

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**OPTIMIZACIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA UN SISTEMA
DE RIEGO POR PIVOTE CENTRAL**

EDUARDO GUILLERMO SKEWES LETELIER

HABILITACIÓN PROFESIONAL PRESENTADA
A LA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
AGRÍCOLA

CHILLÁN-CHILE

2021

**OPTIMIZACIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA UN SISTEMA
DE RIEGO POR PIVOTE CENTRAL**

Aprobado por:

Octavio Lagos Roa

Ing. Civil Agrícola MS. Ph.D.

Profesor Asociado

Profesor Guía

Camilo Souto Escalona

Ing. Civil Agrícola, Dr.

Profesor Asistente

Profesor Asesor

Andrés Pérez Barriga

Ing. Civil Agrícola, Mg.

Evaluador Externo

Evaluador Externo

Nicole Uslar Valle

Ing. Civil Agrícola, Ph.D.

Profesor Asistente

Directora de Departamento

María Eugenia González Rodríguez

Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Profesor Asociado

Decana



ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo general.....	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
3. ANTECEDENTES GENERALES	6
4. METODOLOGÍA	9
4.1 Situación actual de agua de riego en el predio.	9
4.1.1 Aguas aportadas por el canal	9
4.1.2 Aguas aportadas por el pozo profundo	10
4.1.3 Aguas aportadas por el pozo zanja existente	10
4.2 Situación actual de sistema de riego	10
4.2.1 Descripción del Pivote Central	10
4.2.2 Descripción del equipo electrógeno	11
4.2.3 Descripción bomba sumergible	12
4.3 Modo de operación y costos	12
4.4 Parámetros del acumulador	14
4.5 Parámetros del sedimentador.....	15
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
5.1 Acumulador	21
5.2 Sedimentador	22
5.3 Conexión de acumulador a succión de pivote.....	25
5.4 Horas de trabajo proyectadas.....	26
5.5 Presupuesto detallado para el proyecto.....	27
5.5.1 Acumulador	27
5.5.2 Sedimentador.....	28
5.5.3 Conexión de acumulador proyectado a caseta de bombeo.....	28
5.5.4 Profundización de bomba	29
5.5.5 Costo total del proyecto	29
5.5.6 Análisis precios unitarios	30

5.6	COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA PROYECTADO Y RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN	32
6.	CONCLUSIÓN	35
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	37
8.	PLANOS.....	38
8.1	Planos sedimentador	38
8.2	Planos compuerta de fierro.....	40
8.3	Plano Acumulador	43
8.4	Plano pozo sala de bomba	44
8.5	Planos de conexión acumulador con succión pivote.....	45



ÍNDICE DE TABLAS

En el texto	Página
Tabla 1. Disponibilidad de agua con 85% de seguridad para el río Ñuble, río Chillán y el embalse Coihueco.....	9
Tabla 2. Dimensiones de pozo zanja existente en el predio.	13
Tabla 3. Costo de operación actual del pozo profundo y la bomba sumergible instalada en el pozo zanja para suplir el agua faltante del sistema de riego.....	14
Tabla 4. Pendiente típica del talud bajo el agua.	15
Tabla 5. Valores obtenidos en laboratorio de muestra de sedimento de canal y la cantidad en gramos y porcentaje que corresponden a cada diámetro.	16
Tabla 6. Criterios de diseño típicos para tanques rectangulares de flujo horizontal.....	19
Tabla 7. Dimensiones del pozo acumulador proyectado.	21
Tabla 8. Costo de ampliar el acumulador existente, según costo contratista.....	27
Tabla 9. Costos de hacer el sedimentador para el sistema de riego.	28
Tabla 10. Conexión de acumulador proyectado a foso de succión del equipo de riego.	28
Tabla 11. Costos de profundizar la sala de bombeo.....	29
Tabla 12. Resumen de costos del proyecto.	29
Tabla 13. Análisis de precio unitario un hormigón G-200.....	30
Tabla 14. Análisis de precio unitario un hormigón G-300.....	30
Tabla 15. Análisis de precio unitario en la instalación de moldajes de madera.	31
Tabla 16. Análisis de precio unitario del armado de la enfierradura.	31
Tabla 17. Análisis de precio unitario instalación de instalación de una tubería corrugada.	31
Tabla 18. Análisis de precio unitario de instalación de una compuerta de fierro.	32
Tabla 19. Costo de operación mensual proyectado del pozo profundo para suplir el agua faltante del sistema de riego.	33
Tabla 20. Costo mensual actual y costo mensual de la situación proyectada para suplir el agua faltante del sistema de riego.....	33

Tabla 21. Flujo de caja de proyecto propuesto.	34
Tabla 22. La tasa de interes a evaluar el proyecto, la rentabilidad maxima del proyecto (TIR), valor actual neto del proyecto (VAN) y año de recuperaci3n de la inversi3n.	34



ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Croquis de ubicación del predio	7
Figura 2. Croquis de distribución espacial en el predio del pivote y accesorios	7
Figura 3. Plano de disposición general en terreno del canal de riego, acumulador existente y caseta de riego	8
Figura 4. Placa del equipo electrógeno, que detalla características técnicas de funcionamiento.....	11
Figura 5. Curva característica de la bomba instalada en el pozo profundo.	12
Figura 6. Plano de planta de sedimentadores proyectados	24
Figura 7. Modelo 3D de sedimentadores proyectados para alimentar el acumulador	25
Figura 8. Plano de planta de sedimentador.....	38
Figura 9. Esquema en tres dimensiones de sedimentador propuesto	39
Figura 10. Compuerta para regular dirección y caudal en sedimentador	40
Figura 11. Detalle de volante de compuerta.	41
Figura 12. Detalle de guillotina de compuerta.....	42
Figura 13. Acumulador proyectado.....	43
Figura 14. Plano planta sala de bombeo	44
Figura 15. Vista de planta de conexión entre acumulador con succión del pivote.....	45
Figura 16. Perfil lateral conexión de acumulador con succión del pivote.....	46

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Velocidad de sedimentación flujo laminar	17
Ecuación 2. Número de Reynolds	17
Ecuación 3. Velocidad de sedimentación flujo transición	18
Ecuación 4. Área de sedimentador	18



OPTIMIZACIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA UN SISTEMA DE RIEGO POR PIVOTE CENTRAL

WATER SUPPLY OPTIMIZATION FOR A CENTRAL PIVOT IRRIGATION SYSTEM

Palabras claves: Recursos hídricos, eficiencia, pivote central, Ñuble.

RESUMEN

Este proyecto se diseña para el fundo “Los Llanos de Cato ubicado en la región de Ñuble y que lleva años implementando tecnología y esfuerzos para mejorar las practicas agronómicas, en especial, el uso eficiente del agua. El predio fue pionero en implementar riego por pivote central en la zona en el año 2000. Actualmente, el sistema funciona mal y con falta de agua. Además, la creciente cantidad de sedimentos arrastrados hacia el sistema dificulta el funcionamiento uniforme y continuo del equipo. Así, este proyecto tiene como objetivo, optimizar el abastecimiento de agua del sistema, aprovechando al máximo el agua disponible y optimizando el uso del pivote. El proyecto contempla la habilitación, ampliación y la conexión de un acumulador existente, para reducir las pérdidas de agua en momentos de no uso, o excesos aportados. Además, pretende crear un sistema de sedimentación para capturar las partículas que producen taponamiento y evitar que lleguen al sistema de riego. El proyecto de mejora del sistema tiene un costo de \$17,401,891, el cual genera un ahorro de \$1,704,818 en un mes de pleno riego, pudiendo amortizar el costo del proyecto en tres años.

WATER SUPPLY OPTIMIZATION FOR A CENTRAL PIVOT IRRIGATION SYSTEM

Keywords: Water resources, Efficiency, Center pivots, Ñuble.

SUMMARY

This project is developed for “Los Llanos de Cato” farm, ranch located in Ñuble region that uses technology and efforts for years to improve agronomic practices, especially the efficient use of water. The property was a pioneer in implementing center pivot irrigation in the area in 2000. Currently, the system works poorly and with a lack of water. Additionally, the increasing amount of sediment entrained into the system, hinders the smooth and continuous operation of the equipment. Thus, this project optimizes the water supply of the system, making the most of the available water and optimizing the use of the pivot. The project include the enabling, expansion and connection of an existing accumulator, to reduce water losses in moments of non-use, or excesses contributed. Additionally, it creates a sedimentation system to capture the particles that cause clogging and prevent them from reaching the irrigation system. The project has a cost of \$ 17,401,891. It generates a saving of \$ 1,704,818 in a month of full irrigation, with amortization of cost in three years.

1. INTRODUCCIÓN

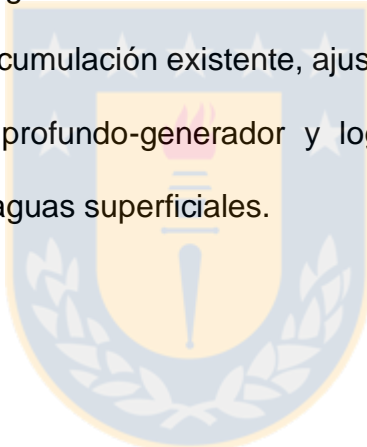
La escasez del agua en la agricultura es notoria en nuestro país y se ha transformado en uno de los temas principales en la agricultura, debido a la disminución constante de este recurso, obligando al agricultor a invertir y hacer un uso eficiente del recurso hídrico para desarrollar la agricultura. Entre éstas se encuentran, mejoras en la eficiencia en el riego, nuevas formas de plantar, o incluso modificaciones a gran escala de un terreno para poder llegar con vital recurso de un punto a otro en donde sea necesario.

El agricultor que no cuente con métodos de riego presurizados o sistemas de acumulación nocturna, utiliza las aguas solo durante 10 horas de riego al día, dejando escurrir libremente el agua durante el resto del tiempo, lo que revela que durante la temporada de riego aproximadamente un 50% del recurso es desaprovechado (Moraga, A.A. 1998). El agua ha sido un recurso que comenzó a disminuir fuertemente a partir de los años 2000 (Apey, A., D. Barrera y T. Rivas. 2017), lo que actualmente es un problema para los sistemas de riego instalados en ese entonces, ya que se planearon con la disponibilidad hídrica, no pudiendo hoy en día trabajar a su totalidad. Por lo mismo, hoy ya existen sistemas que están restringidos o incluso en desuso por la falta de agua. Siendo este el gran motivo para la búsqueda de nuevos sistemas o modalidades para suplir la falta o aumentar la eficiencia del uso,

como es el caso de grandes acumuladores, pozos profundos, turnos en los canales, equipos con mejor eficiencia, entre otros.

El caso de estudio de este proyecto se enfoca en un sistema de riego instalado en el año 2.000, teniendo ya 20 temporadas de uso, el cual no es capaz de funcionar solo con el agua aportada por el canal, sino que también por agua aportada por un pozo profundo.

En consecuencia, este proyecto tiene como objetivo optimizar el abastecimiento de agua de un sistema de riego por pivote, habilitando para ello un sistema de acumulación existente, ajustando los tiempos de operación del conjunto pozo profundo-generator y lograr sedimentar las partículas arrastradas por las aguas superficiales.

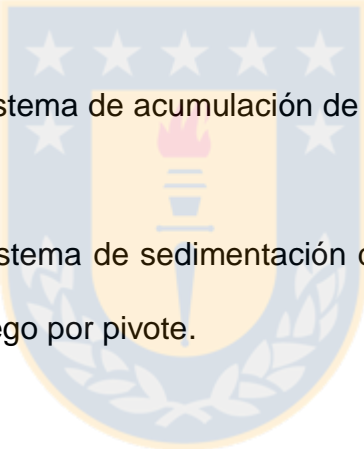


2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Optimizar el abastecimiento de agua para un sistema de riego por pivote mediante el diseño de un sistema de captación y acumulación de aguas superficiales.

2.2 Objetivos específicos

- 
- Diseñar un sistema de acumulación de aguas superficiales para riego.
 - Diseñar un sistema de sedimentación del agua para ser usada por el sistema de riego por pivote.
 - Evaluar económicamente la situación actual del sistema de riego por pivote central y la proyectada con acumulador y sistema de captación.

3. ANTECEDENTES GENERALES

El proyecto se implementará en el fundo Los Llanos de Cato, roles S.I.I. 2214-30, propiedad de José Letelier Cortés, Santos Letelier Cortés, Margarita Letelier Cortés y Ximena Letelier Cortés, ubicado en la comuna de Coihueco, provincia del Punilla, decima sexta región de Ñuble (Figura 1). La superficie total del predio es de 244 ha, la mayor parte es de secano. La principal siembra anual es regada por un pivote central que cubre aproximadamente 75 ha (Figura 2), el que es abastecido por el canal Collico con aguas provenientes del rio Ñuble.

En las últimas temporadas el agua que aporta el canal es insuficiente para abastecer por si solo al pivote en plena época de riego (diciembre, enero y febrero), es por esto que se ocupa un pozo profundo ubicado al lado de la caseta de riego (Figura 3). Pero el pozo profundo entrega mayor caudal que el necesario por el pivote y el agua sobrante se pierde y escurre por el canal. El funcionamiento del pozo profundo representa un gran gasto para la empresa, ya que trabaja con un generador de electricidad debido a que la potencia de electricidad instalada en el lugar no es suficiente para alimentar al pivote y la bomba del pozo profundo simultáneamente. Debido a la mala gestión del personal y comodidad para estos, en la actualidad dejan el pozo profundo la mayor parte del tiempo funcionando, para así asegurarse que al pivote no le falte agua, sin la necesidad de vigilarlo continuamente.

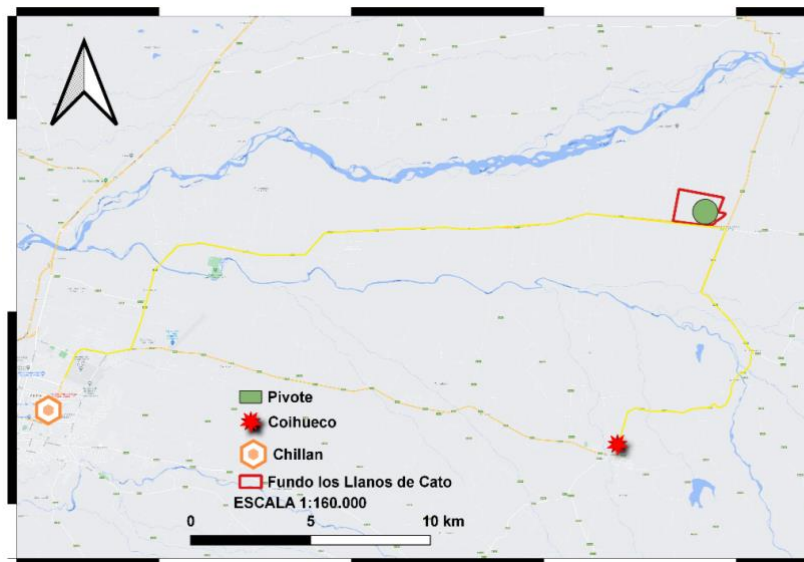


Figura 1. Croquis de ubicación del predio. Fuente: Elaboración propia.

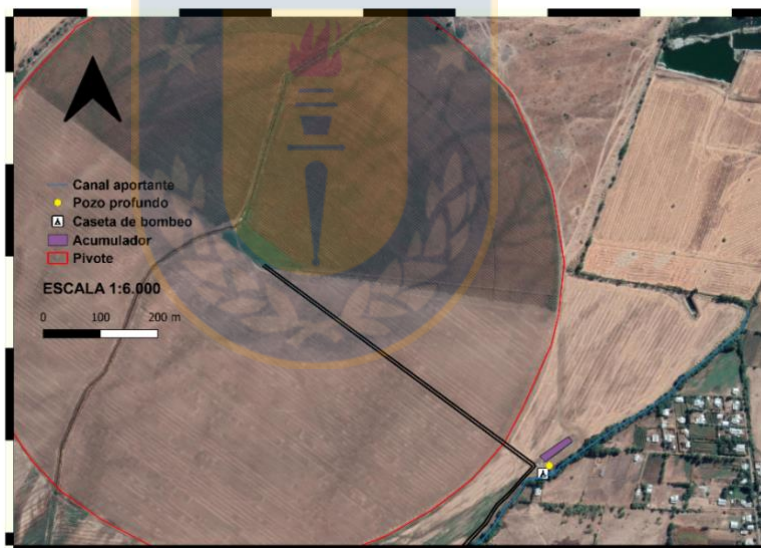


Figura 2. Croquis de distribución espacial en el predio del pivote y accesorios. Fuente: Elaboración propia.

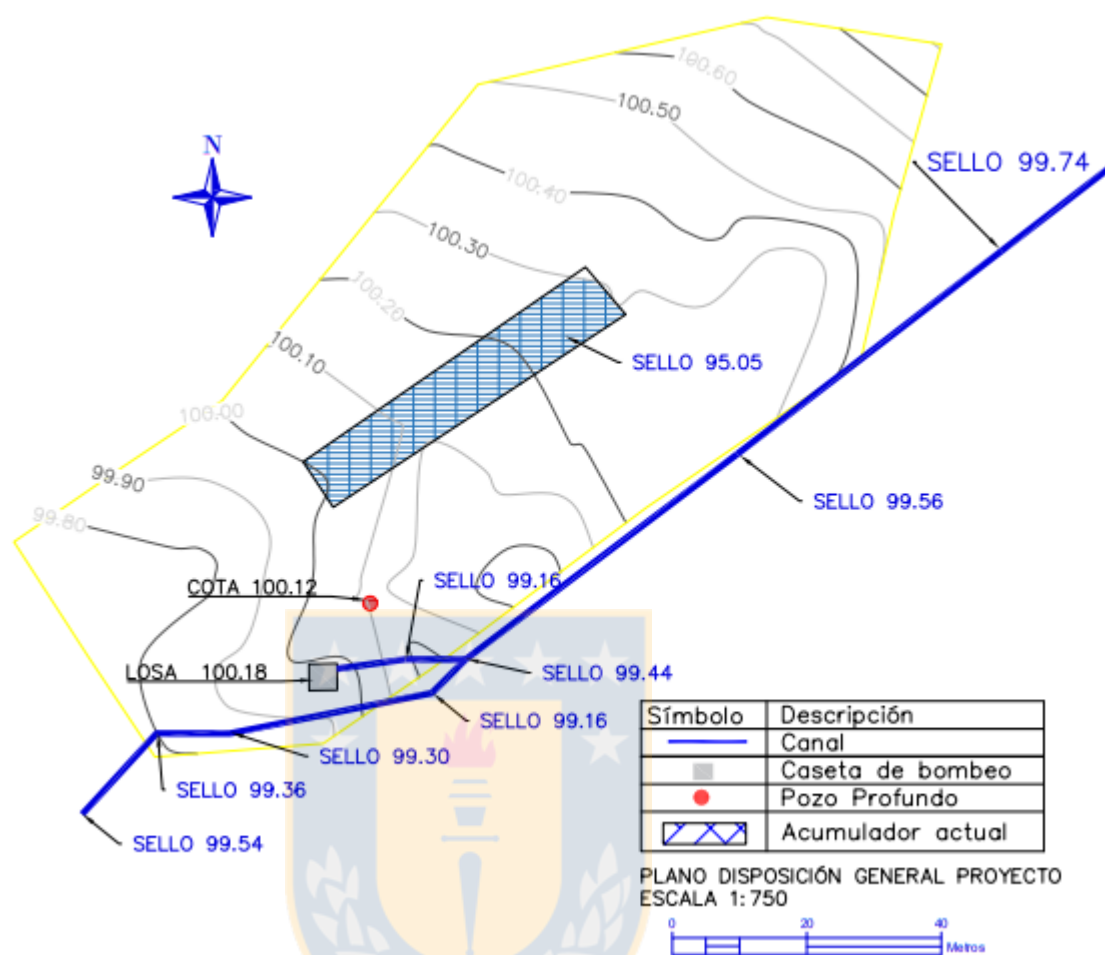


Figura 3. Plano de disposición general en terreno del canal de riego, acumulador existente y caseta de riego. Fuente: Elaboración propia.

4. METODOLOGÍA

4.1 Situación actual de agua de riego en el predio.

4.1.1 Aguas aportadas por el canal

El agua con la que se abastece el equipo de riego proviene del canal Collico, derivado del río Ñuble, y alcanza una dotación de 19.5 acciones, lo que equivale a 35.5 L s^{-1} con un factor de seguridad del 85% (Tabla 1). Los derechos de aprovechamiento de aguas se encuentran inscritos en el Conservador de Bienes Raíces de Chillán.

Tabla 1. Disponibilidad de agua con 85% de seguridad para el río Ñuble, río Chillán y el embalse Coihueco.

Cauce	Sección	Nombre Canal	Disponibilidad con 85% de seguridad	Unidad
Río Ñuble	1 ^a	Todos	1.82	L s^{-1} acción del río ⁻¹
Río Chillán		Todos	5.2	L s^{-1} acción del río ⁻¹
Embalse Coihueco		Matriz	10,063	m^3 acción ⁻¹ temporada ₁

Fuente: Comisión Nacional de Riego (CNR).

4.1.2 Aguas aportadas por el pozo profundo

El nivel dinámico del agua está en 34.2 m y la bomba está instalada a 42 m aproximadamente bajo el nivel del suelo. La bomba entrega una caudal de 100 L s^{-1} con una eficiencia de 77.7%.

4.1.3 Aguas aportadas por el pozo zanja existente

El pozo zanja existente es de 61 m de largo por 5 m de ancho y 4 m de profundidad, en el cual aflora agua y acumula ciertos derrames cuando se riegan potreros aledaños. Esta agua se ocupa para abastecer al pivote durante la noche con una bomba sumergible. Con el agua que aporta el pozo zanja más lo que entrega el canal, el pivote es capaz de funcionar aproximadamente 4 h, posteriormente se cambia a operación con pozo profundo mientras el acumulador se recupera.

4.2 Situación actual de sistema de riego

4.2.1 Descripción del Pivote Central

El pivote central es de marca Valley® de procedencia norteamericana y consiste en una estructura central de tipo EZ Tow, encargada de recibir el agua proveniente de las tuberías matrices. El largo total del pivote central es de 490 m, compuesto de 8 tramos de 58 m más un voladizo de 25 m. El sistema de

riego utiliza 75 L s^{-1} . Requiere una presión de entrada de 23.41 m.c.a. La tasa de aplicación máxima del pivote central es de 8.2 mm día^{-1} .

La superficie de riego por postura corresponde a 69.4 ha de suelo bajo estructura y 6 ha regadas por el cañón instalado en el extremo del voladizo. Lo que da en total una superficie regada de 75.3 ha. El sistema trabaja con una bomba accionada por un motor eléctrico de 50 hp además de 18 kW requeridos para movilizar el pivote, por lo que se cuenta con una potencia instalada 75KVA en el transformador.

4.2.2 Descripción del equipo electrógeno

El equipo es impulsado por un motor diésel, su consumo fue medido durante la temporada de verano bajo carga y es de 11 L h^{-1} . El equipo electrógeno es de marca DMT y genera 112.5 KVA a una frecuencia de 1.500 rpm (Figura 4)



Figura 4. Placa del equipo electrógeno, que detalla características técnicas de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Descripción bomba sumergible

En el pozo profundo hay una electrobomba Goulds modelo 11 CMC/1 con un motor de 60 Hp. La eficiencia de la bomba para la altura de agua que está levantando es de 77.7% (Figura 5). La tubería del pozo profundo es de un diámetro de 200 mm (8").

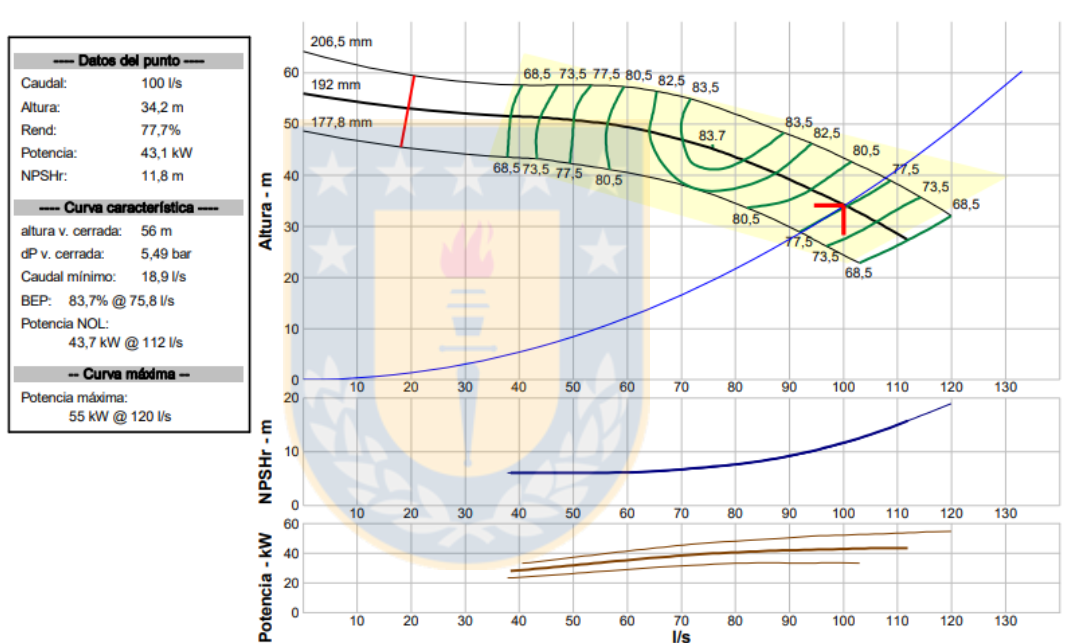


Figura 5. Curva característica de la bomba instalada en el pozo profundo.
Fuente: Goulds Water Technology.

4.3 Modo de operación y costos

Actualmente el agua aportada por el canal no es suficiente para que el equipo funcione continuamente durante gran parte de la temporada, no solo por la insuficiencia de agua, sino que también por la falta de un lugar para

acumular agua y así poder tener cierto respaldo al momento de funcionar. Es por este motivo que se construyó un pozo profundo, el cual funciona durante los meses de mayor demanda, y para poder funcionar la bomba instalada en el pozo profundo es necesario un generador a diésel.

Durante parte de la noche se ocupa el agua del pozo zanja (Tabla 2), impulsada por una bomba sumergible, y la aportada por el canal, esta alcanza para aproximadamente 2 horas de funcionamiento del equipo de riego y luego es necesario volver a operar con el pozo profundo.

Por otra parte, otro problema del modo de funcionamiento actual, es que por lo menos una vez a la semana es necesario limpiar el foso de succión del pivote, ya que el agua del canal trae mucho sedimento que se acumula en el fondo. Esto conlleva riegos para el equipo mismo y su eficiencia, aparte de tapar boquillas y filtros.

Tabla 2. Dimensiones de pozo zanja existente en el predio.

Dimensiones pozo zanja actual	
Ítem	Cantidad
Largo (m)	61
Ancho (m)	5
Profundidad sección Actual (m)	4
Metros cúbicos acumulador Actual (m ³)	1,160

Tabla 3. Costo de operación actual del pozo profundo y la bomba sumergible instalada en el pozo zanja para suplir el agua faltante del sistema de riego.

Ítem	Pozo profundo	Bomba sumergible	
Horas de trabajo	22.2	1.8	
Costo por día	\$ 114,922	\$ 608	
Total (\$ mes ⁻¹)	\$ 2,758,136	\$ 14,589	\$ 2,772,725

Para calcular el costo de la Tabla 3, se consideró un consumo del generador 11 L h⁻¹ y la bomba sumergible 5.2 kWh, teniendo un costo de \$470 por litro de diesel y de \$66 el kWh.

4.4 Parámetros del acumulador

El tipo de suelo que existe donde se encuentra el acumulador es una mezcla de roca con arcilla. Para efectos de cálculo y seguridad se considerará sólo que es arcilla rígida, por lo que lo recomendado para no tener problemas de derrumbe en el muro de acumulador es una pendiente de 45% (Tabla 4).

Tabla 4. Pendiente típica del talud bajo el agua.

Table 14.19 Typical slopes under water (ICE, 1995).

Type of material	Description	Slopes in still water	Slopes in active water
Rock		Nearly vertical	Nerly vertical
Clay	Stiff	45° IV: 1H	45° IV: 1H
	Firm	35° IV: 1.4H	30° IV: 1.7H
	Sandy	25° IV: 2.1H	15° IV: 3.7H
Sand	Coarse	20° IV: 2.7H	10° IV: 5.7H
	Fine	15° IV: 3.7H	5° IV: 11.4H
Silt	Mud	10-1° IV: 5.7H to 57H	IV: 11.4H or less

Fuente: (Look, B.G. 2007).

4.5 Parámetros del sedimentador

Para dimensionar el tipo de sedimentador primero se debe conocer el diámetro de las partículas existentes en el agua del canal. Para conocer esto se hizo una prueba de tamizado en el laboratorio de Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción con una muestra tomada de sedimentos retirados del fondo del pozo de succión. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores obtenidos en laboratorio de muestra de sedimento de canal y la cantidad en gramos y porcentaje que corresponden a cada diámetro.

Medidas			Peso+	Capsula	Muestra		
Mesh	Micrones	mm	cap (g)	(g)	(g)	%	% acum
18	1000	1	596.52	525.23	71.29	22%	22%
35	500	0.5	529.6	495.17	34.43	11%	33%
60	250	0.25	597.94	484.04	113.9	36%	69%
80	177	0.177	516.62	459.41	57.21	18%	87%
120	125	0.125	468.13	453.49	14.64	5%	91%
230	63	0.063	473.48	452.55	20.93	7%	98%
<63	<63	<63 -Limo	267.23	260.9	6.33	2%	100%

Los aspersores que ocupa el pivote son de marca Senninger, cuya menor boquilla es de 0.79 milímetros (Senninger. 202?). Por ende, para evitar problemas de taponamiento en las boquillas se hará el dimensionamiento de un sedimentador que sea capaz de retener las partículas mayores a un 10 % del tamaño del diámetro menor de boquilla, siendo 0.079 mm, es decir, en la Tabla 8 todas las partículas mayores a 0.063 mm. Con esto se capturaría el 91% de los sólidos que posee el agua del canal.

Para poder calcular las dimensiones del sedimentador primero hay que calcular la velocidad sedimentan estas partículas, suponiendo que es un flujo laminar, se utiliza la ecuación 1.

$$v_s = \frac{g(\rho_p - \rho_w)d_p^2}{18\mu} \quad [1]$$

Donde:

v_s = Velocidad de sedimentación (cm s⁻¹)

g = Aceleración de gravedad (cm s⁻²)

ρ_p =Densidad de la partícula (g cm⁻³)

ρ_w =Densidad del agua (g cm⁻³)

d_p =Diámetro de la partícula (cm)

μ =Viscosidad dinámica (g cm⁻¹ s⁻¹)

Una vez calculado la velocidad de sedimentación, se calcula el número de Reynolds con esta, utilizando la ecuación 2.

$$Re = \frac{v_s d_p}{\nu} \quad [2]$$

Donde:

Re =Numero de Reynolds

v_s = Velocidad de sedimentación (cm s^{-1})

d_p = Diámetro de la partícula (cm)

ν = Viscosidad cinemática ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)

Se chequea el número de Reynolds, siendo $\text{Re} < 2$ la ecuación 1 es válida (flujo laminar), de lo contrario es necesario ocupar la ecuación 3 para un flujo de transición y chequear nuevamente.

$$v_s = \left[\frac{g(\rho_p - \rho_w)d_p^{1.6}}{13.9 \rho_w^{0.4} \mu^{0.6}} \right]^{1/1.4} \quad [3]$$

Luego de calcular la velocidad de sedimentación de la partícula se procede a calcular el área total del sedimentador, para esto se ocupa la ecuación 4.

$$A_s = \frac{100 Q_{max}}{v_s n_{sed}} \quad [4]$$

Donde:

A_s = Área de sedimentador (m^2)

Q_{max} = Caudal máximo del canal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

v_s = Velocidad de sedimentación (cm s^{-1})

n_{sed} = número de sedimentadores (unidades)

Una vez calculado el área por sedimentador se puede calcular el largo, ancho y profundo de cada uno, quedando a criterio del diseñador o según disposición de terreno, pero siempre cumpliendo los parámetros especificados en la Tabla 6.

Tabla 6. Criterios de diseño típicos para tanques rectangulares de flujo horizontal.

Parameter	Units	Value
Type	-	Horizontal-flow rectangular tank
Minimum number of tanks	Unitless	2
Water depth	m (ft)	3-5 (10-16)
Length-to-depth ratio, minimum	Dimensionless	15:01
Width-to-depth ratio	Dimensionless	3:1-6:1
Length-to-width ratio, minimum	Dimensionless	4:1-5:1
Surface loading rate (overflow rate)	m/h (gpm/ft ²)	1.25-2.5 (0.5-1.0)
Horizontal mean-flow velocity (at maximum daily flow)	m/min (ft/min)	0.3-1.1 (1-3.5)
Detention time	h	1.5-4
Laundry weir loading	m ³ /m * h (gpm/ft)	9-13 (12-18)3
Reynolds number	Dimensionless	<20,000
Froude number	Dimensionless	>10 ⁻⁵
Bottom slope for manual sludge removal systems	m/m	1 : 300
Bottom slope for mechanical sludge scraper equipment	m/m	1 : 600
Sludge collector speed for collection path	m/min (ft/min)	0.3-0.9 (1-3)
Sludge collector speed for the return path	m/min (ft/min)	1.5-3 (5-10)

Fuente : (Crittenden, J.C., R.R. Trussell, D.W. Hand, K.J. Howe and G. Tchobanoglous. 2012).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se proponen dos ideas para mejorar el funcionamiento de este equipo de riego, ambas deben ejecutarse en serie. La primera mejora es ampliar el pozo zanja actual, lo que aumentaría su volumen de agua acopiado, siendo capaz de abastecer por más horas al equipo de riego sin la necesidad de ocupar el pozo profundo, convirtiéndolo en un acumulador. Pudiendo crecer hasta el doble debido a la superficie disponible sin alterar el terreno cultivable. La siguiente mejora sería sobre el canal que abastece de agua, conectarlo al pozo acumulador y el otro extremo de este conectarlo a la succión del pivote. Pero con la salvedad que en la conexión que se hará entre el canal y el pozo acumulador proyectado, debe incluirse un sedimentador.

Beneficios producto de ejecutar propuesta:

- No depender de la bomba para ocupar el agua del pozo zanja.
- Tener mayor respaldo ante un eventual problema con el suministro hídrico.
- No perder el exceso de agua aportado por el pozo profundo.
- Disminuir las horas trabajadas por el pozo profundo, que es el que genera los mayores gastos para la modalidad de operación.
- Lograr sedimentar las partículas de mayor diámetro provenientes del canal y que no terminen sedimentadas en el fondo del acumulador.
- Disminuir el costo de operación y optimizar el sistema de riego.

5.1 Acumulador

Se decidió ampliar el pozo zanja especificado en la Tabla 2, convirtiéndolo en un acumulador, en razón al espacio físico disponible en el lugar. Además, porque hay que hacer el canal con el sedimentador que lleve el agua al pozo acumulador, quedando de las dimensiones especificadas en la Tabla 7.

El pozo zanja existente no posee taludes, es una excavación vertical por lo que, como era de esperar, ocurrieron pequeños derrumbes que hubo que ir sacando a medida que ocurrían. El acumulador proyectado posee taludes en sus paredes para evitar estas imperfecciones.

Tabla 7. Dimensiones del pozo acumulador proyectado.

Ítem	Cantidad
Área transversal proyectada (m ²)	44
Largo proyectado (m)	53
Metros cúbicos acumulador Proyectado (m ³)	2,332

5.2 Sedimentador

Aguas abajo del marco partidor del canal, se debe hacer una compuerta de derivación. Esto con el objeto de poder seleccionar hacia donde conducir el agua. La idea de este proyecto es conducir el agua hacia el acumulador a través del sedimentador, y la segunda opción es que siga el curso como está operando en la actualidad, en caso de ocurrir algún problema.

Se consideró hacer tres sedimentadores iguales, pero sólo que funcionen dos de ellos y el tercero está por si ocurre algún problema o para la limpieza de uno de los dos que están en funcionamiento sin detener el proceso (Figura 6).

Para retener partículas mayores a 0.079 mm con dos sedimentadores funcionando en paralelo y uno de respaldo serán de 7.2 metros de largo por 1.7 metro de ancho y 1.5 metros de profundidad, obteniendo los parámetros de verificación dentro de lo recomendado según Tabla 6, en el caso de la relación del ancho con el largo, pero en la proporción de la profundidad con las demás dimensiones no está dentro de los parámetros, ya que la concentración de sólidos en el agua es muy alta por lo que se tuvo que profundizar el sedimentador para que durara más tiempo sin tener que limpiarlo.

Con estas dimensiones se estima que el tiempo de operación del sedimentador es de 6.5 horas y se tiene que cambiar al de remplazo mientras

se limpia el que esta colmatado sin dejar de operar el sistema completo. Este sedimentador está diseñado para una alícuota de 5.14 l/s por acción, lo cual es el caso con caudal máximo, lo que normalmente no ocurre, por lo que el tiempo de operación es como mínimo de 6.5 horas, llegando fácilmente con la mitad del caudal máximo a 12 horas por cada sedimentados, con lo que el sistema tendría que limpiarse solo 2 veces al día.

En la Figura 6 y 7 se muestra el plano de planta y un modelo en tres dimensiones respectivamente de los sedimentadores proyectados.



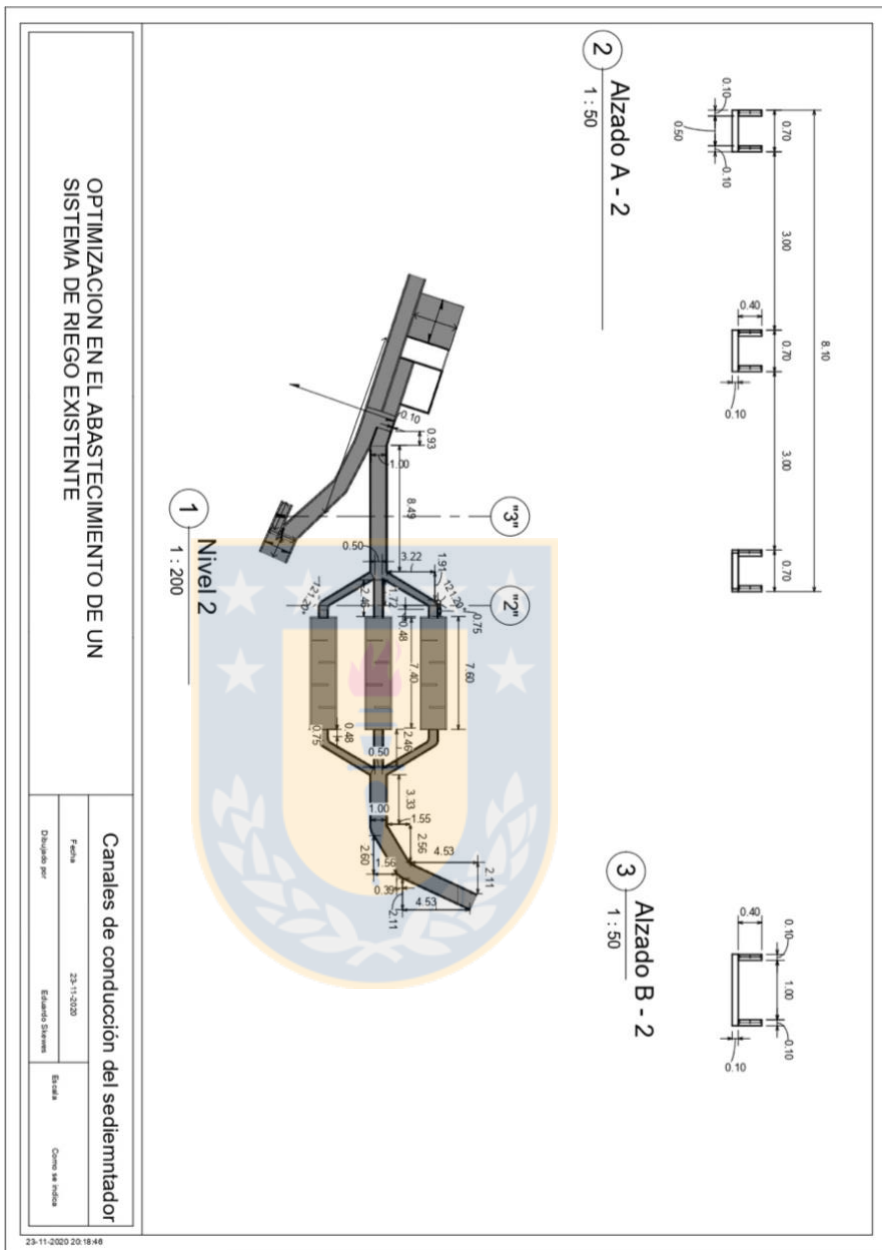


Figura 6. Plano de planta de sedimentadores proyectados. Fuente: Elaboración propia.

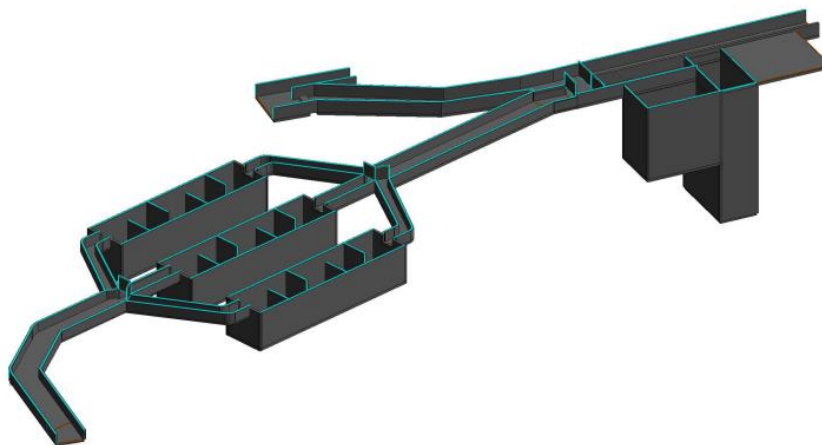


Figura 7. Modelo 3D de sedimentadores proyectados para alimentar el acumulador. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Conexión de acumulador a succión de pivote

La conexión que se hará del acumulador al pivote será por tubos corrugados de 600mm, debido a su facilidad de instalación y su resistencia bajo altas cargas. Serán necesario 3 tubos de 6 metros, los cuales conectarán los fondos de ambos pozos (acumulador y succión). En el empalme de los tubos con el acumulador se rociara una capa de 10cm de hormigón proyectado para evitar derrumbes.

Para esta conexión será necesario profundizar 164 cm el fondo del pozo de succión existente del pivote, para igualar el del acumulador. Luego instalar una compuerta que conecte el tubo que viene del acumulador con el pozo de succión, para así en caso de tener problemas con el acumulador poder volver a operar como esta en la actualidad.

El problema que existe es que el nivel en donde está ubicado la válvula de pie del pivote solo aprovecharía el 29% del agua disponible del acumulador. Siendo necesario bajar la válvula de pie lo más posible, para aprovechar el agua del acumulador. Pero con la bomba que cuenta el pivote solo se puede profundizar el tubo de succión 50cm más de donde está, antes que empiece a cavitarse, con lo que se llegaría a aprovechar un 42.5%.

La finalidad del proyecto es aprovechar al máximo el agua y de mejor manera, por lo que se opta por bajar la bomba (acercarla al nivel del agua). Para esto es necesario hacer una cámara de hormigón armado impermeable, ya que la bomba por momentos estará bajo el nivel del agua.

Debido a la mayor complejidad operacional que conlleva esta decisión, se trata de bajar lo menos posible la bomba, pero con la condición de aprovechar al máximo el agua del acumulador, siendo suficiente para esto bajar 2.6 m la bomba de donde está ubicada actualmente.

5.4 Horas de trabajo proyectadas

Considerando que el acumulador esté lleno, la autonomía que tendrá el pivote sin la necesidad de hacer funcionar el pozo profundo será de 18.1 h, que en comparación a las 4 h que tiene el acumulador actual, pero con un modo de funcionamiento distinto, incluyendo un motor más en el funcionamiento (bomba sumergible).

Esto representa una gran ventaja tanto en la seguridad como en la sencillez de operación, y siendo aún más importante, el ahorro monetario y menor desgaste de la maquinaria.

Para el caso del sedimentador el tiempo de operación es de 6.5 h hasta que sea necesario limpiar los sedimentos, pero como son 3 no es necesario parar el riego, ya que mientras se limpia una se sigue operando con los otros dos. Estas 6.5 h son el peor de los casos, ya que fue calculado con el máximo caudal disponible en la temporada. Para el caso de un caudal con un 85% de seguridad el tiempo de operación de los sedimentadores sería de 17.7 h.

5.5 Presupuesto detallado para el proyecto

5.5.1 Acumulador

Tabla 8. Costo de ampliar el acumulador existente, según costo contratista.

Ampliar acumulador	Unid	Cant.	P. unit.	Total
Excavación	m ³	1,192	\$ 1,100	\$ 1,311,200
TOTAL				\$ 1,311,200

5.5.2 Sedimentador

Tabla 9. Costos de hacer el sedimentador para el sistema de riego.

Sedimentador	Unid.	Cant.	P. unit.	Total
Excavación	m ³	48	\$ 1,100	\$ 52,279
Hormigón G-200	m ³	16.42	\$ 66,912	\$ 1,098,695
Acero A44-28H	kg	2,102	\$ 953	\$ 2,003,319
Moldajes	m ²	298	\$ 5,606.0	\$ 1,670,588
Compuerta de fierro 1000x600x10	uni	1	\$ 613,856	\$ 613,856
Compuerta de fierro 500x600x10	uni	6	\$ 333,856	\$ 2,003,136
TOTAL				\$ 7,441,873

5.5.3 Conexión de acumulador proyectado a caseta de bombeo

Tabla 10. Conexión de acumulador proyectado a foso de succión del equipo de riego.

Conexión de acumulador a bomba	Unid.	Cant.	P. unit.	Total
Excavación	m ³	56	\$ 1,100	\$ 61,050
Hormigón G-200	m ³	3.7	\$ 66,912	\$ 247,574
Moldajes	m ²	4	\$ 5,606	\$ 22,424
Compuerta de fierro 1000x600x10	uni	1	\$ 613,856	\$ 613,856
Tubo corrugado 600mm	uni	3	\$ 317,944	\$ 953,832
TOTAL				\$ 1,898,736

5.5.4 Profundización de bomba

Tabla 11. Costos de profundizar la sala de bombeo.

Profundizar bomba	Unid.	Cant.	P. unit.	Total
Excavación	m ³	17	\$ 1,100	\$ 19,107
Hormigón G-300	m ³	7.86	\$ 73,574	\$ 578,292
Fierro construcción 10mm	kg	779.3	\$ 953	\$ 742,645
Moldajes	m ²	159	\$ 5,606.0	\$ 890,569
Hilo corrido 1/2" G10	m	2	\$ 11,900	\$ 23,800
Tuerca 1/2" con golilla plana y de presión	uni.	4	\$ 714	\$ 2,856
Tubo acero 250mm	m	1	\$ 10,341	\$ 10,341
Flanje Acero 250mm DIN	uni.	2	\$ 26,537	\$ 53,074
Eléctrico	día	1	\$ 59,900	\$ 59,900
Maestro soldador	día	0.2	\$ 47,600	\$ 9,520
Mano de obra maestro de segunda	día	6	\$ 13,333	\$ 80,000
Leyes sociales	%	55		\$ 60,323
TOTAL				\$ 2,530,430

5.5.5 Costo total del proyecto

Tabla 12. Resumen de costos del proyecto.

AMPLIAR ACUMULADOR	\$ 1,311,200
SEDIMENTADOR	\$ 7,441,873
CONEXIÓN ACUMULADOR-BOMBA	\$ 1,898,736
PROFUNDIZAR BOMBA	\$ 2,530,430
SUB TOTAL	\$13,182,239
GASTOS GENERALES E IMPRE.	\$ 659,111
UTILIDADES	\$ 1,977,335
SUB TOTAL GENERAL	\$15,818,685
ELABORACIÓN DEL PROYECTO	\$ 1,000,000
SUPERVISION	\$ 800,000
TOTAL GENERAL sin IVA	\$17,618,685

5.5.6 Análisis precios unitarios

5.5.6.1 Hormigón G-200

Tabla 13. Análisis de precio unitario un hormigón G-200.

Detalle	Unid.	Cant.	P. Unit.	Total
Ripio, incluye flete	m ³	1	\$ 4,286	\$ 4,286
Arena, incluye flete	m ³	0.5	\$ 8,571	\$ 4,286
Cemento, incluye flete	Bolsa	8	\$ 3,470	\$ 27,760
Perdidas	%	4		\$ 1,020
Betonera 11p. 7,5 HP	mes	0.08	\$ 113,862	\$ 9,109
Mano de obra concretero	días	1	\$ 14,516	\$ 14,516
Maestro de segunda	días	0.2	\$ 11,290	\$ 2,258
Leyes Sociales	%	55		\$ 3,677
TOTAL	m ³			\$ 66,912

5.5.6.2 Hormigón G-300

Tabla 14. Análisis de precio unitario un hormigón G-300.

Detalle	Unid.	Cant.	P. Unit.	Total
Ripio, incluye flete	m ³	0.7	\$ 4,286	\$ 2,929
Arena, incluye flete	m ³	0.34	\$ 8,571	\$ 2,914
Cemento, incluye flete	Bolsa	11	\$ 3,470	\$ 38,170
Betonera 11p. 7,5 HP	mes	0.08	\$ 113,862	\$ 9,109
Mano de obra concretero	días	1	\$ 14,516	\$ 14,516
Maestro de segunda	días	0.2	\$ 11,290	\$ 2,258
Leyes Sociales	%	55		\$ 3,677
TOTAL	m ³			\$ 73,574

5.5.6.3 Moldaje recto

Tabla 15. Análisis de precio unitario en la instalación de moldajes de madera.

Detalle	Unid.	Cant.	P. Unit.	Total
Pino bruto	pulg.	1.2	\$ 1,500	\$ 1,800
Clavos 2 1/2"	Kg.	0.25	\$ 980	\$ 245
Alambre Negro N°14	Kg.	0.2	\$ 420	\$ 84
Carpintero + 1 ayudante	días	0.1	\$ 27,420	\$ 2,742
Leyes Sociales	%	55		\$ 735
TOTAL	m ²			\$ 5,606

5.5.6.4 Acero A44-28

Tabla 16. Análisis de precio unitario del armado de la enfierradura.

Detalle	Unid.	Cant.	P. Unit.	Total
Fierro Estriado 10mm	Kg	1	\$ 240	\$ 240
Alambre Negro N°18	Kg	0.02	\$ 490	\$ 10
Maestro + 1 ayudante	días	0.02	\$ 27,420	\$ 548
Leyes Sociales	%	55		\$ 155
TOTAL	Kg.			\$ 953

5.5.6.5 Tubería corrugada

Tabla 17. Análisis de precio unitario instalación de instalación de una tubería corrugada.

Detalle	Unid.	Cant.	P. Unit.	Total
Tubería Corrugada	m	1	\$ 75,690	\$ 75,690
Arena, incluye flete	m ³	0.2	\$ 8,571	\$ 1,714
Maestro + 2 ayudantes	días	0.05	\$ 38,709	\$ 1,935
Leyes Sociales	%	55		\$ 146
OTAL	m			\$ 79,486

5.5.6.6 Compuerta de fierro

Tabla 18. Análisis de precio unitario de instalación de una compuerta de fierro.

Detalle	Unid.	Cant.	P. Unit.	Total
Compuerta fierro 1000x600x10	uni	1	\$ 600,000	\$ 600,000
Maestro + ayudantes	días	0.5	\$ 27,420	\$ 13,710
Leyes Sociales	%	55		\$ 146
TOTAL	uni			\$ 613,856

Ídem para valor de la instalación de compuerta de 500x600x10mm, pero con valor de la unidad de \$320.000.

5.6 COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA PROYECTADO Y RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Para este caso se considera sólo el costo de operación del pozo profundo ya que en la situación proyectada no es necesario tener la bomba sumergible y en los demás costos no existe una diferencia en la situación actual y en la proyectada se mantienen los costos, como el del consumo de la bomba del pivote, el consumo de los motores de las ruedas del pivote, etc. Por lo que no es considerado en pago de la inversión con el ahorro generado.

Tabla 19. Costo de operación mensual proyectado del pozo profundo para suplir el agua faltante del sistema de riego.

Ítem	Pozo profundo	
Horas de trabajo		8.6
Costo por día	\$	44,496
Total (\$/mes)	\$	1,067,907

La diferencia entre el costo actual de los sistemas para suplir el agua necesaria para el riego y el costo del sistema proyectado es el ahorro generado por el proyecto, es decir la diferencia entre la Tabla 3 y la Tabla 19, la cual es representada en la Tabla 20.

Tabla 20. Costo mensual actual y costo mensual de la situación proyectada para suplir el agua faltante del sistema de riego.

Costo mensual		
Costo actual	\$	2,772,725
Costo situación proyectada	\$	1,067,907
Ahorro Generado por proyecto	\$	1,704,818

Tabla 21. Flujo de caja de proyecto propuesto.

Años	Flujos	Flujo Acumulado	VAN
0	-17,618,685		
1	5,114,454	5,114,454	4,447,351
2	5,114,454	10,228,908	3,867,262
3	5,114,454	15,343,362	3,362,837
4	5,114,454	20,457,816	2,924,206
5	5,114,454	25,572,270	2,542,788
6	5,114,454	30,686,724	2,211,120
7	5,114,454	35,801,178	1,922,713
8	5,114,454	40,915,632	1,671,924
9	5,114,454	46,030,086	1,453,847
10	5,114,455	51,144,541	1,264,215

Tabla 22. La tasa de interesa evaluar el proyecto, la rentabilidad maxima del proyecto (TIR), valor actual neto del proyecto (VAN) y año de recuperación de la inversión.

Tasa de interés	15%
Rentabilidad Máxima Proyecto (TIR)	26%
Valor actual Neto del proyecto (VAN)	\$8,049,577
Año de recuperación	3.3

El costo total de realizar el proyecto es de \$17,618,685 (Tabla 12) y considerando meses de pleno riego diciembre, enero y febrero, el ahorro mensual por realizar este proyecto es de \$1,704,818 (Tabla 20), por lo que se consideró ese ahorro como un ingreso en la Tabla 21.

Evaluando el proyecto en un periodo de 10 años con una tasa de interés del 15% se obtiene un VAN del proyecto de \$8,049,577. Recuperando la inversión en 3 años y un mes, y obteniendo una rentabilidad del proyecto de un 26% (Tabla 22).

6. CONCLUSIÓN

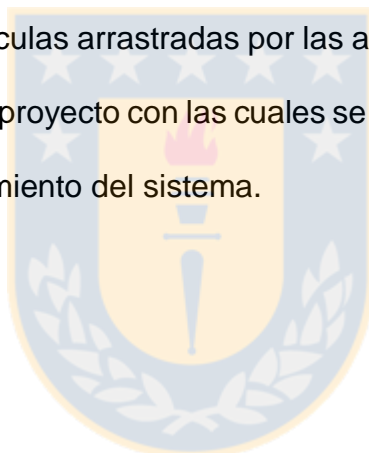
En base a los objetivos planteados de este proyecto el sistema propuesto apunta a optimizar el uso de los recursos, mediante una solución que aprovecha mayormente la infraestructura existente. Dando soluciones al excesivo uso y mal aprovechamiento del agua proveniente del pozo profundo, como también el gran problema con los sedimentos aportados por el canal de riego.

Para optimizar el funcionamiento del pozo profundo se optó por agrandar el acumulador, con el cual el agua sobrante del pozo profundo e incluso el agua aportada por el canal en los momentos de no uso del equipo de riego, se lograrán acumular y no perder por el canal aguas abajo, como también tener un gran respaldo hídrico ante cualquier posible falla.

Para solucionar el problema de los sedimentos se optó por proyectar tres sedimentadores en serie, pero que sólo dos estén siempre funcionando y el tercero a modo de respaldo, tanto ante una eventual falla, como para turnar cuando se realizan limpiezas. Con el diseño planteado se espera sedimentar por completo partículas mayores el 10% del diámetro de la menor boquilla que posee el pivote. Esto permitiría el funcionamiento óptimo del equipo, teniendo un riego uniforme y continuo, sin tener que estar deteniéndolo el equipo para destapar tanto los filtros como las boquillas que se tapan regularmente.

El ahorro directo que genera este proyecto consiste en, disminuir el uso de la bomba sumergible que se tiene en el acumulador y minimizar horas extras el pozo profundo, siendo equivalentes en término de costos de \$1,704,818 mensuales, correspondientes a un mes de máxima demanda como enero y febrero. El costo del proyecto es de \$17,618,685 aproximadamente, lo que se traduce en la recuperación de la inversión en 3 años y un mes.

En resumen, las mejoras tanto al sistema existente de acumulación, la optimización del uso del agua aportada por el pozo profundo y el lograr sedimentar las partículas arrastradas por las aguas superficiales, son mejoras planteadas por este proyecto con las cuales se obtiene un beneficio económico dentro del funcionamiento del sistema.



7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje N°56. FAO. Roma, Italia.
2. Apey, A., D. Barrera y T. Rivas. 2017. Agricultura chilena: Reflexiones y desafíos al 2030. ODEPA. Santiago, Chile.
3. Crittenden, J.C., R.R. Trussell, D.W. Hand, K.J. Howe and G. Tchobanoglous. 2012. MWH's water treatment: Principles and design. (3rd. ed.). John Wiley & Sons. Hooken, USA.
4. Look, B.G. 2007. Handbook of geotechnical investigation and design tables. Taylor & Francis. London, UK.
5. Moraga, A.A. 1998. Proyecto de captación, acumulación y distribución de aguas en estación demostrativa de riego y drenaje. Proyecto de titulación, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Departamento de Riego y Drenaje. Chillán, Chile.
6. Senninger. 2020. I WOB: the most imitated sprinkler on the market. Agricultural irrigation: Low pressure - High performance [en línea]. Drip Depot Inc, USA. <<https://stc.dripdepot.com/files/10904/10904-i-wob-brochure.pdf>>. [Consulta: 10 abril 2020].

8. PLANOS

8.1 Planos sedimentador

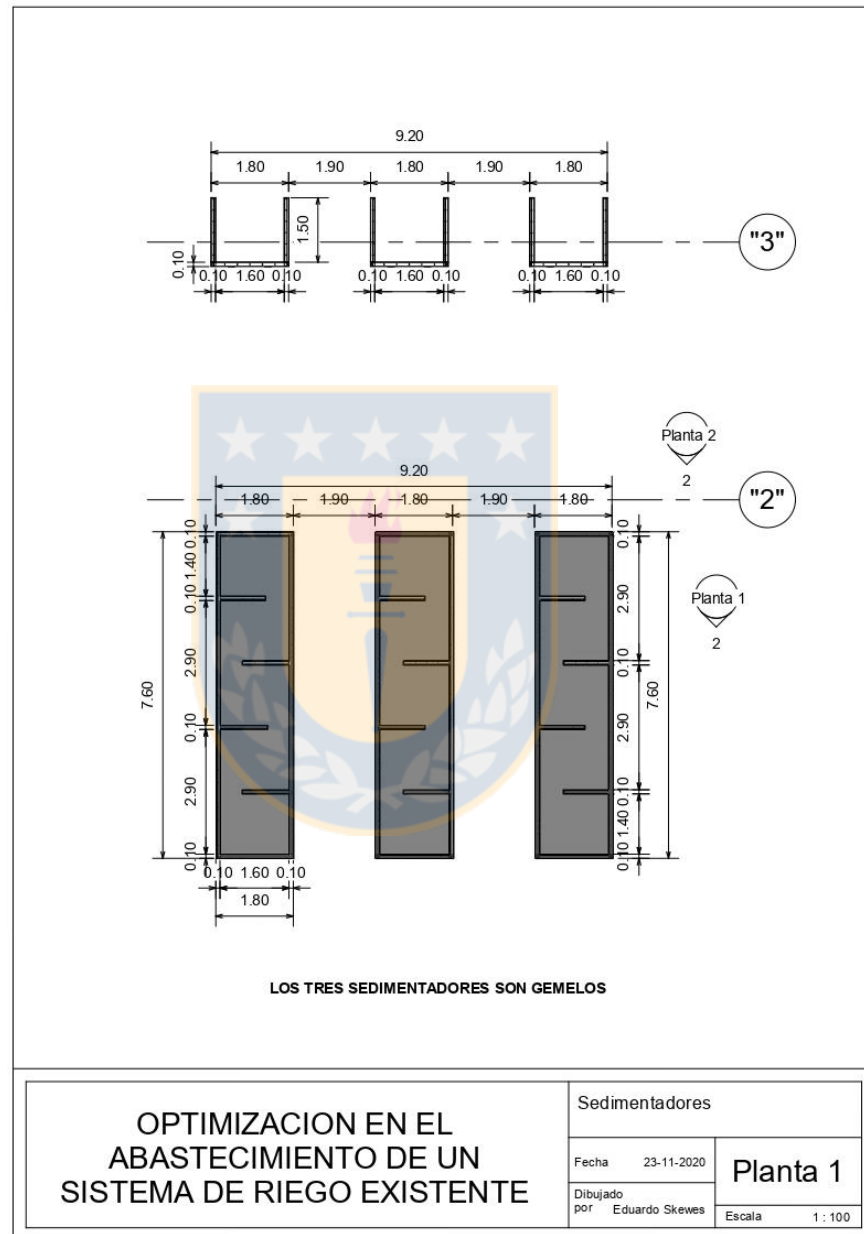


Figura 8. Plano de planta de sedimentador. Fuente: Elaboración propia.

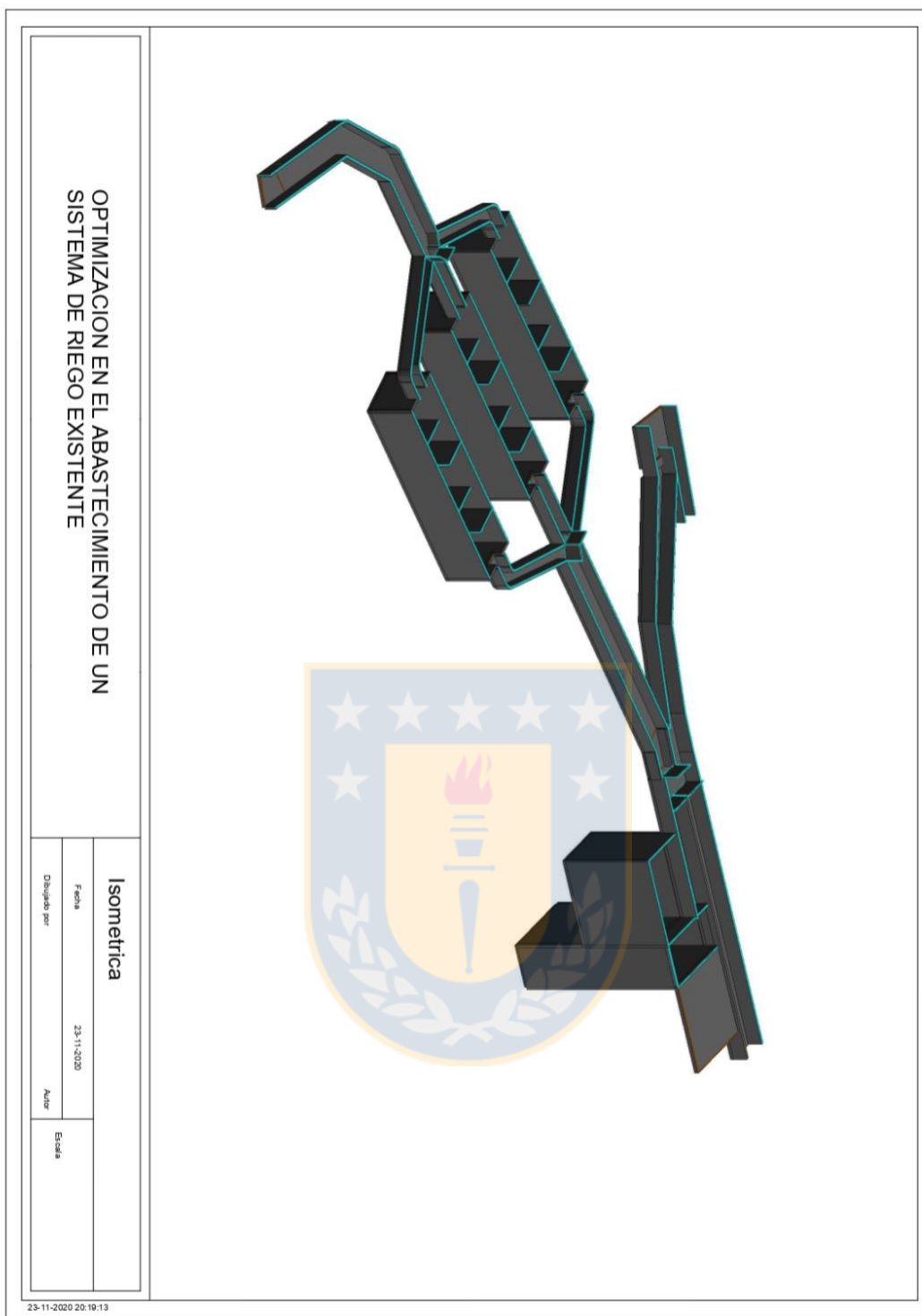


Figura 9. Esquema en tres dimensiones de sedimentador propuesto. Fuente: Elaboración propia.

8.2 Planos compuerta de fierro

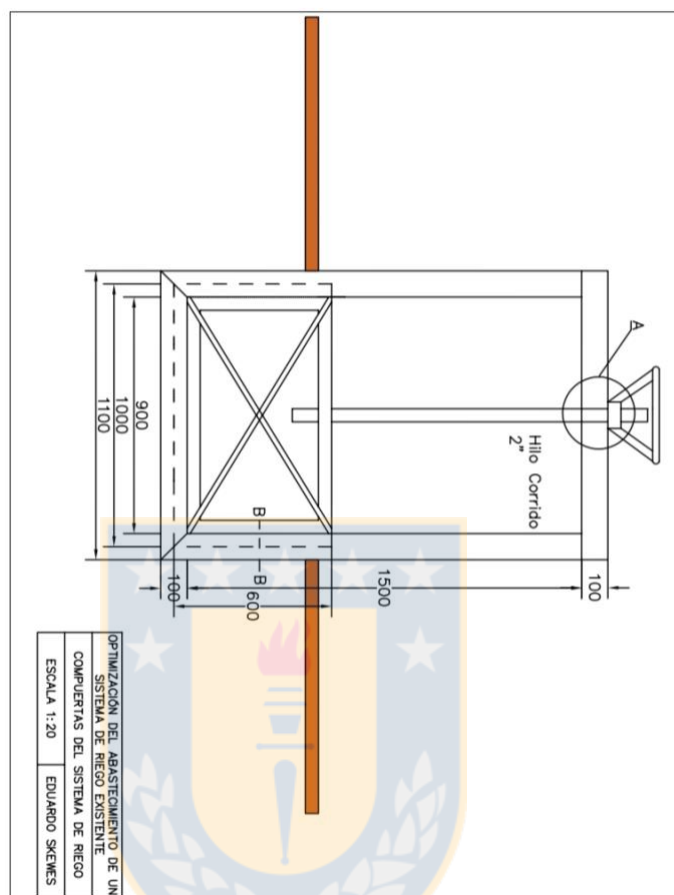


Figura 10. Compuerta para regular dirección y caudal en sedimentador.
Fuente: Elaboración propia.

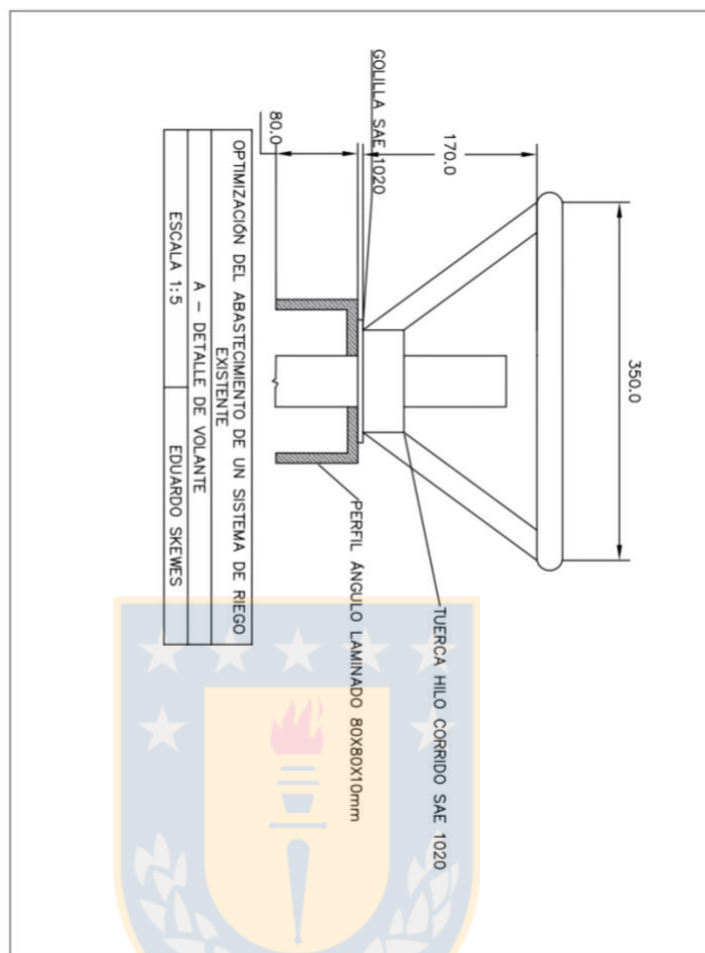


Figura 11. Detalle de volante de compuerta. Fuente: Elaboración propia.

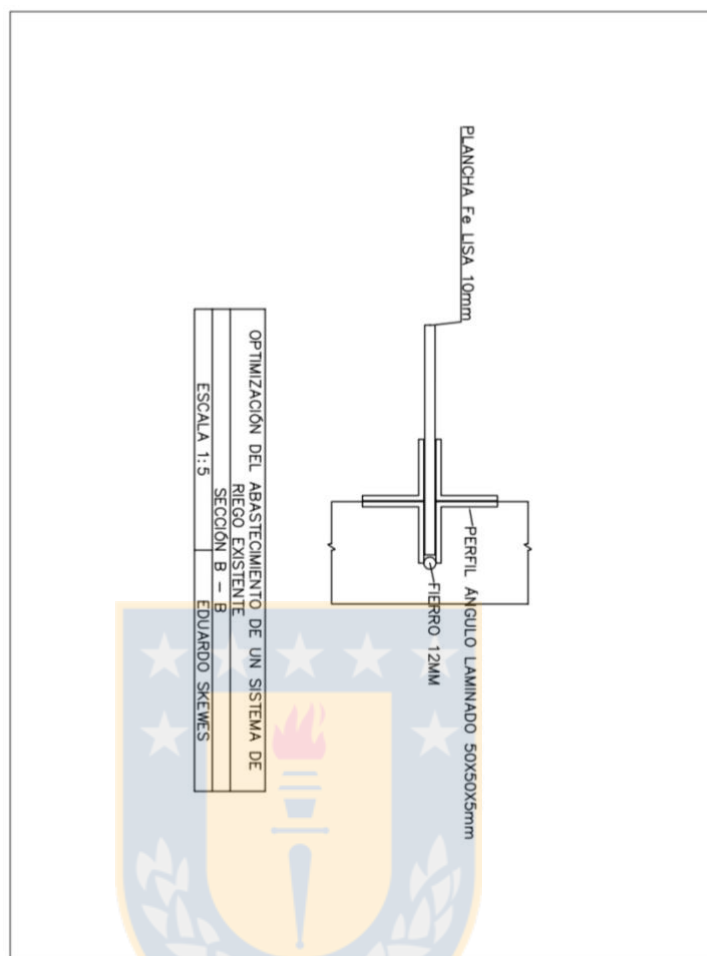


Figura 12. Detalle de guillotina de compuerta. Fuente: Elaboración propia.

8.3 Plano Acumulador

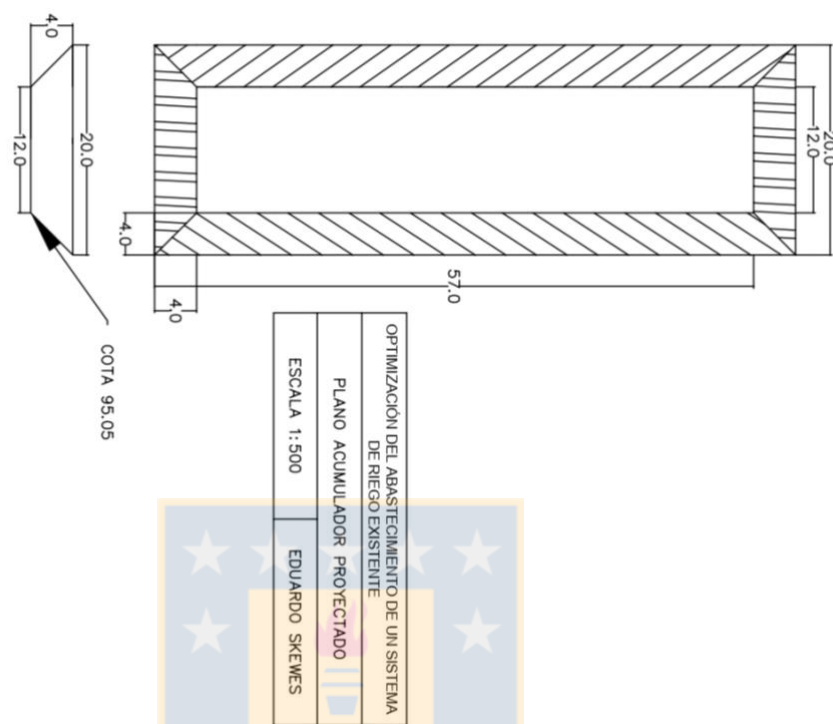


Figura 13. Acumulador proyectado. Fuente: Elaboración propia.

8.4 Plano pozo sala de bomba

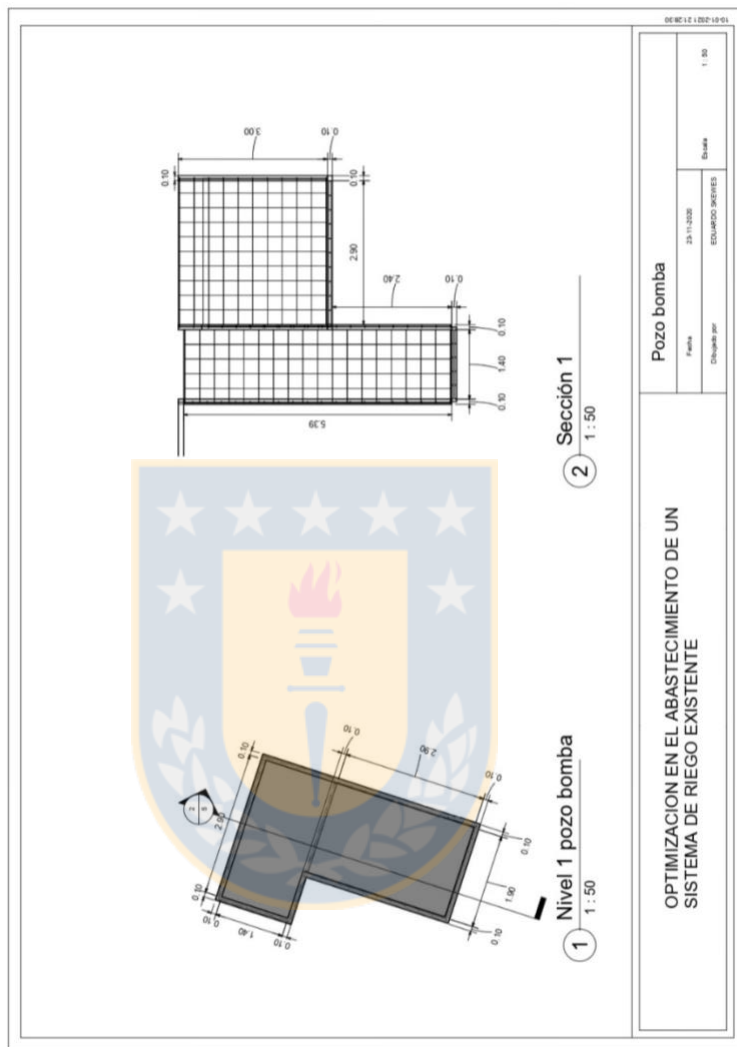


Figura 14. Plano planta sala de bombeo. Fuente: Elaboración propia.

8.5 Planos de conexión acumulador con succión pivote

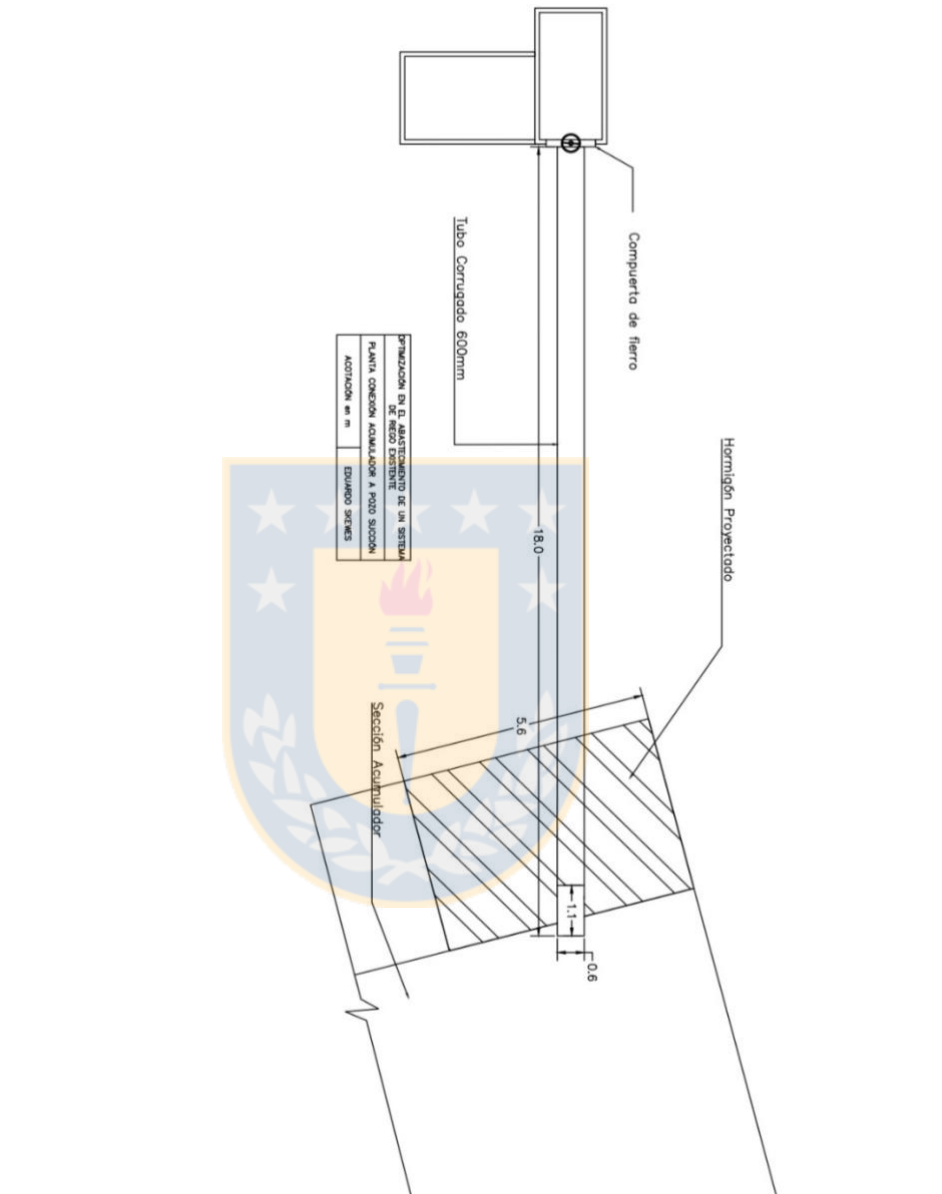


Figura 15. Vista de planta de conexión entre acumulador con succión del pivote. Fuente: Elaboración propia.

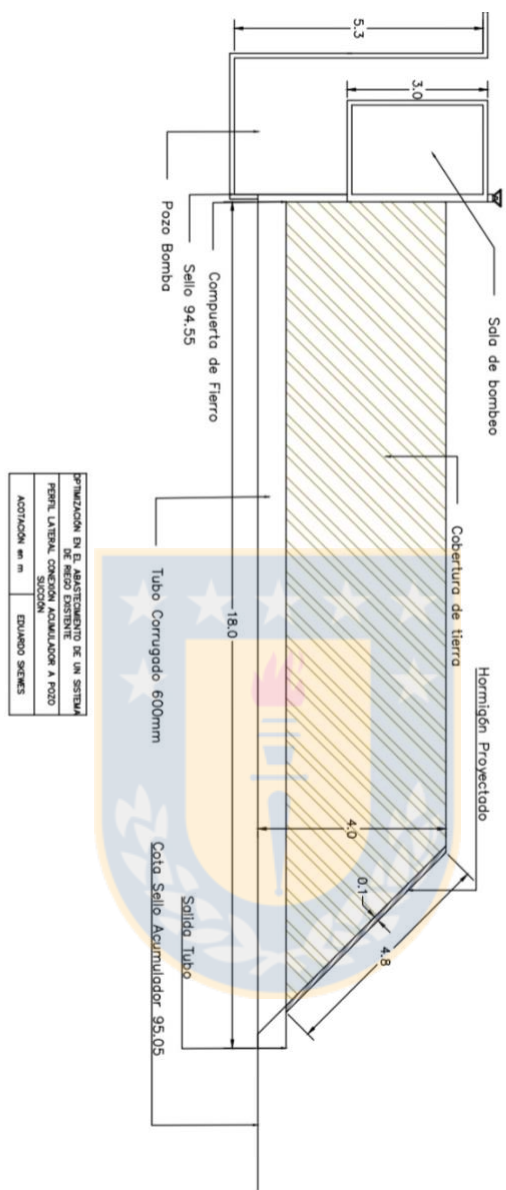


Figura 16. Perfil lateral conexión de acumulador con succión del pivote.
Fuente: Elaboración propia.