0,0182 m)
- $\mu$  = viscosidad dinamica (0,653 \* 10<sup>-3</sup>  $\frac{\text{kg}}{\text{m*s}}$ )

$$R_e = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,544 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0182 \text{ m}}{0,653 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}} = 15.186$$

**>4000 REGIMEN TURBULENTO**

Ramal primario:

- Diámetro exterior: 63 mm
- Diámetro interior ( $D_{\text{interno}}$ ): 58,3 mm = 0,0583 m
- $Q_{\text{RAMAL PRIMARIO}}$ : 10.625 L/h = 10,625 m<sup>3</sup>/h

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\left(\frac{\pi * (D_{interno})^2}{4}\right)} = \frac{10,625 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{3600 s}}{2,67 * 10^{-3} m^2} = 1,10 m/s$$

La velocidad calculada para este ramal se encuentra dentro de los rangos aceptables de velocidades para fluidos acuosos por lo tanto la verificación se considera satisfactoria.

Numero de Reynolds:

$$R_e = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 1,10 \frac{m}{s} * 0,0583 m}{0,653 * 10^{-3} \frac{kg}{m * s}} = 98.689$$

**>4000 REGIMEN TURBULENTO**

*Nota:* El valor de viscosidad dinámica fue extraído de la TABLA A9 del libro Cengel 7ma edición a una temperatura promedio de 40 grados.

- d. El factor de fricción de flujo en tubería turbulento depende del número de Reynolds y la rugosidad relativa  $\varepsilon/D$ , siendo esta la razón de la altura media de rugosidad de la tubería al diámetro de la tubería.

La tubería utilizada fue de polietileno cuya rugosidad absoluta era del orden de 0,0015 mm, valor despreciable en relación con su diámetro interno. Por este motivo, se la consideró hidráulicamente lisa, adoptando una rugosidad relativa próxima a cero ( $\varepsilon/D \approx 0$ ).

En esta etapa del estudio se procedió a determinar el factor de fricción de Darcy (f) correspondiente a cada uno de los tramos del sistema de riego. También, se denominó tramo “C” al tramo desde la conexión de la bomba

hasta el accesorio T que conecta el ramal primario izquierdo y derecho (*ver ilustración 23*). Para ello, se consideraron los valores de rugosidad relativa ( $\epsilon/D$ ) propios del material utilizado y el número de Reynolds ( $Re$ ) obtenido en función de las condiciones de caudal y diámetro de cada conducción.

Con estos parámetros se recurrió al diagrama de Moody, herramienta que permitió identificar de manera gráfica el valor del coeficiente de fricción en función del régimen de flujo y de las características internas de la tubería.

### Ramal primario:

- $\frac{\epsilon}{D} \approx 0$  (*hidraulicamente lisa*)
- $Re = 98.689$

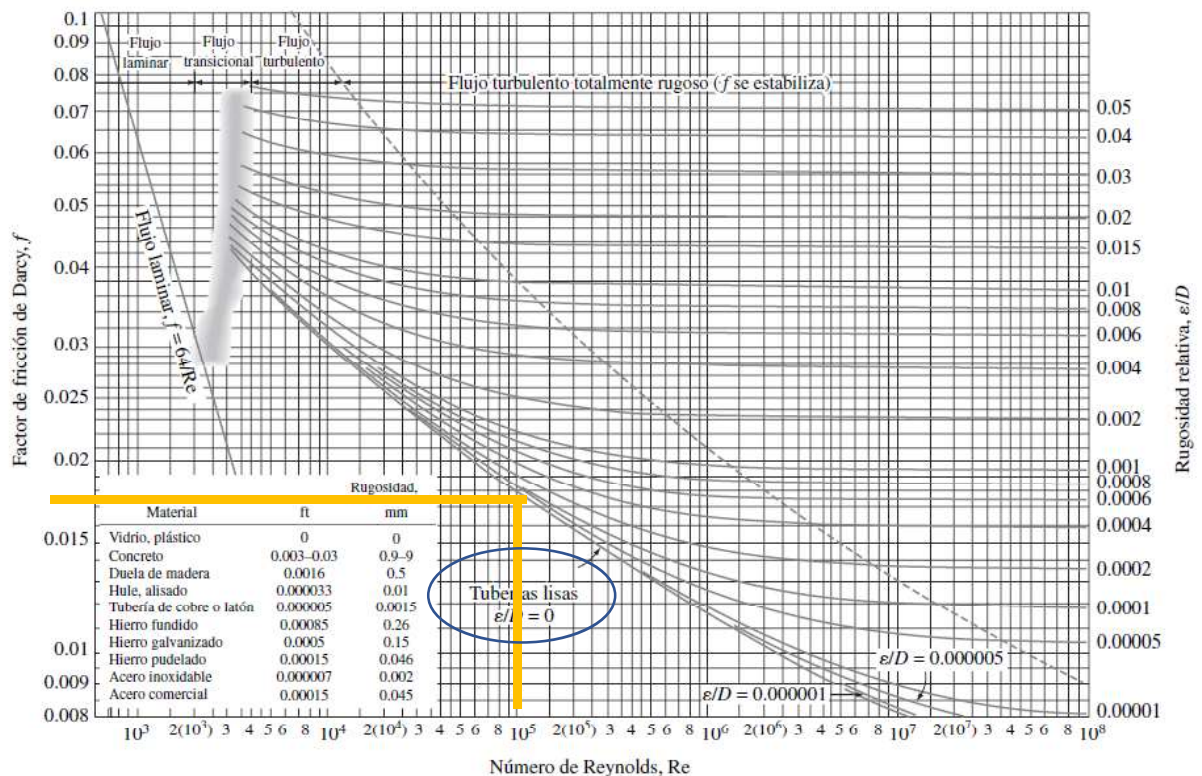


Ilustración 18. Diagrama de Moody para ramal primario. Fuente: Cengel

El resultado que se obtuvo fue un factor de fricción de Darcy de  $f = 0.0175$

Para el cálculo de las pérdidas de carga  $h_l$  se utilizó la ecuación de *Darcy-Weisbach*. La pérdida de carga  $h_l$  representa la altura adicional que el fluido

necesita para elevarse por medio de una bomba con el fin de superar las pérdidas por fricción en la tubería.

$$h_l = f * \frac{(L + L_{eq})}{D_{int}} * \frac{(v)^2}{2 * g}$$

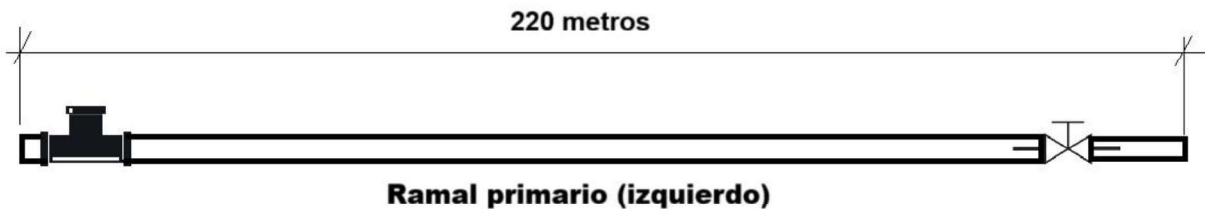
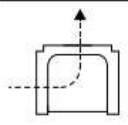
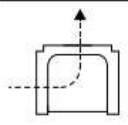
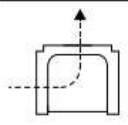








Ilustración 19. Esquema ramal primario

Longitud recta L = 220 metros

Longitud recta debido a los accesorios: 0,43 metros + 4,27 metros = 4,7 m

ACCESORIO			LONGITUD EQUIVALENTE																																		
<p style="text-align: center;"><b>“Tee”</b></p> <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Diámetro nominal de los caños normales</td> <td rowspan="2">   <b>Te normal con salida lateral</b> </td> </tr> <tr> <td>mm.</td> <td>Pulg.</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>1/2</td> <td>1,00</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>3/4</td> <td>1,37</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>1</td> <td>1,74</td> </tr> <tr> <td>32</td> <td>1 1/4</td> <td>2,32</td> </tr> <tr> <td>38</td> <td>1 1/2</td> <td>2,74</td> </tr> <tr> <td>51</td> <td>2</td> <td>3,66</td> </tr> <tr> <td>63</td> <td>2 1/2</td> <td><b>4,27</b></td> </tr> </table>			Diámetro nominal de los caños normales		 <b>Te normal con salida lateral</b>	mm.	Pulg.	12	1/2	1,00	19	3/4	1,37	25	1	1,74	32	1 1/4	2,32	38	1 1/2	2,74	51	2	3,66	63	2 1/2	<b>4,27</b>	<p>Para diámetro nominal de 63 mm</p> <p style="text-align: center;"><b><math>L_{eq} = 4,27 \text{ metros}</math></b></p>								
Diámetro nominal de los caños normales		 <b>Te normal con salida lateral</b>																																			
mm.	Pulg.																																				
12	1/2	1,00																																			
19	3/4	1,37																																			
25	1	1,74																																			
32	1 1/4	2,32																																			
38	1 1/2	2,74																																			
51	2	3,66																																			
63	2 1/2	<b>4,27</b>																																			
<p style="text-align: center;"><b>“Válvula esférica”</b></p> <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Diámetro nominal de los caños normales</td> <td rowspan="2">   <b>Válvula esfera totalmente abierta</b> </td> <td rowspan="2">   <b>Válvula globo totalmente abierta</b> </td> </tr> <tr> <td>mm.</td> <td>Pulg.</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>1/2</td> <td>0,12</td> <td>5,18</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>3/4</td> <td>0,15</td> <td>6,71</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>1</td> <td>0,18</td> <td>8,24</td> </tr> <tr> <td>32</td> <td>1 1/4</td> <td>0,24</td> <td>11,00</td> </tr> <tr> <td>38</td> <td>1 1/2</td> <td>0,30</td> <td>13,12</td> </tr> <tr> <td>51</td> <td>2</td> <td>0,36</td> <td>16,78</td> </tr> <tr> <td>63</td> <td>2 1/2</td> <td><b>0,43</b></td> <td><b>20,43</b></td> </tr> </table>			Diámetro nominal de los caños normales		 <b>Válvula esfera totalmente abierta</b>	 <b>Válvula globo totalmente abierta</b>	mm.	Pulg.	12	1/2	0,12	5,18	19	3/4	0,15	6,71	25	1	0,18	8,24	32	1 1/4	0,24	11,00	38	1 1/2	0,30	13,12	51	2	0,36	16,78	63	2 1/2	<b>0,43</b>	<b>20,43</b>	<p>Para diámetro nominal de 63 mm</p> <p style="text-align: center;"><b><math>L_{eq} = 0,43 \text{ metros}</math></b></p>
Diámetro nominal de los caños normales		 <b>Válvula esfera totalmente abierta</b>	 <b>Válvula globo totalmente abierta</b>																																		
mm.	Pulg.																																				
12	1/2	0,12	5,18																																		
19	3/4	0,15	6,71																																		
25	1	0,18	8,24																																		
32	1 1/4	0,24	11,00																																		
38	1 1/2	0,30	13,12																																		
51	2	0,36	16,78																																		
63	2 1/2	<b>0,43</b>	<b>20,43</b>																																		

$$L + L_{eq} = 220 \text{ m} + 4.7 \text{ m} = 224.7 \text{ m}$$

Perdida de carga en ramal primario  $h_{l1}$ :

$$h_{l1} = 0,0175 * \frac{(224,7 \text{ m})}{0,0583 \text{ m}} * \frac{\left(1,10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 4,16 \text{ m}$$

La pendiente hidráulica J es la relación de la pérdida de carga entre dos puntos y la longitud que las separa.

$$J = \frac{h_{l1}}{L} = \frac{4.16 \text{ m}}{220 \text{ m}} = 0,0189 = 1.89 \%$$

Esto se traduce a que se pierden por fricción 0,0189 m de columna de agua por metro de longitud. Se expresa en valores de porcentaje ya que al estar por debajo de 10% de variación se considera un valor admisible.

### Ramal secundario:

- $\frac{\varepsilon}{D} \approx 0$  (hidraulicamente lisa)
- $R_e = 15.186$

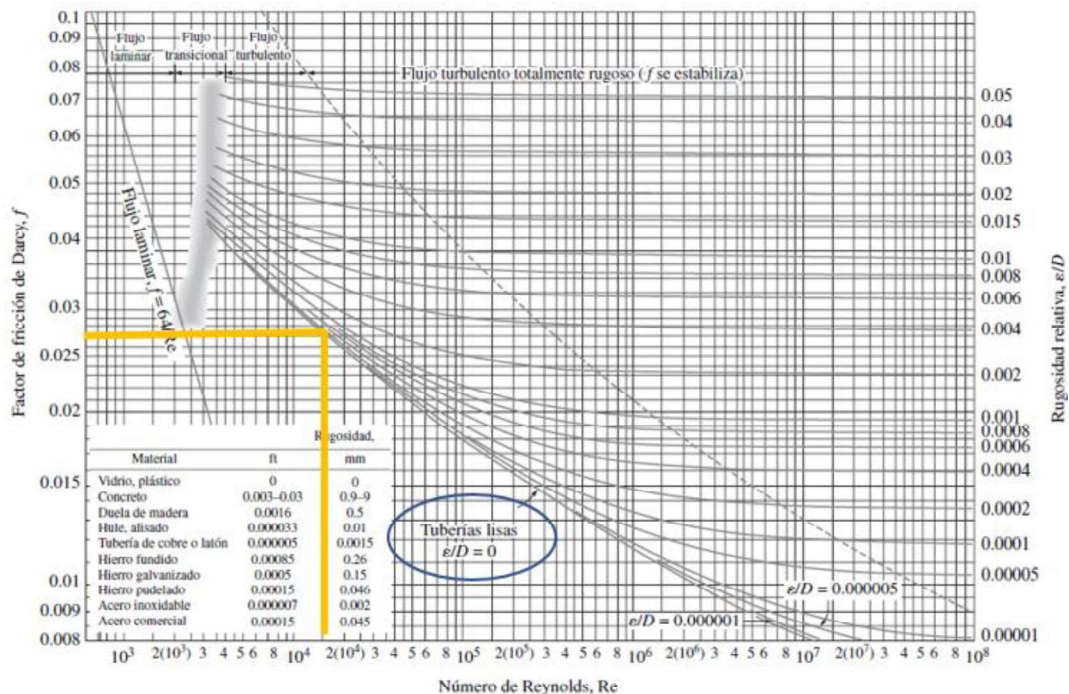


Ilustración 20. Diagrama de Moody para ramal secundario. Fuente: Cengel

El resultado que se obtuvo fue un factor de fricción de Darcy de  $f = 0.0275$

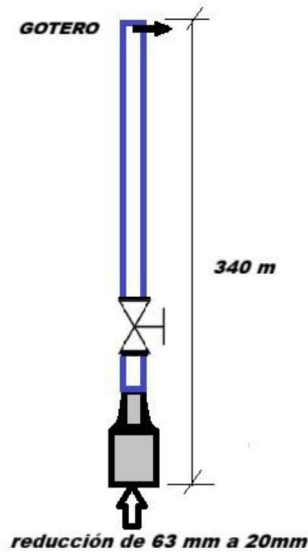
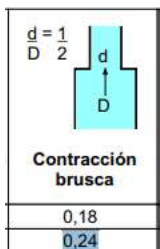


Ilustración 21. Esquema ramal secundario. Fuente: Propia

Longitud recta  $L = 340$  metros

Longitud recta debido a los accesorios:  $0.15$  metros +  $0.240$  metros =  $0,39$  m

ACCESORIO		LONGITUD EQUIVALENTE																
<p><b>“Reducción concéntrica”</b></p>  <p>Contracción brusca</p> <table border="1"> <tr> <td>0,18</td> </tr> <tr> <td>0,24</td> </tr> </table>		0,18	0,24	<p>Para un diámetro nominal de 20 mm</p> <p><math>L_{eq} = 0,240</math> metros</p>														
0,18																		
0,24																		
<p><b>“Válvula esférica”</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Diámetro nominal de los caños normales</th> <th>Válvula esclusa totalmente abierta</th> <th>Válvula globo totalmente abierta</th> </tr> <tr> <th>mm.</th> <th>Pulg.</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12</td> <td>1/2</td> <td>0,12</td> <td>5,18</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>3/4</td> <td>0,15</td> <td>6,71</td> </tr> </tbody> </table>		Diámetro nominal de los caños normales		Válvula esclusa totalmente abierta	Válvula globo totalmente abierta	mm.	Pulg.			12	1/2	0,12	5,18	19	3/4	0,15	6,71	<p>Para un diámetro nominal de 20 mm</p> <p><math>L_{eq} = 0.15</math> metros</p>
Diámetro nominal de los caños normales		Válvula esclusa totalmente abierta	Válvula globo totalmente abierta															
mm.	Pulg.																	
12	1/2	0,12	5,18															
19	3/4	0,15	6,71															

$$L + L_{eq} = 340 \text{ m} + 0,39 \text{ m} = 340,39 \text{ metros}$$

Perdida de carga en ramal secundario  $h_{l2}$ :

$$h_{l2} = 0,0275 * \frac{(340,39 \text{ m})}{0,0182 \text{ m}} * \frac{\left(0,54 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 7.65 \text{ metros}$$

$$J = \frac{h_{l1}}{L} = \frac{7.65 \text{ m}}{340 \text{ m}} = 0,0225 = 2.25 \%$$

### Ramal "C"

El ramal "C" se conectó a la salida de la bomba y se extendió hasta el accesorio en "T", a través del cual se distribuyó el caudal hacia los 1500 ejemplares ubicados en el sector izquierdo o hacia los correspondientes al sector derecho de la calle principal. Como medida de seguridad, se incorporaron una válvula de alivio y un filtro de anillos en dicho tramo. Este ramal se realizó con tuberías en 63 mm.

- $\frac{\varepsilon}{D} \approx 0$  (hidraulicamente lisa)
- $Re = 98.689$

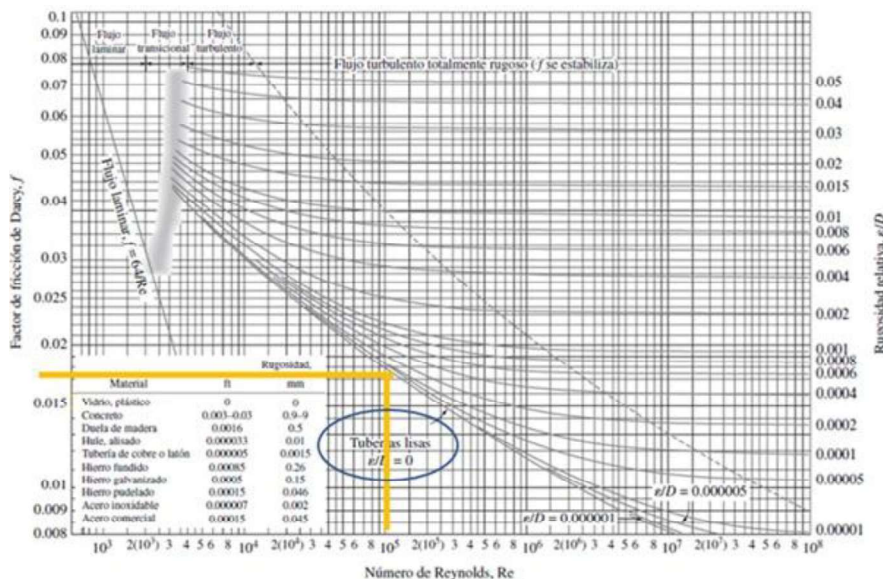


Ilustración 22. Diagrama de Moody para ramal "C". Fuente: Cengel

El resultado que se obtuvo fue un factor de fricción de Darcy de  $f = 0.0175$

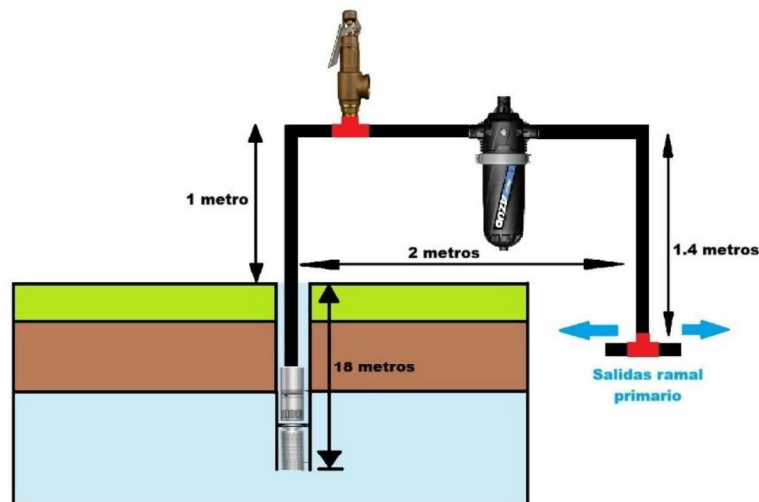


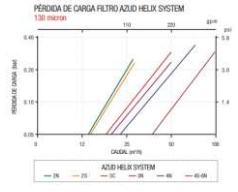
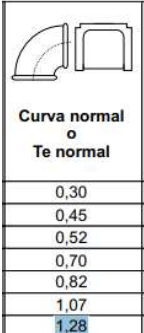
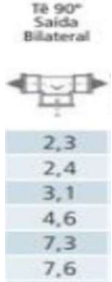


Ilustración 23. Esquema ramal "C". Fuente: Propia

Longitud recta  $L = 1 \text{ m} + 2 \text{ m} + 1,4 \text{ m} = 4.4 \text{ metros}$

Longitud recta debido a los accesorios:  $3.66 \text{ m} + 5 \text{ m} + 2,56 \text{ m} + 7,6 \text{ m} = 18,82 \text{ metros}$

ACCESORIO	LONGITUD EQUIVALENTE				
<p><b>“Válvula de seguridad”</b></p>  <p>Válvula de retención</p> <table border="1"> <tr><td>1,22</td></tr> <tr><td>1,83</td></tr> <tr><td>2,44</td></tr> <tr><td>3,66</td></tr> </table>	1,22	1,83	2,44	3,66	<p>Para un diámetro nominal de 63 mm</p> <p><math>L_{eq} = 3.66 \text{ metros}</math></p>
1,22					
1,83					
2,44					
3,66					
<p><b>“Filtro de anillos”</b></p>   <p>PERDIDA DE CARGA FILTRO AZUL HELIX SYSTEM 1300 metros</p> <p>PERDIDA DE CARGA (m)</p> <p>CAUDA (l/min)</p> <p>AZUL HELIX SYSTEM</p> <p>— 25 — 32 — 38 — 45 — 50 — 60 — 65 — 75</p>	<p>Tipo: Filtro de 2” serie 2NR anillos</p> <p>Condición: Limpio</p> <p><math>L_{eq} = 5 \text{ metros}</math></p>				

<p><b>"Codos 90°"</b></p>  <p>Curva normal o Te normal</p> <table border="1"> <tr><td>0,30</td></tr> <tr><td>0,45</td></tr> <tr><td>0,52</td></tr> <tr><td>0,70</td></tr> <tr><td>0,82</td></tr> <tr><td>1,07</td></tr> <tr><td>1,28</td></tr> </table>	0,30	0,45	0,52	0,70	0,82	1,07	1,28	<p>2 codos de 63 mm</p> <p><math>L_{eq} = 1,28 \text{ m} \times 2 = 2.56 \text{ metros}</math></p>
0,30								
0,45								
0,52								
0,70								
0,82								
1,07								
1,28								
<p><b>"Te 90° salida bilateral"</b></p>  <p>Tè 90° Salida Bilateral</p> <table border="1"> <tr><td>2,3</td></tr> <tr><td>2,4</td></tr> <tr><td>3,1</td></tr> <tr><td>4,6</td></tr> <tr><td>7,3</td></tr> <tr><td>7,6</td></tr> </table>	2,3	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	<p>Para diámetro nominal 63 mm</p> <p><math>L_{eq} = 7,6 \text{ metros}</math></p>	
2,3								
2,4								
3,1								
4,6								
7,3								
7,6								

$$L + L_{eq} = 4,4 \text{ m} + 18,82 \text{ m} = 23,22 \text{ metros}$$

Perdida de carga en ramal secundario  $h_{lC}$ :

$$h_{lC} = 0,0175 * \frac{(23,22\text{m})}{0,0583 \text{ m}} * \frac{\left(1,10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,43 \text{ metros}$$

$$J = \frac{h_{l1}}{L} = \frac{0,43 \text{ m}}{23,22 \text{ m}} = 0,0185 = 1.85 \%$$

La pérdida de carga total del ramal fue:

$$h_{L \text{ total}} = h_{l1} + h_{l2} + h_{lC} = 4,16 \text{ m} + 7,65 \text{ m} + 0,43 \text{ m}$$

$$h_{L \text{ total}} = 12.24 \text{ metros}$$

- e. La altura geométrica de la bomba fue de 18 metros, correspondiente a la distancia entre la bomba sumergible y el nivel del suelo. Dicho valor no fue considerado en el cálculo de las pérdidas de carga del ramal "C".

$$h_g = 18 \text{ metros}$$

- f. La presión mínima de los emisores era de 1bar, es decir, 10,2 m.c.a.

$$h_{emisores} = 10,2 \text{ metros}$$

- g. La altura manométrica total (HMT) representó la energía total que la bomba debió suministrar al fluido para transportarlo desde el punto de succión hasta el punto de descarga. Este valor incluyó tanto la energía necesaria para vencer las pérdidas de carga (distribuidas y localizadas) como la altura geométrica y la presión requerida en los emisores, garantizando así el correcto funcionamiento del sistema de riego.

$$HMT = h_{L\ total} + h_{emisores} + h_g = 12,24 \text{ m} + 18 \text{ m} + 10,2 \text{ m}$$

$$HMT = 40,44 \text{ m}$$

El valor de la altura manométrica total (HMT) es utilizado para la selección de la bomba. Se tomo un valor de sobredimensionamiento intencional de un 20 % más que lo calculado. HMT\* es la altura manométrica necesaria.

$$HMT^* = 48.5 \text{ m}$$

- h. Para el cálculo de la potencia teórica de la bomba se utilizó la siguiente expresión:

$$\bullet P_{teorica} = \frac{\rho * g * HMT * Q_{total}}{1000}$$

$$\bullet P_{teorica} = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 9,8 \frac{m}{s^2} * 45 \text{ m} * 0,0029 \frac{m^3}{s}}{1000} = 1,27 \text{ KW}$$

- i. Se corrigió la potencia teórica teniendo en cuenta la eficiencia de la bomba y del motor eléctrico de la bomba, se tomaron eficiencias típicas que coincidían con datos de catálogo. Para la bomba la eficiencia fue de 0,60 y para el motor eléctrico 0,90.

Entonces:

$$P_{real} = \frac{P_{teorica}}{\eta_{bomba} * \eta_{bobinado}} = \frac{1.27 \text{ kw}}{0.60 * 0.90}$$

$$P_{real} = 2,35 \text{ KW} = 3,15 \text{ HP}$$

Se determinó que la bomba debía poseer una altura manométrica superior a **45.5 m.c.a.** y un caudal de **12 m<sup>3</sup>/h**

Al cumplir con estos parámetros, se garantizaba que el sistema respondiera en el futuro a los requerimientos máximos establecidos por la consultora.

Con el fin de verificar lo adquirido previamente, se recurrió al presupuesto donde la empresa de riego detalla exactamente cuál es la bomba que instalo en el año 2024.

Con el caudal y el modelo que se detallaba en la factura de compra, se ingresó al catálogo de RotorPump, marca de bombas que comercializa dicha empresa.

El caudal de la bomba instalada era de 12 m<sup>3</sup>/h y el modelo era la bomba ST6014.

Modelo de Bomba 50 Hz	Potencia HP	Q= CAUDAL																				DATOS ESPEC.		
		75	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	450	500	Largo (mm)	Peso (kg)
		4,8	5,4	6	7,2	8,4	9,6	10,8	12	13,2	14,4	15,6	16,8	18	19,2	20,4	21,6	22,8	24	27	30			
ST 5507	1,5	41	35	34	33	32	29	26	23	18	14	8										537	5,3	
ST 5510	2,0	58	49	48	47	44	41	37	32	27	20	13										693	6,7	
ST 5514	3,0	83	71	69	67	63	58	54	48	40	31	20										901	8,5	
ST 5518	4,0	107	92	90	87	83	77	70	62	52	39	26										1147	10,4	
ST 5522	5,0	131	110	107	104	98	91	82	71	58	45	30										1345	12,3	
ST 5524	5,5	141	118	116	113	106	97	88	77	63	49	33										1449	13,2	
ST 6007	2,0	45			37	36	33	31	28	25	22	18	14									534	5,3	
ST 6010	3,0	64			54	52	49	44	41	36	32	26	20									690	6,7	
ST 6014	4,0	89			76	72	67	62	56	49	43	35	28									989	8,6	
ST 6017	5,0	107			90	86	80	74	67	59	51	42	32									1092	10,1	
ST 6019	5,5	120			102	97	91	89	76	68	58	48	37									1195	11,0	
ST 6026	7,5	163			136	129	120	111	100	87	75	61	48									1559	14,3	
ST 8008	3,0	51					41	39	37	35	33	31	29	27	24	22	20	17	14	12		676	6,3	
ST 8011	4,0	70					57	54	52	49	47	44	41	38	34	31	28	24	21	18		880	8,1	
ST 8013	5,0	81					67	64	61	58	55	52	48	45	41	38	34	30	26	22		1013	9,3	
ST 8015	5,5	97					79	76	73	69	66	63	58	54	50	46	41	36	32	27		1149	10,5	
ST 8020	7,5	125					97	94	90	86	83	77	73	71	64	59	53	48	42	36		1489	13,5	

Ilustración 24. Catalogo bombas ST. Fuente: RotorPump

Curvas de performance para 187,5 l/min (11.25 m<sup>3</sup>/h y 45 m.c.a)

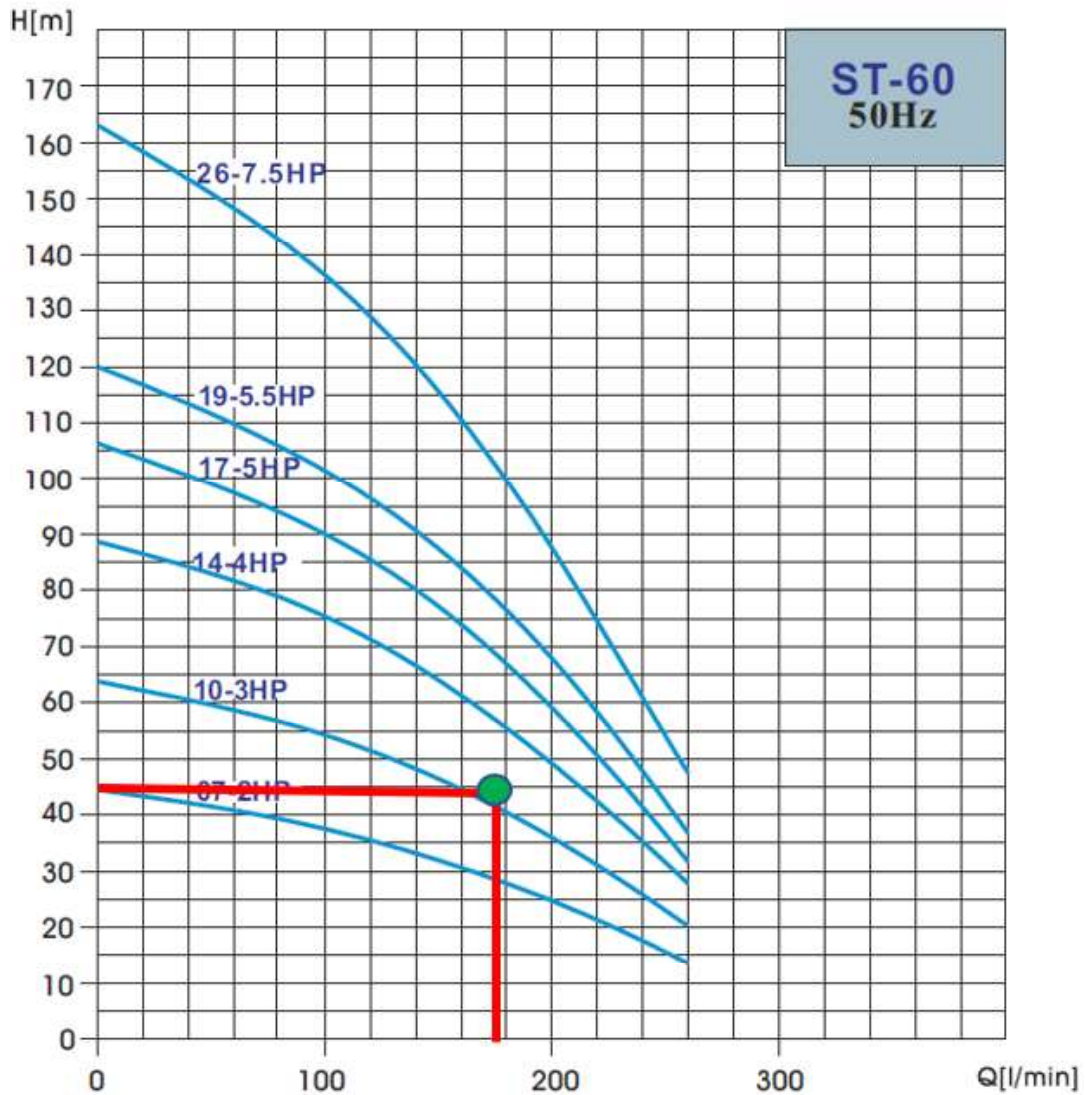


Ilustración 25. Curvas de performance. Fuente: RotorPump

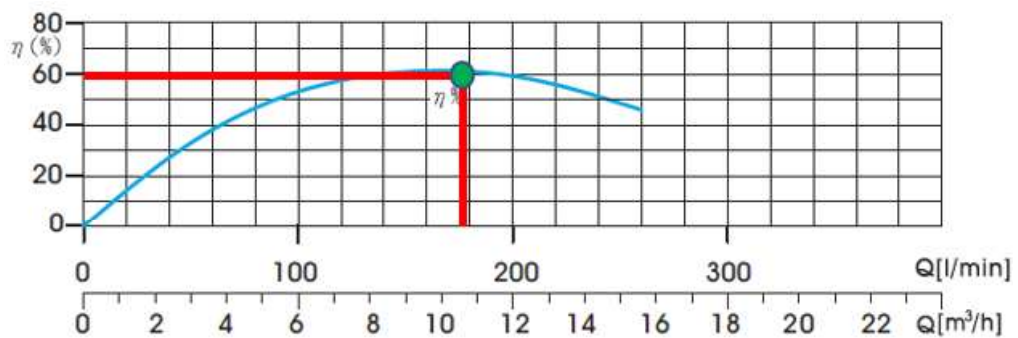


Ilustración 26. Curva de performance. Fuente: RotorPump

Con los valores de diseño ( $H = 48.5$  m y  $Q = 187,5$  L/min) y una potencia calculada de 3,15 HP, la elección de una bomba de 4 HP resulta adecuada y prudentemente conservadora. Las curvas muestran que el punto de operación queda cubierto con holgura y que la eficiencia se mantiene en un rango superior al 60 %, cercano al óptimo, asegurando estabilidad y confiabilidad ante variaciones reales como ensuciamiento y pérdidas adicionales. En síntesis, la selección previa de la bomba **ST6014- 4 HP** garantiza el cumplimiento de caudal y altura con margen operativo, sin comprometer el rendimiento del sistema de riego.

Se confirmaba que la bomba cumplía con las especificaciones, pero surgía la duda cual era el caudal operativo real. La solución fue cubicar con un tambor de 200 litros a la salida de la bomba y tomar el tiempo. Se realizó el llenado en 1,08 minutos, dándonos un caudal de 185 litros/minutos, o bien,  $11,2$  m<sup>3</sup>/h. El ingeniero de la firma de riego asegura que por experiencia tenga en cuenta un valor  $\mp 6$  % según catálogo en cuanto a caudal. Teniendo en cuenta ese porcentaje, como mínimo la bomba entregaría  $11.28$  m<sup>3</sup>/h siendo un valor próximo al caudal necesario ( $10,62$  m<sup>3</sup>/h).

La electrobomba seleccionada correspondía a un equipo sumergible para pozo profundo, del tipo centrífugo radial y multietapa. El modelo empleado disponía de 14 etapas hidráulicas, configuración que permitía alcanzar alturas manométricas elevadas dentro del diámetro reducido de la perforación. El agua ingresa a la bomba y en cada etapa es impulsada radialmente por la acción centrífuga del impulsor. Este movimiento le transfiere energía cinética, que luego es convertida en energía de presión mediante el difusor. Así, en cada etapa, el fluido gana presión y se eleva progresivamente hacia la salida. Cada etapa incluye un impulsor y un difusor (dispositivo estacionario) quien se encarga de dirigir el fluido con energía a la siguiente etapa.

Dicha bomba incorporaba en su extremo superior una válvula antirretorno integrada. Este dispositivo impedía el flujo inverso una vez detenida la impulsión, evitando así los *golpes de ariete* y protegiendo tanto a la tubería como al propio equipo de sobrepresiones indeseadas.

El fenómeno de *cavitación* ocurría cuando la presión en la entrada de la bomba descendía por debajo de la presión de vapor del agua, es decir, cuando se generaban condiciones de baja presión en el lado de succión. En el caso de la bomba sumergible utilizada, el agua no era arrastrada sino empujada hacia el impulsor debido a la presión hidrostática de la columna de agua que la rodeaba. Esta condición impedía que se produjeran presiones negativas en la zona de succión, reduciendo prácticamente a cero la posibilidad de cavitación en el sistema.

### Sistema solar para alimentación de bomba

Cuando se concretó la compra del campo donde posteriormente se desarrollaría la plantación, éste no contaba con suministro de red eléctrica. En una etapa inicial, se realizó una consulta a la empresa Sunrise Energías Renovables con el fin de evaluar un sistema solar que pudiera abastecer las tareas previstas a futuro. Durante la primera reunión, la empresa sugirió que no era necesario dimensionar el sistema pensando en las necesidades finales, sino incorporar los componentes de manera progresiva a medida que aumentara la demanda.

Sin embargo, cuando se avanzó con el proyecto de la plantación, la firma Turben S.A. decidió analizar la inversión a una escala mayor. La intención no solo era producir nuez pecán, sino también agregar valor mediante la instalación futura de una planta de procesado con infraestructura de grandes dimensiones y maquinarias de elevado consumo energético.

Frente a este enfoque, la empresa resolvió ejecutar el tendido eléctrico rural en principios de 2024, instalando aproximadamente 20 cuadras de línea y llevando al establecimiento una red trifásica con transformador propio.

Teniendo en cuenta que, en comparación con otros métodos de agricultura tradicional, la producción de nuez pecán resulta más amigable con el ambiente, se evaluó paralelamente la posibilidad de implementar un sistema de riego alimentado mediante energía solar. Es decir, abastecer la bomba sumergible trifásica ya instalada utilizando un sistema fotovoltaico.

El riego se había establecido en 6 horas por zona, realizando dos zonas por día. Las horas efectivas de luz solar, consideradas de manera conservadora, eran de 7 a 8 horas promedio; por lo tanto, si se pensaba en un equipo solar, solo podía abastecer una zona de riego diaria. Desde el punto de vista operativo, esto implicaba utilizar únicamente el 50 % de la energía eléctrica convencional de red, lo cual resultaba un dato interesante.

En el aspecto económico, aunque no se contó con un presupuesto formal sino con una charla interna en la empresa, se concluyó que los costos de materiales eran muy elevados. Se reconoció que, con el paso de los años, la inversión en un sistema solar podría amortizarse; sin embargo, en un proyecto de plantación de nueces pecán, según datos de los entes reguladores en Argentina, las ganancias económicas comienzan a obtenerse recién a partir del año once. Dado que el gasto para llevar la red eléctrica convencional al campo ya estaba realizado, la firma Turben S.A. decidió dejar de lado la incorporación del sistema solar al menos hasta que la plantación comenzara a producir.

En conclusión, el presidente de la firma asegura que en un futuro se pueda implementar energía solar para actividades específicas donde se pueda abastecer en un 100 % como son: Iluminación, boyeros eléctricos, cámaras de seguridad, etc.

## Conclusión del proyecto

En un principio se había considerado dividir la plantación en dos zonas de 1.500 pecanes cada una, pero el sistema de riego actual no abastecía correctamente a 1500 plantas, es decir, los valores requeridos superaban la capacidad de los equipos previamente instalados, lo que hacía imposible resolver el problema con los recursos disponibles. Se propone la sectorización en zonas, pero para esto se debieron instalar llaves esféricas que previamente no se encontraban instaladas.

Finalmente, lo que se propuso anteriormente y la firma realizaría cuando sea necesario es una nueva perforación y la instalación de una bomba similar para abastecer el riego de las dos zonas ubicadas a la derecha de la bomba (*ver ilustración 27*).

Con esta propuesta llevada adelante, el riego de toda la plantación se realizaría en un solo día en una jornada de 12 horas.



Ilustración 27. Zonas a regar con nueva perforación. Fuente: Propia

Una vez finalizado el informe, se llevó a cabo una prueba real en campo con el objetivo de verificar la uniformidad de riego en distintos sectores de cada zona. En ese momento, cada ramal secundario próximo a la conexión con el ramal primario ya contaba con una llave de paso. Para dividir en dos zonas, se procedió de manera manual al cierre de 22 filas de las 34 que conformaban la zona 3. De esta manera, y considerando que actualmente se disponía de 1.500 plantas correspondientes a las zonas 1 y 3, quedó habilitada para el riego únicamente la zona 1.

A continuación, se procedió a calcular el Coeficiente de Uniformidad de Caudales (CUC) a partir del método establecido por Merriam y Keller (1978). Este criterio aseguró que el diseño y la operación del sistema garantizaran una adecuada aplicación de agua incluso en las áreas peor abastecidas, resultando especialmente relevante en sistemas de riego localizado.

Los estudios se realizaron en condiciones de plena explotación, es decir, tal como se encontraba el sistema en funcionamiento. La uniformidad se evaluó mediante el coeficiente de uniformidad (Cu). En este caso se utilizó la metodología descrita por Merriam y Keller (1978):

- Dentro de la subunidad de riego se eligen 4 laterales, el del inicio, a 1/2 del primero, a 2/3 del primero y el último;
- Dentro del lateral se eligen 4 emisores (3 réplicas), el primero, el último y dos intermedios, escogidos con el mismo criterio anterior;
- Medir el agua y las presiones de los emisores seleccionados durante un intervalo de tiempo, en este caso se fijó 30 segundos;
- Convertir todas las lecturas de volumen a caudal (L/h).

Coeficiente de uniformidad para el gasto (ecuación 2):

$$Cu = 100 \times \left( \frac{\bar{Q}_{25}}{Q_n} \right) \quad (2)$$

$\bar{Q}_{25}$  -media de los valores del 25% más bajo del gasto registrado en el emisor;  
 $Q_n$  -media del total de los valores de gasto.

Ilustración 28. Selección de muestras. Fuente: Merriam y Keller

Valores recomendados para caracterizar coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ):
90%-100%, excelente;
80%-90%, bueno;
70%-80%, aceptable;
<70%, inaceptable.

Ilustración 29. Valores recomendados. Fuente: Merriam y Keller

A continuación, sobre la zona 1 (zona de estudio) se seleccionaron las filas según el criterio utilizado (*ver ilustración 28*) y sobre cada fila se eligieron 4 emisores como lo recomienda el método.

Cabe recordar que cada zona está compuesta por 22 filas y 34 pecanes por fila.

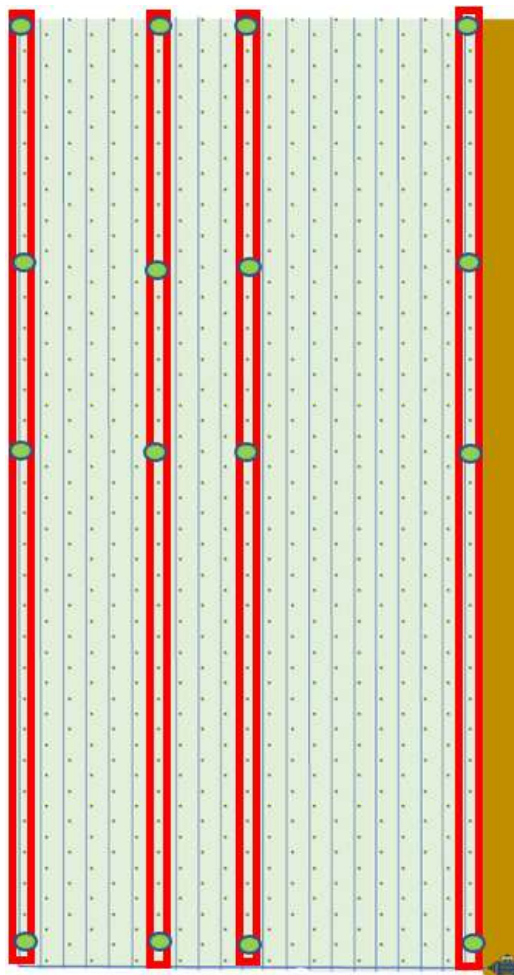


Ilustración 30. Zona 1, selección de filas para determinación de CUC. Fuente: Propia

El siguiente paso que se realizó fueron las mediciones con el sistema en funcionamiento, cubicando con un vaso graduado y un cronometro cada planta seleccionada en un tiempo de 60 segundos.

**Aclaración:** Se denomina fila 1, 2, 3, ..., n de izquierda a derecha (*ver ilustración 30*) y planta N° 1, 2, 3, ..., n desde arriba hacia abajo.

Al ser 4 emisores por fila y 4 filas seleccionadas se tomaron 16 muestras diferentes, a continuación, se detallan en tabla los resultados:

Planta	Volumen de agua	Tiempo de llenado	Caudal entregado
Fila N°1, Planta N°1	235 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,10 l/h
Fila N°1, Planta N°9	235 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,10 l/h
Fila N°1, Planta N°15	237 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,22 l/h
Fila N°1, Planta N°34	237 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,22 l/h
Fila N° 7, Planta N°1	238 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,28 l/h
Fila N° 7, Planta N°9	238 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,28 l/h
Fila N° 7, Planta N°15	239 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,34 l/h
Fila N° 7, Planta N°34	239 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,34 l/h
Fila N° 11, Planta N°1	240 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,40 l/h
Fila N° 11, Planta N°9	242 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,52 l/h
Fila N°11, Planta N°15	247 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,82 l/h
Fila N°11, Planta N°34	247 cm <sup>3</sup>	1 minuto	14,82 l/h
Fila N° 22, Planta N°1	250 cm <sup>3</sup>	1 minuto	15 l/h
Fila N° 22, Planta N°9	250 cm <sup>3</sup>	1 minuto	15 l/h
Fila N°22, Planta N°15	250 cm <sup>3</sup>	1 minuto	15 l/h
Fila N°22, Planta N°34	251 cm <sup>3</sup>	1 minuto	15,06 l/h

Una vez realizadas las mediciones se procedió a calcular el coeficiente de uniformidad de caudales.

$$CUC = 100 \times \left( \frac{\bar{Q}_{25}}{\bar{Q}} \right)$$

Siendo  $\bar{Q}_{25}$  la media aritmética del 25 % de toda la muestra que represente a los valores de caudales más bajos y siendo  $\bar{Q}$  la media aritmética de todos los valores registrados.

Como se puede ver en la tabla de muestras, los caudales más bajos se presentaron en la fila N°1 de la zona 1, siendo esta la fila más alejada de la bomba. Como se realizaron 16 muestras, el 25% de caudales más bajos los representan los 4 emisores de la fila N°1.

$$\bar{Q}_{25} = \frac{14,10 \frac{l}{h} + 14,10 \frac{l}{h} + 14,22 \frac{l}{h} + 14,22 \frac{l}{h}}{4} = 14,16 \frac{l}{h}$$

$$\bar{Q} = \frac{\sum \text{caudal entregado}}{16 \text{ muestras}} = 14,53 \frac{l}{h}$$

$$CUC = 100 \times \left( \frac{\bar{Q}_{25}}{\bar{Q}} \right) = 100 \times \frac{14,16 \frac{l}{h}}{14,53 \frac{l}{h}} = 97,4 \%$$

Según los valores de CUC recomendados que figuran en la *ilustración 29*, haber tenido un coeficiente de uniformidad de caudal de 97,4 % se considera **excelente**.

El resultado de este coeficiente pone en evidencia el gran trabajo que se realizó, desde la recolección de datos hasta la toma de decisiones. Decir que el resultado fue satisfactorio hace referencia a que el estudio fue concebido desde el inicio con el objetivo de encontrar una solución utilizando exclusivamente los recursos ya disponibles, sin incurrir en gastos adicionales.

A continuación, se muestra en imagen la tarea de medición de caudal que entregaban los goteros y por último se adjuntara una imagen del manómetro a la salida de la bomba al momento del riego de la zona 1.







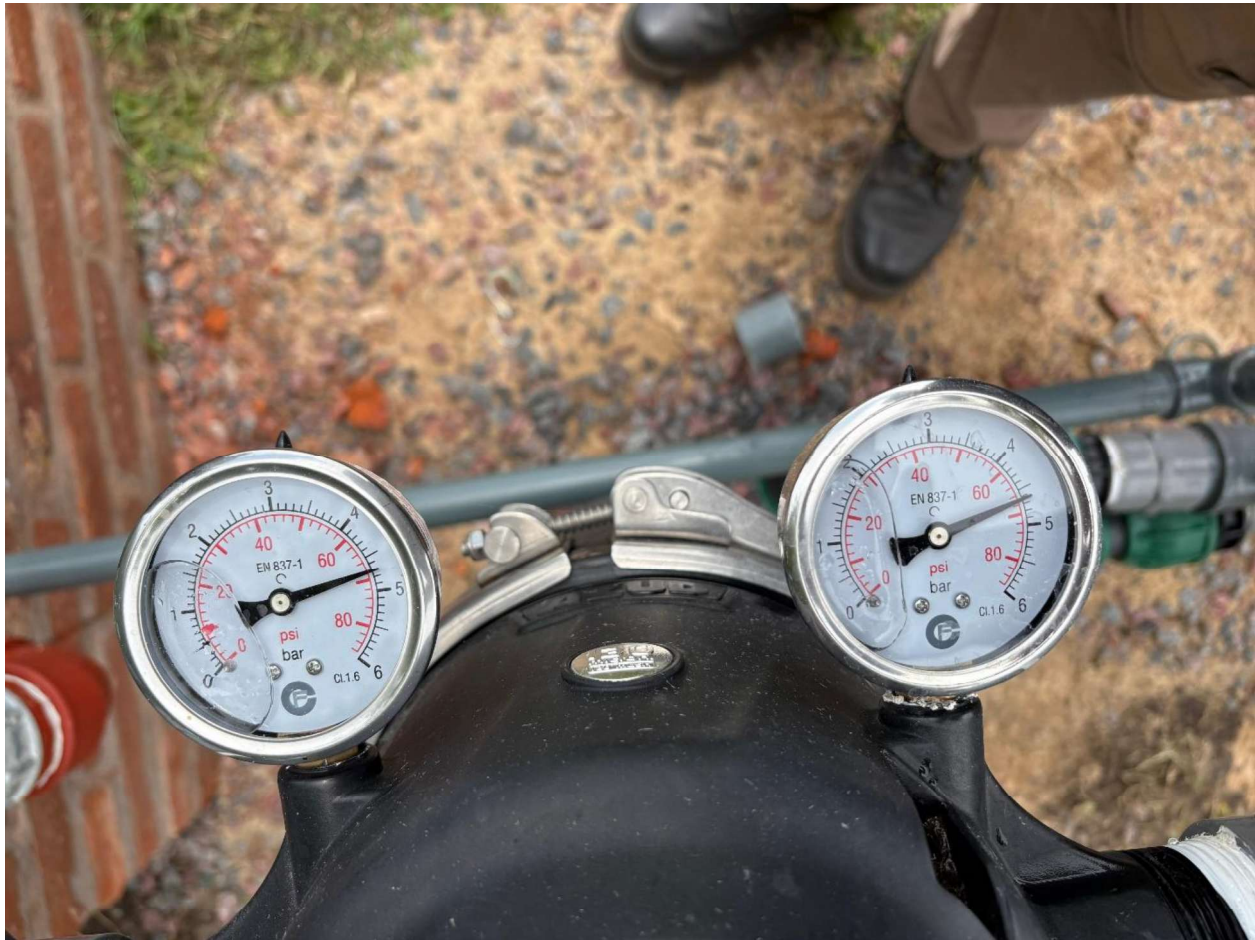


Ilustración 31. Presión en riego de zona 1. Fuente: Propia

## Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, quienes desde el primer momento me brindaron su apoyo incondicional para llevar adelante este proyecto de vida que significó cursar una carrera universitaria. Gracias por hacer todo lo posible para que pudiera concentrarme plenamente en mis estudios.

A Jorge Daniel Turjanski, Rut Marisa Benlolo y Pascual Alejandro Simone, por permitirme ser partícipe de este gran proyecto que se está llevando adelante.

Agradecer al Ingeniero de Procesos / Ingeniero Químico Tomas Guerriero por ser mi tutor y acompañarme en el desarrollo de la Práctica Profesional Supervisada.

A mis abuelos que ya no están, pero que estoy seguro que me acompañaron y guiaron en cada paso. A mis abuelas, que hasta el día de hoy siguen presentes con su cariño, sus palabras, sus abrazos tan especiales.

A mis amigos de Chivilcoy, por estar siempre. A mis amigos universitarios, con quienes comencé y terminé esta etapa, gracias por compartir el camino, por la compañía y por hacer todo más llevadero, incluso más fácil.

Finalmente, mi gratitud a la UNNOBA, a sus profesores, personal administrativo y a todos quienes, de una u otra forma, contribuyeron a mi formación profesional y personal.

¡Muchas gracias! Agustin.



## Bibliografía

CENGEL, Y. A. (2006). *MECANICA DE FLUIDOS*. MEXICO: 1ER EDICION.

Merriam, J. &. (1978). *Agricultural and Irrigation Engineering Department*. Logan, UT: Farm Irrigation System Evaluation.

motores, M. B. (s.f.). *MotorArg Bombas y motores*. Obtenido de <https://www.motorarg.com.ar/>

Renovables, S. E. (s.f.). Obtenido de <https://sunrisenergia.com/bomba-solar-rural/>

RotorPump. (s.f.). Obtenido de <https://rotorpump.com/index.asp>

VALLEY. (s.f.). *Areco Riego*. Obtenido de <https://www.arecoriego.com.ar/>

ZETENTA. (s.f.). *FIASA*. Obtenido de <https://fiasa.com.ar/>